

Pengaruh Ketebalan Membran Terhadap Sifat-Sifat Membran (*Contact Angle, Porositas dan Selektivitas*)

Kautsar Rahman Winandri*, Adli Putra Anjuda, Sintha Soraya Santi*

Jurusan Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email : 20031010177@student.upnjatim.ac.id, sintha.tk@upnjatim.ac.id

Diterima: 24 Oktober 2024

Disetujui: 29 Oktober 2024

Abstract

Polymeric membranes are commonly used materials for gas separation. Blending polymers with inorganic fillers is the most efficient way to improve membrane performance. Fillers used to date include zeolite, silica, metal organic framework (MOF) and carbon molecular sieve (CMS). However, in practice, the fillers used in membrane production are considered to be expensive. Biochar is a carbon-rich solid material produced by the combustion of organic materials or biomass with little or no oxygen (pyrolysis). Biochar is also readily available and its cost is relatively affordable. Biochar has similarities to CMS in that both contain carbon, with the commercial biochar used in this study being 70% carbon. The thickness of a membrane can affect the selectivity value of the membrane due to differences in filtration thickness. The membranes made with biochar fillers and different membrane thicknesses were then tested to determine their properties. Based on the tests conducted, it was found that the membranes produced had a higher density as the membrane thickness increased. In addition, the membranes produced were also hydrophilic. The highest selectivity value was achieved by the membrane with a thickness of 500 μm .

Keywords: *membrane, filler, biochar, membrane thickness, selectivity*

Abstrak

Membran polimer merupakan bahan yang umum digunakan untuk membran pemisahan gas. Komposisi dari polimer dengan isian anorganik merupakan cara yang paling efisien untuk meningkatkan performa dari membran. Isian yang sudah dilakukan sebelumnya antara lain zeolite, silika, Metal Organic Framework (MOF) dan Carbon Molecular Sieve. Namun pada kenyataannya isian yang digunakan dalam pembuatan membran terbilang mahal. Biochar merupakan bahan padatan kaya karbon yang terbentuk melalui proses pembakaran bahan organik atau biomasa tanpa atau dengan sedikit oksigen (pyrolysis). Biochar juga mudah ditemui dan harga dari biochar sendiri terbilang terjangkau. Biochar memiliki persamaan dengan CMS yaitu memiliki karbon dimana komposisi karbon dalam biochar komersil pada penelitian ini sebesar 70%. Ketebalan suatu membran dapat mempengaruhi nilai dari suatu selektivitas membran dikarenakan perbedaan tebal filtrasi yang dilalui. Membran yang telah dibuat dengan isian biochar dan variasi ketebalan membran selanjutnya diuji untuk diketahui sifat membran tersebut. Berdasarkan hasil uji yang telah dilakukan membran yang telah dibuat merupakan membran yang memiliki kepadatan yang tinggi seiring bertambahnya ketebalan membran tersebut. Selain itu membran yang telah dibuat juga merupakan membran hidrofilik. Nilai selektivitas tertinggi didapatkan oleh membran dengan ketebalan sebesar 500 μm .

Kata kunci: *membran, filler, biochar, ketebalan membran, selektivitas*

1. Pendahuluan

Metode pemurnian biogas sudah banyak yang digunakan di Indonesia dengan tujuan untuk meminimalisir impuritas yang terkandung di dalam biogas. Salah satu contoh metode pemurnian biogas adalah menggunakan absorben. Penelitian yang dilakukan oleh Daiyan pada tahun 2020 [1] melakukan pemurnian biogas menggunakan absorben berupa monoetanolamina (MEA). Penelitian tersebut menghasilkan data berupa kandungan CO_2 dan H_2S dalam biogas terserap tinggi sehingga menyisakan sedikit impuritas di dalam biogas. Namun dalam instalasi alat yang digunakan pada penelitian tersebut terbilang rumit karena perlu merancang rangkaian alat penghasil dan pemurnian biogas serta menggunakan *packing*. Selanjutnya pada penelitian yang dilakukan oleh Pertiwiningrum dkk pada tahun 2018 [2] melakukan pemurnian biogas menggunakan kotoran ayam yang di pirolisis. Penelitian tersebut berhasil meningkatkan nilai kalor dalam biogas menjadi sangat tinggi. Namun pada penelitian tersebut akan sangat bergantung pada kuantitas dari kotoran ayam yang dimiliki.

