

## PERMEASI GAS KARBON DIOKSIDA DENGAN MEMBRAN KOMPOSIT SELULOSA ASETAT SERAT RAMI/ZEOLIT ALAM

Haryono\*, Solihudin, E. Evy Ernawati\*

Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran, Jl. Ir. Soekarno Km. 21, Jatinangor, Sumedang, Jawa Barat

\*Email korespondensi: haryono@unpad.ac.id; evyerna\_p@yahoo.com

### ABSTRAK

Tanaman rami merupakan penghasil serat potensial. Serat rami memiliki karakteristik panjang dan kuat sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber selulosa yang unggul. Salah satu pemanfaatan selulosa rami tersebut adalah sebagai bahan baku pada pembuatan membran selulosa asetat (SA). Membran SA dapat digunakan dalam pemisahan gas karbon dioksida. Namun karena kemampuan permeabilitasnya rendah, maka membran SA perlu untuk dimodifikasi. Tujuan penelitian ini mensintesis membran komposit SA serat rami/zeolit alam, dan mengkarakterisasinya berdasarkan nilai permeabilitas membran terhadap gas karbon dioksida. Metode penelitian meliputi asetilasi terhadap selulosa dari serat rami, pengkompositan SA dengan zeolit alam dengan metode inversi fase, peningkatan karakteristik membran komposit dengan metode *annealing* pada variasi suhu 60, 70, 80, dan 90 °C, dan uji permeasi membran komposit SA/zeolit alam yang telah dihasilkan terhadap gas karbon dioksida. Hasil penelitian menunjukkan bahwa membran komposit SA/zeolit alam tersebut memiliki nilai permeabilitas terhadap gas karbon dioksida tertinggi sebesar 118,15 barrer, ketika tahap *annealing* dilakukan pada suhu 70 °C.

**Kata kunci:** Karbon dioksida; Komposit; Permeasi gas; Selulosa rami; Zeolit alam

## PENDAHULUAN

Rami atau *China grass* tergolong dalam kelompok serat batang karena menghasilkan serat dari kulit kayunya (Maideliza et al., 2017), dengan kandungan selulosa sebesar 72–97%, serta memiliki kemampuan daya tarik, panjang, dan diameter serat paling tinggi dibandingkan dengan serat lainnya (Novarini & Sukardan, 2015). Selulosa dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan (Rehman et al., 2019), salah satunya sebagai bahan baku dalam sintesis selulosa asetat (SA). SA telah umum digunakan sebagai material membran, karena mudah diperoleh, ramah lingkungan, dan bersifat hidrofilik (Ernawati et al., 2023).

Membran SA termasuk ke dalam membran rapat yang memiliki sifat hidrofilik untuk memisahkan gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), karena struktur kimia SA memiliki gugus hidroksil dan karboksil pada bagian polisakarida, sehingga SA dapat berinteraksi dengan CO<sub>2</sub> (Sanaeepur et al., 2019). Salah satu aplikasi proses pemisahan gas CO<sub>2</sub> adalah pada pemurnian gas alam dan biogas dari gas CO<sub>2</sub>. Keberadaan gas CO<sub>2</sub> di dalam gas alam dan biogas dapat menghambat pembakaran dan dapat menyebabkan korosi pada pipa-pipa penyaluran gas yang terbuat dari bahan logam.

Membran SA, walaupun umum digunakan, namun memiliki kelemahan pada kemampuan permeabilitasnya dan strukturnya yang rapuh (Sanaeepur et al., 2019). Beberapa peneliti telah mencoba mengatasi kelemahan dari membran SA. Penambahan zat aditif berupa zeolit pada membran SA telah dilakukan untuk memperbaiki sifat fisik dan mekaniknya (Ernawati, 2014). Penambahan zeolit alam Lampung terbukti mampu meningkatkan kerapatan pori dan mengubah kepolaran dari membran SA (Ernawati, 2014). Selain dengan penambahan zat aditif, perlakuan termal *annealing* terhadap membran SA akan berpengaruh terhadap struktur ikatan hidrogen pada membran, sehingga mengurangi *free volume* dan dan merapatkan membran (Supriyadi dkk., 2013; Sanaeepur et al., 2014). Tujuan dari penelitian ini adalah mempelajari pengaruh suhu *annealing* pada sintesis membran komposit SA dari serat rami dengan zeolit alam Lampung (SA/ZAL) terhadap kemampuan membran dalam memisahkan gas CO<sub>2</sub> (permeabilitas gas) berdasarkan metode permeasi gas.

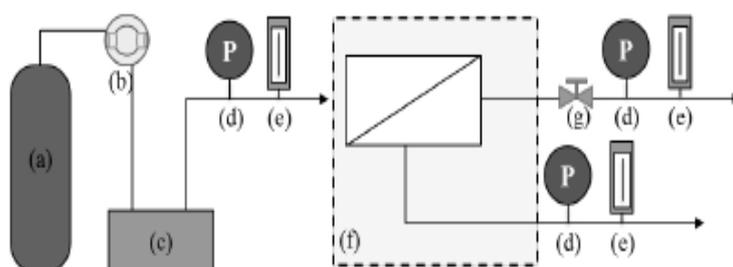
## METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dalam 4 tahap, yaitu: asetilasi selulosa dari serat rami, sintesis membran komposit SA/ZAL, *annealing* terhadap membran komposit SA/ZAL, dan karakterisasi kinerja membran.

Prosedur penelitian dimulai dengan tahap asetilasi selulosa untuk diperoleh SA sebagai bahan baku pembuatan membran. Selulosa dari serat rami, diperoleh dari Laboratorium Mikrobiologi Departemen Biologi Universitas Padjadjaran, sebanyak 5 g ditambahkan ke dalam 125 mL asam asetat glasial (Merck Millipore), diaduk selama 30 menit untuk mengaktivasi selulosa. Selanjutnya 0,8 mL asam sulfat (p.a., Sigma-aldrich) dan 45 mL asam asetat glasial (Merck Millipore) ditambahkan, lalu diaduk selama 25 menit. Kemudian 75 mL asam anhidrida (99,5%, Sigma-aldrich) ditambahkan dan diaduk dengan kecepatan 50 rpm selama 30 menit dengan *magnetic stirrer* pada suhu ruang. Campuran tersebut didiamkan selama 14 jam, kemudian dipindahkan ke dalam corong pisah. Campuran diteteskan pada akuades yang terdapat di dalam gelas kimia, sambil diaduk dengan *magnetic stirrer* (50 rpm). Setelah itu, larutan SA di dalam gelas kimia didinginkan selama 30 menit, lalu disaring dan dicuci dengan akuades sampai pH netral. Residu yang dihasilkan (tertahan di kertas saring) dikeringkan di dalam oven pada suhu 50 °C selama 24 jam. SA dari tahap pengeringan, setelah didinginkan di dalam desikator sampai suhu ruang, ditimbang, ditentukan derajat deasetilasi, dan dihitung rendemennya. Derajat deasetilasi ditentukan berdasarkan prosedur menurut Rodriguez et al. (2008).

SA kemudian dikompositkan dengan zeolit alam menurut prosedur dari Ernawati (2014). SA sebanyak 10% (b/v) dilarutkan di dalam metilen klorida (p.a., Merck Millipore). Kemudian zeolit alam Lampung (ZAL) dengan massa 10% dari selulosa asetat dimasukkan secara bertahap ke dalam larutan SA sambil diaduk selama 24 jam. Selanjutnya campuran SA dan ZAL didinginkan di dalam lemari pendingin pada suhu 10 °C selama 24 jam untuk menghilangkan gelembung (*debubbling*). Produk dari *debubbling* dicetak di atas plat kaca. Membran pada plat kaca disimpan di dalam desikator selama 24 jam pada suhu ruang.