Membran adalah suatu lapisan tipis antara dua fasa fluida yaitu fasa umpan (feed) dan fasa permeat yang bersifat sebagai penghalang (barrier) terhadap suatu spesi tertentu yang digunakan sebagai media pemisahan [3]. Membran polimer merupakan bahan yang umum digunakan untuk membran pemisahan gas. Komposisi dari polimer dengan isian anorganik merupakan cara yang paling efisien untuk meningkatkan performa dari membran. Isian yang sudah dilakukan sebelumnya antara lain zeolite, silika, Metal Organic Framework (MOF) dan Carbon Molecular Sieve [4]. Membran yang terdiri dari pencampuran isian inovatif dan matriks polimer yang dapat diproses disebut MMMs (Mixed Matrix Membranes) [5]. Namun pada kenyataannya isian yang digunakan dalam pembuatan membran terbilang mahal. Setiap isian memiliki rentang harga antara lain US\$ 5,08-US\$ 7,00 untuk silika, US\$ 5,85-US\$ 40,00 untuk zeolite, US\$ 51,50-US\$ 64,30 untuk Metal Organic Framework (MOF) dan US\$ 6,00-US\$ 10,80 untuk Carbon Molecular Sieve (CMS) (Alibaba.com).

Biochar merupakan bahan padatan kaya karbon yang terbentuk melalui proses pembakaran bahan organik atau biomasa tanpa atau dengan sedikit oksigen (pyrolysis) [6]. Biochar juga mudah ditemui dan harga dari biochar sendiri terbilang terjangkau. Biochar memiliki persamaan dengan CMS yaitu memiliki karbon dimana komposisi karbon dalam biochar komersil pada penelitian ini sebesar 70%. Karbon dalam komposisi membran digunakan untuk mengadsorpsi gas CO₂ dalam pemisahan gas. Tetapi dalam penerapannya gas CH₄ yang memiliki nilai kalor tertinggi juga ikut teradsorpsi sehingga dipilih isian yang memiliki nilai adsorpsi terkecil terhadap gas CH₄.

Penelitian yang telah dilakukan oleh Mohamed Janshir dkk pada tahun 2019 [7] mensintesis membran menggunakan bahan polimer berupa Polyethersulfone (PES) dan variasi isian berupa carbon molecular sieve (CMS) dengan N-methyl-2-Pyrolidone (NMP) sebagai pelarut dengan ketebalan 200 µm. Penelitian ini didapatkan nilai selektivitas CO₂/CH₄ sebesar 12.77. Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Alaa dkk pada tahun 2019 [8] mensintesis membran menggunakan bahan polimer berupa Polyethersulfone (PES) dengan ketebalan membran 100 µm dengan filler berupa GNs dan didapatkan nilai selektivitas sebesar 0.56. Penelitian Watson dkk pada tahun 2009 dilakukan penyerapan gas CH₄ dengan (CMS) kemudian didapatkan nilai adsorpsi sebesar 2,5 mmol/gr sedangkan pada penelitian Ko dkk pada tahun 2023 dilakukan penyerapan gas CH₄ dengan biochar kemudian didapatkan nilai adsorpsi sebesar 2 mmol/gr. Berdasarkan hasil penelitian diatas CMS memiliki nilai adsorpsi untuk gas CH₄ lebih tinggi daripada biochar. Oleh karena itu pada penelitian ini isian membran yang digunakan adalah biochar agar gas CH₄ yang memiliki nilai kalor tinggi tidak banyak teradsorpsi.

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu tersebut peneliti akan melakukan penentuan performa membran berbasis polyethersulfone (PES) terdekori biochar terhadap nilai selektivitas CO₂/CH₄ dan karakterisasi membran dengan variasi ketebalan membran menggunakan biochar sebagai filler sehingga diperoleh membran yang memiliki performa tertinggi terhadap nilai selektivitas CO₂/CH₄.

2. Metode Penelitian

Material

N-Methyl-2-Pyrolidone (NMP, ≥99.8%) dan Poly(ether-sulfone) (PES, 99.99%) disubsidikan secara komersil oleh Merck EMSURE. Biochar dari tempurung kelapa dibeli secara komersil dari Indonesia. High purity of Methane (CH₄, 99.995%), dan Carbon dioxide (CO₂, 99.9%) gases disuplai oleh Samator, Indonesia. Botol kaca durant dan magnetic stirrer yang digunakan untuk membuat larutan dope. Kaca sebagai tempat untuk mencetak membran. Bak plastik yang digunakan untuk merendam membran yang telah dicetak. Statif dan klem yang digunakan untuk mengeringkan membran.

1. Pembuatan Membran Polistirine-Biochar

Membran polimer PES dibuat dari larutan dope dengan dilarutkan 17% berat PES ke dalam 83% berat NMP. Selanjutnya dimasukkan secara perlahan biochar dengan konsentrasi 1% terhadap total berat larutan. Larutan ini diaduk selama 24 jam agar polimer larut sempurna ke dalam pelarut. Larutan yang telah disiapkan didiamkan selama 15 menit agar gelembung dari larutan hilang. MMMs (Mixed Matrix Membranes) disintesis dengan dituangkan larutan dope PES + Biochar + NMP pada pelat kaca dengan ketebalan 100, 300, 400, dan 500 µm. Kemudian membran dope yang sudah diletakkan di pelat kaca dimasukkan ke dalam bak yang berisi akuades sampai membran terlepas secara alami dari pelat kaca. Proses ini dilakukan agar membran yang disintesis mengalami proses inversi fasa berupa non solvent induced phase inversion yang dimana larutan dope yang awalnya berbentuk liquid menjadi padat dan pelarut yang ada di membran hilang secara sempurna.

2. Analisis Karakteristik Membran

a. Contact Angle

Pengujian *Contact Angle* dilakukan dengan disiapkan membran berukuran 2x2 cm dan diletakkan pada bidang datar, Selanjutnya ditetaskan 1 tetes air yang sudah dicampur tinta pada permukaan atas membran, Amati tetesan air tinta dengan *macro lens* lalu uji dengan bantuan aplikasi *ImageJ* [9].

b. Porositas

Pengujian porositas dilakukan dengan disiapkan membran berukuran 2x2 cm dan diletakkan di dalam oven / microwave untuk dikeringkan hingga berat dari membran konstan. Selanjutnya membran direndam dalam bak berisi air selama 24 jam. Kemudian dihitung berat dari membran tersebut dan perhitungkan porositas menggunakan persamaan berikut :

$$Porosity (\%) = \frac{W_w - W_d}{d \times A \times \delta} \quad (1)$$

Dimana :

W_w : Berat membran basah (gr)

W_d : Berat membran kering (gr)

d : Ketebalan membran (nm)

A : Luas permukaan membran (m^2)

δ : Densitas air ($1 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-3}$)

[10]

c. Selektivitas Gas

Perhitungan selektivitas gas dilakukan dengan disiapkan membran dengan bentuk O-ring dan dimasukkan dalam gas *chamber reactor*. Single gas masuk dengan tekanan 1, 2, 3, 4, dan 5 bar ke dalam gas *chamber reactor* dan diukur perubahan tekanan yang terjadi dengan bantuan alat digital pressure gauge. Selanjutnya dihitung permeabilitas membran dengan rumus berikut :

$$P = \frac{273 \times 10^{10}}{760} \frac{VL}{AT((p_2 \times 76)/14.7)} \frac{dp}{dt} \quad (2)$$

Nilai dari permeabilitas membran yang didapat selanjutnya digunakan untuk perhitungan nilai selektivitas gas pada membran menggunakan rumus berikut :

$$\alpha_{A/B} = \frac{P_A}{P_B} \quad (3)$$

Dimana :

P : Permeabilitas gas (barrer)

T : Suhu mutlak (K)

A : Luas permukaan membran (cm^2)

$\frac{dp}{dt}$: Laju kenaikan tekanan pada kondisi Steady State ($\text{psia} \cdot \text{s}^{-1}$)

p_2 : Tekanan umpan gas (bar)

V : Downstream volume (cm^3)

L : Ketebalan membran (cm)