Membran SA/ZAL dari tahap sintesis membran ditingkatkan karakteristiknya dengan pemanasan di dalam oven. Pemanasan terhadap membran SA/ZAL dilakukan pada variasi suhu 60, 70, 80, dan 90 °C selama 10 menit. Kemudian membran didinginkan di dalam desikator selama kurang lebih 60 menit (Supriyadi dkk., 2013). Pada tahap terakhir, untuk mempelajari dampak dari pengkompositan SA dengan ZAL dan *annealing* terhadap kinerja membran SA/ZAL sebagai material pemisah gas CO<sub>2</sub>, dilakukan uji kinerja dengan metode permeasi. Membran SA/ZAL dibentuk lingkaran dengan dengan diameter ±5,56 cm (luas area efektif), lalu dimasukkan ke dalam modul (perangkat) uji. Gas CO<sub>2</sub> dialirkan melalui membran, dan dibiarkan terjadi kontak antara membran dengan gas CO<sub>2</sub> selama 5 menit agar alat uji permeasi gas sesuai dengan kondisi gas. Selanjutnya dilakukan permeasi gas CO<sub>2</sub> oleh membran SA/ZAL dengan mengalirkan gas sampai melalui (menembus) membran. Volume gas yang melewati membran diukur dengan *bubble flowmeter* dalam interval waktu 0 sampai 30 menit. Data volume gas yang melewati membran tersebut kemudian dialurkan pada grafik yang menghubungkan nilai  $V/AP_1$  ( $V$  = volume gas melewati membran, dalam cm<sup>3</sup>;  $A$  = luas membran, dalam mm<sup>2</sup>; dan  $P_1$  = tekanan umpan, dalam cmHg) terhadap waktu. Grafik tersebut digunakan sebagai indikator untuk menentukan kondisi *steady state* pada proses permeasi (ditunjukkan oleh garis lurus konstan). Gradien atau *slope* dari garis lurus tersebut merupakan nilai dari  $P/l$  ( $P$  = permeabilitas membran, dan  $l$  = ketebalan membran). Oleh karena itu, akhirnya nilai permeabilitas dari membran SA/ZAL dapat dihitung. Rangkaian alat uji permeasi gas ditampilkan pada Gambar 1 (Jeon & Shin, 2017).



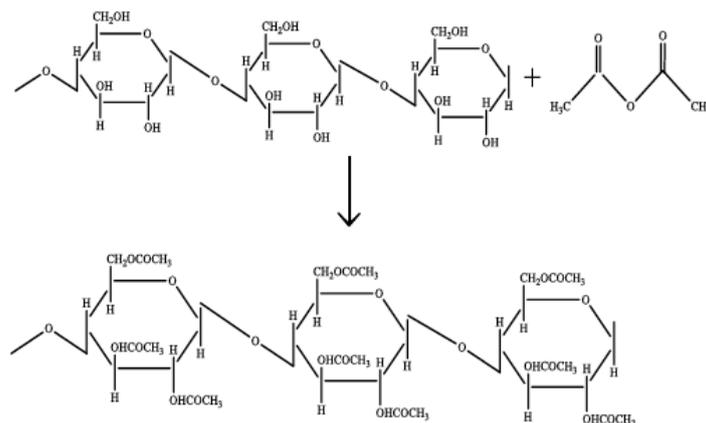
Gambar 1. Rangkaian alat uji permeasi gas: (a) tangki penampung gas CO<sub>2</sub>, (b) regulator gas, (c) termostat, (d) pengukur tekanan, (e) *flow meter*, (f) modul membran, (g) katup pengatur

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Selulosa Asetat (SA) dari Serat Rami

Pada tahap sintesis SA dari selulosa rami di penelitian ini dihasilkan SA dengan kadar asetil sebesar 41,93%, sehingga tergolong sebagai selulosa diasetat. Gaol (2013) menyatakan bahwa SA dengan kadar asetil sebesar 35,0–45,3% merupakan selulosa diasetat. SA dalam golongan selulosa diasetat dapat digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan membran. Pembentukan SA dengan golongan selulosa diasetat tersebut diakibatkan oleh beberapa faktor selama reaksi asetilasi. Lama reaksi asetilasi selama 14 jam berdasarkan prosedur menurut

Meireles et al. (2010) merupakan waktu optimal pada tahap asetilasi selulosa rami untuk dihasilkan selulosa diasetat sebagai bahan baku pembuatan membran. Jika waktu reaksi asetilasi berlangsung lebih lama maka kandungan asetil yang dimiliki akan semakin berkurang karena selulosa asetat terdegradasi (Gaol, 2013). Selanjutnya, suhu reaksi asetilasi dipertahankan pada suhu ruang ( $\pm 25$  °C) agar mencegah terjadinya degradasi selulosa dan selulosa asetat. Reaksi pembentukan SA dari selulosa dan asetat anhidrat ditampilkan pada Gambar 2 (Heinze & Liebert, 2004).