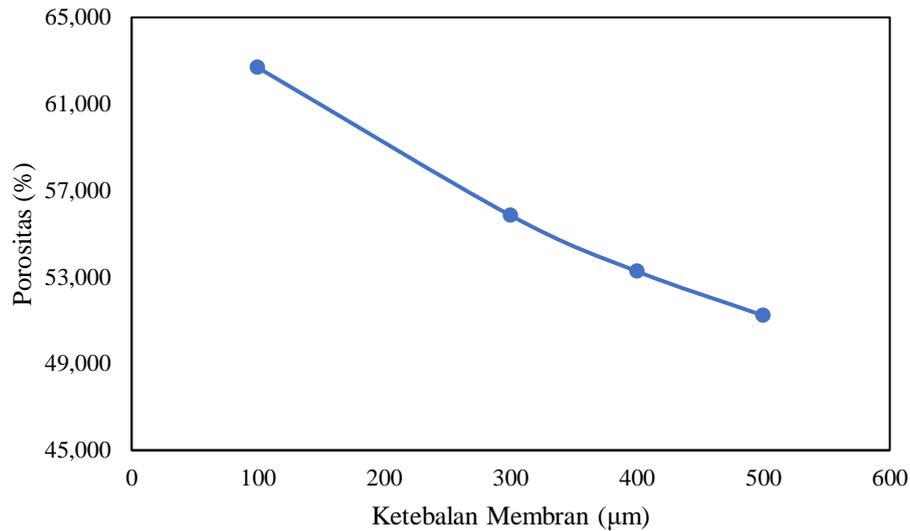
$\alpha_{A/B}$: Selektivitas Gas

[11]

3. Hasil Dan Pembahasan

Hasil Nilai Porositas

Porositas didefinisikan sebagai rasio volume rongga yang dinyatakan sebagai persentase dari total volume suatu objek termasuk komponen padat dan rongga. Berdasarkan hasil uji porositas membran yang telah dilakukan didapatkan data porositas untuk membran PES dengan filler berupa biochar 1% dan ketebalan 100, 300, 400, dan 500 μm seperti grafik di bawah ini.



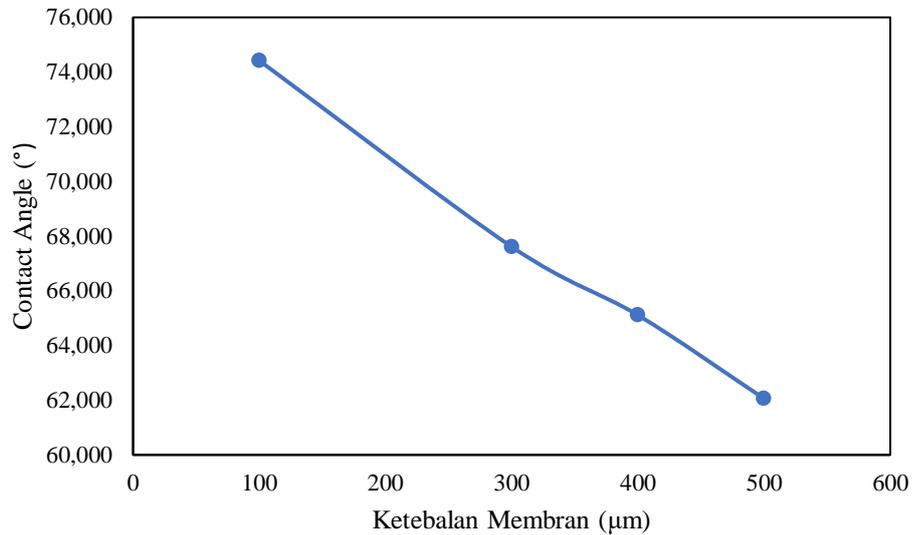
Gambar 1. Grafik Hubungan antara Ketebalan Membran dengan Nilai Porositas

Berdasarkan pada **Gambar 2** didapatkan grafik yang menunjukkan pengaruh konsentrasi biochar dalam membran dan ketebalan membran terhadap nilai porositas. Nilai porositas terbesar didapatkan pada membran dengan ketebalan 100 µm. Sedangkan untuk nilai porositas terkecil didapatkan pada membran dengan ketebalan 500 µm. Hal ini dapat disimpulkan bahwa nilai porositas dari tiap membran memiliki perbedaan nilai yang menunjukkan pori dari setiap membran yang ada memiliki ukuran yang berbeda. Berdasarkan perbedaan nilai porositas tersebut dapat diketahui bahwa semakin bertambahnya ketebalan membran, maka nilai porositas dari suatu membran akan menurun. Melansir dari penelitian yang dilakukan oleh Rezania pada tahun 2019 [10] permeabilitas membran sangat dipengaruhi oleh porositas membran, ketebalan, dan ukuran pori permukaan. Porositas suatu membran yang berarti bahwa ketebalan sublapisan jauh lebih besar daripada kulit lapisan, sebagian besar bergantung pada struktur sublapisan, yang terpengaruh dengan tingkat demixing. Dari penelitian tersebut didapatkan nilai porositas untuk membran PES terendah dan tertinggi secara berturut-turut adalah 52,2 dan 75,7.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Jiang pada tahun 2018 [12] Perubahan morfologi membran dapat diinterpretasikan melalui mekanisme pemisahan fasa selama pengendapan perendaman. Penambahan suatu filler dalam pembuatan larutan dapat meningkatkan ketidakstabilan termodinamika yang dapat mempercepat proses pemisahan fasa. Selain itu viskositas larutan meningkat tajam dengan meningkatnya konsentrasi suatu filler sehingga menyebabkan hambatan kinetik terhadap pemisahan fasa. Ketika hambatan kinetik mengimbangi peningkatan termodinamika terjadi maka akan menyebabkan laju demixing larutan tertunda.

Hasil Nilai Contact Angle

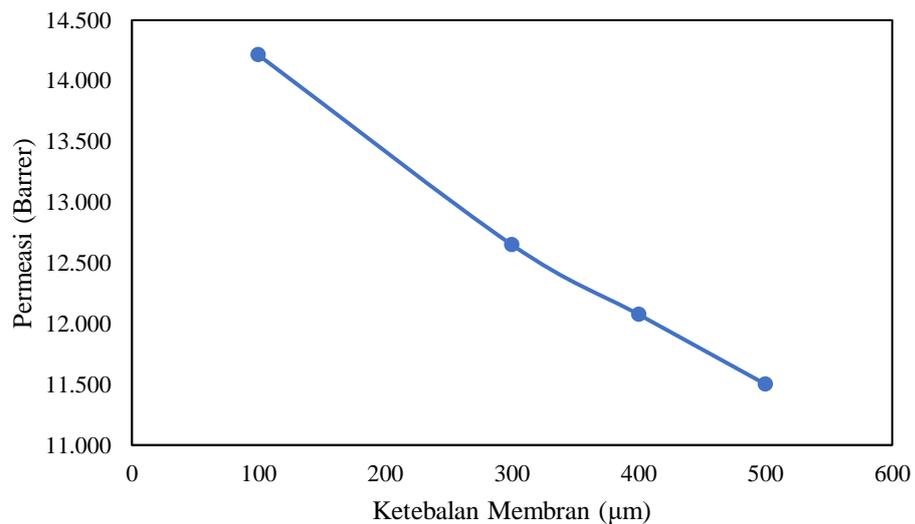
Analisa Contact Angle adalah analisa yang dilakukan untuk mengetahui apakah membran yang diuji bersifat hidrofobik atau hidrofilik. Membran dikatakan hidrofobik jika tetesan air tidak menyebar pada permukaan membran dengan sudut kontak diatas atau mendekati 90°. Sedangkan membran dengan kadar hidrofilik tinggi mempunyai sudut kontak dibawah 90° karena tetesan air yang diberikan dapat teradsorpsi pada permukaan membran. Semakin rendah nilai sudut kontak air maka membran tersebut semakin hidrofilik (Fathanah, U et al., 2020). Berdasarkan hasil uji Contact Angle membran yang telah dilakukan didapatkan data Contact Angle untuk membran PES dengan filler berupa biochar 1% dan ketebalan 100, 300, 400, dan 500 µm seperti grafik di bawah ini.



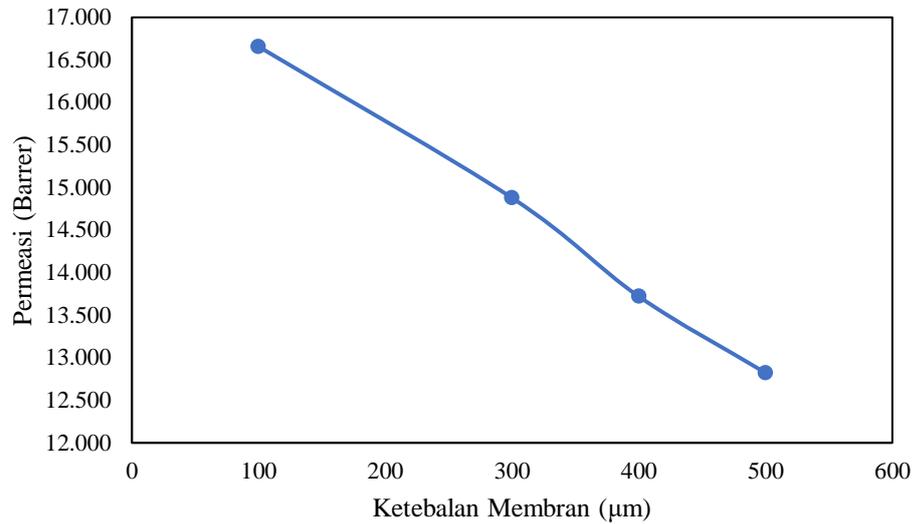
Gambar 2. Grafik Hubungan antara Ketebalan Membran dengan Nilai *Contact Angle*

Berdasarkan pada **Gambar 3** didapatkan grafik yang menunjukkan perbandingan nilai *Contact Angle* terhadap kandungan biochar ketebalan membran 100 µm, 300 µm, 400 µm, dan 500 µm. Hal ini dapat disimpulkan bahwa semakin tebal membran maka akan mempengaruhi nilai dari *Contact Angle* dimana nilai tersebut akan menurun dimana untuk nilai *Contact Angle* terbesar didapatkan pada membran dengan ketebalan sebesar 100 µm. Sedangkan untuk nilai *Contact Angle* terkecil didapatkan pada membran dengan ketebalan sebesar 500 µm. Sehingga dikatakan bahwa hubungan ketebalan membran terhadap *Contact Angle* adalah berbanding terbalik. Nilai *Contact Angle* yang semakin menurun seiring bertambahnya ketebalan memiliki persamaan dengan hasil penelitian Ahmad dkk pada tahun 2019 [13] bahwa dalam penelitian mereka dimana semakin bertambahnya nilai ketebalan dari suatu membran maka nilai *Contact Angle* semakin menurun dari 79.46° menjadi 42.46°.

Hasil Uji Performa Membran



(a)

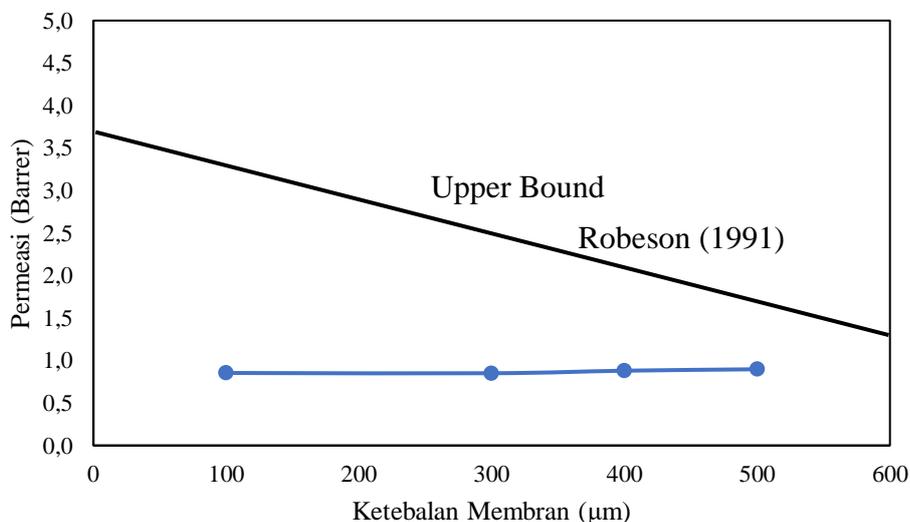


(b)

Gambar 3. (a) Uji Permeasi untuk Gas CO₂ (b) Uji Permeasi untuk Gas CH₄

Berdasarkan pada **Gambar 4** diatas menunjukkan nilai permeasi dari membran PES dengan ketebalan membran yang berbeda diuji pada tekanan 1 bar. Kedua gambar tersebut terlihat bahwa seiring bertambahnya nilai ketebalan dari suatu membran yang diuji maka nilai permeasi dari membran tersebut juga ikut menurun. Pada uji permeasi untuk gas CO₂ didapatkan nilai terbesar yaitu 1,4212.141 barrer pada membran dengan ketebalan membran sebesar 100 µm. Sedangkan untuk nilai terkecil yaitu 11,501.6 barrer didapatkan pada membran dengan ketebalan membran sebesar 500 µm. Kemudian pada uji permeasi untuk gas CH₄ didapatkan nilai terbesar yaitu 16,655.691 barrer pada membran dengan ketebalan membran sebesar 100 µm. Sedangkan untuk nilai terkecil yaitu 12,821.7 barrer didapatkan pada membran dengan ketebalan membran sebesar 500 µm.

Berdasarkan kedua grafik diatas sebanding dengan penelitian yang dilakukan oleh Mohamed dkk pada tahun 2019 [7] dan Mohamed Alaa dkk pada tahun 2019 [8] dimana nilai permeasi gas suatu membran akan menurun seiring bertambahnya nilai ketebalan suatu membran sehingga dapat disebutkan bahwa hubungan nilai permeasi suatu membran berbanding terbalik dengan ketebalan membran. Kemudian berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Pertiwiningrum dkk pada tahun 2018 [2] dimana biochar berhasil menyerap komponen gas CO₂ dalam biogas dengan tujuan menaikkan nilai kalor dari biogas tersebut sehingga dapat dikatakan turunnya nilai permeasi gas CO₂ pada penelitian ini juga dipengaruhi oleh keberadaan biochar sebagai adsorben gas CO₂.



Gambar 4. Uji Selektivitas untuk CO₂/CH₄

Berdasarkan **Gambar 5** menunjukkan hubungan konsentrasi biochar dan ketebalan membran terhadap nilai selektivitas gas CO_2/CH_4 . Pada gambar tersebut terlihat bahwa hubungan nilai selektivitas pada tiap membran meningkat seiring bertambahnya ketebalan membran. Jika dibandingkan dengan garis upper bound nilai selektivitas yang paling mendekati nilai upper bound adalah nilai selektivitas membran dengan ketebalan membran sebesar $500\ \mu\text{m}$ dimana garis upper bound adalah ukuran untuk nilai terbaik dari selektivitas gas suatu membran. Hasil grafik diatas dapat dikatakan sebanding dengan penelitian yang dilakukan Mohammed dkk pada tahun 2019 [7] dan Mohamed Alaa dkk pada tahun 2019 [8] dimana nilai selektivitas gas suatu membran akan meningkat seiring bertambahnya nilai ketebalan suatu membran sehingga dapat disebutkan bahwa hubungan nilai selektivitas suatu membran berbanding lurus dengan ketebalan membran. Berdasarkan nilai selektivitas tertinggi yang didapatkan pada penelitian ini yaitu sebesar 0,897 pada membran dengan ketebalan membran sebesar $500\ \mu\text{m}$, nilai ini memiliki nilai yang lebih tinggi dari nilai selektivitas tertinggi yang didapatkan oleh Mohammed Alaa yaitu sebesar 0,56 dengan filler berupa GNs.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil uji selektivitas gas CO_2/CH_4 terhadap membran yang telah dibuat, nilai selektivitas tertinggi didapatkan oleh membran dengan ketebalan membran sebesar $500\ \mu\text{m}$ dengan nilai selektivitas sebesar 0,897. Penemuan ini menunjukkan bahwa ketebalan membran memainkan peran penting dalam meningkatkan selektivitas membran terhadap gas CO_2/CH_4 . Selain itu, biochar juga terbukti layak digunakan sebagai filler membran karena berada di bawah kurva Robeson. Hal ini menunjukkan bahwa biochar dapat meningkatkan kinerja membran dalam proses pemisahan gas, sehingga memberikan potensi penggunaan yang lebih luas dalam aplikasi industri dan lingkungan.

5. Saran

Melakukan eksplorasi penggunaan filler yang belum pernah dipakai untuk dijadikan variasi yang berbeda dalam peningkatan nilai selektivitas gas CO_2/CH_4

6. Daftar Pustaka

- [1] I. Nur Daiyan, L. Kalsum, dan Y. Bow, "Capturing CO_2 from Biogas by MEA (Monoethanolamine) using Packed Bed Scrubber," *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, vol. 4, no. 2, hlm. 105–112, 2020, [Daring]. Tersedia pada: www.jtkl.polinema.ac.id
- [2] A. Pertiwiningrum, A. W. Harto, M. A. Wuri, dan R. Budiarto, "Assessment of Calorific Value of Biogas after Carbon Dioxide Adsorption Process Using Natural Zeolite and Biochar," *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 9, no. 11, hlm. 327–330, 2018, doi: 10.18178/ijesd.2018.9.11.1123.
- [3] M. Elma, *Proses Pemisahan Menggunakan Teknologi Membran*. Banjarmasin: Lambung Mangkurat University Press, 2016.
- [4] N. Widiastuti, T. Gunawan, H. Fansuri, W. N. W. Salleh, A. F. Ismail, dan N. Sazali, "P84/zcc hollow fiber mixed matrix membrane with pdms coating to enhance air separation performance," *Membranes (Basel)*, vol. 10, no. 267, hlm. 1–14, Okt 2020, doi: 10.3390/membranes10100267.
- [5] C. Casado-Coterillo, "Mixed matrix membranes," *Membranes (Basel)*, vol. 9, no. 11, Nov 2019, doi: 10.3390/membranes9110149.
- [6] N. L. Nurida, "Potensi Pemanfaatan Biochar untuk Rehabilitasi Lahan Kering di Indonesia," *Jurnal Sumberdaya Lahan Edisi Khusus*, hlm. 57–68, 2014.
- [7] M. J. B. G. Mohamed dkk., "Composite mixed matrix membranes incorporating microporous carbon molecular sieve as filler in polyethersulfone for CO_2/CH_4 separation," *J Appl Polym Sci*, vol. 137, no. 12, Mar 2020, doi: 10.1002/app.48476.
- [8] A. Mohamed, S. Yousef, A. Tonkonogovas, V. Makarevicius, dan A. Stankevičius, "High performance of PES-GNs MMMs for gas separation and selectivity," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 15, no. 2, Feb 2022, doi: 10.1016/j.arabjc.2021.103565.
- [9] U. Fathanah, I. Machdar, M. Riza, N. Arahman, M. R. Lubis, dan M. Yusuf, "The Improvement of Hydrophilic Property of Polyethersulfone Membrane with Chitosan as Additive," *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, vol. 15, no. 1, hlm. 53–61, Mar 2020, doi: 10.23955/rkl.v15i1.15916.
- [10] H. Rezanian, V. Vatanpour, A. Arabpour, A. Shockravi, dan M. Ehsani, "Structural manipulation of PES constituents to prepare advanced alternative polymer for ultrafiltration membrane," *J Appl Polym Sci*, vol. 137, no. 20, Mei 2020, doi: 10.1002/app.48690.

-
- [11] D. Wu, B. Zhang, J. Yuan, dan C. Yi, “Structural engineering on 6FDA-Durene based polyimide membranes for highly selective gas separation,” *Sep Purif Technol*, vol. 316, Jul 2023, doi: 10.1016/j.seppur.2023.123786.
- [12] B. Jiang *dkk.*, “Deep eutectic solvent as novel additive for PES membrane with improved performance,” *Sep Purif Technol*, vol. 194, hlm. 239–248, Apr 2018, doi: 10.1016/j.seppur.2017.11.036.
- [13] A. L. Ahmad, N. F. Shoparwe, dan N. H. E. Hanifa, “Equilibrium and kinetic study of bovine serum albumin (BSA) adsorption onto fabricated polyethersulfone (PES)/hydroxyapatite (HAP) adsorptive mixed matrix membrane (MMM),” *Journal of Physical Science*, vol. 30, hlm. 43–63, 2019, doi: 10.21315/jps2019.30.s1.3.