Gambar 2. Reaksi antara selulosa dan asetat anhidrat pada pembentukan SA

### Membran Komposit SA/ZAL dari Tahap Sintesis dan *Annealing*

Pengkompositan SA dengan ZAL dan dilanjutkan dengan *annealing* sebagai material membran dimaksudkan agar membran memiliki karakteristik lebih baik, antara lain adalah membran menjadi lebih rapat dan meningkat hidrofilitasnya (lebih polar). Ernawati (2014) menyatakan bahwa partikel-partikel zeolit yang dikompositkan dengan SA dapat mengisi volume bebas dan tersebar pada matriks membran, akibatnya membran akan semakin rapat.

Pada tahap *annealing* terhadap membran SA/ZAL, perlakuan pemanasan menyebabkan pergerakan molekul dari rantai polimer SA menjadi lebih mudah sehingga mempengaruhi struktur morfologi dan *free volume* pada membran yang dihasilkan. Semakin sedikit jumlah *free volume* pada membran berakibat pada semakin kecil pori atau rongga yang terbentuk, sehingga membran semakin rapat (Supriyadi, 2013).

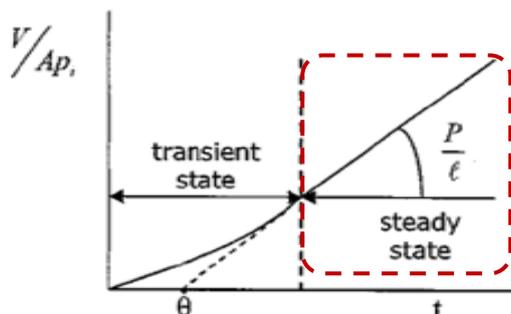
Pada penelitian ini, dampak dari pengkompositan membran SA dengan ZAL dan perlakuan *annealing* belum diverifikasi berdasarkan karakteristik terkait dari membran, seperti uji morfologi permukaan, hidrofilisitas, kuat Tarik, dan kuat tekan. Namun baru sebatas pembuktian dampaknya terhadap kinerja membran, berdasarkan parameter permeabilitas gas CO<sub>2</sub>.

### Uji Kinerja Permeasi Membran Komposit SA/ZAL terhadap Gas Karbon Dioksida

Uji permeasi membran komposit SA/ZAL terhadap gas karbon dioksida dilakukan untuk menentukan nilai permeabilitas membran terhadap gas karbon dioksida. Permeabilitas gas dari membran merupakan parameter sebagai indikator kemudahan atau sulitnya atom atau molekul gas dalam melewati membran tanpa bereaksi dengan material membran dalam kondisi *steady state* (Shelby et al., 2009). Nilai permeabilitas dari membran semakin tinggi berarti membran tersebut semakin mudah dilewati oleh gas sebagai dampak dari semakin intensif dan selektifnya interaksi, karena kemiripan polaritas, antara bahan membran dan gas.

Pada uji penentuan permeabilitas membran terhadap suatu gas, nilai permeabilitas (P) dihitung berdasarkan nilai *slope* dari garis lurus dari hasil pengaluran nilai-nilai  $V/AP_1$  sebagai

fungsi waktu. Secara umum, penentuan nilai P secara grafis diilustrasikan pada Gambar 3. Data penelitian, sebagai salah contoh digunakan pengujian permeabilitas terhadap membran komposit SA/ZAL dari *annealing* pada suhu 60 °C, ditampilkan pada Tabel 1.



Gambar 3. Grafik penentuan nilai permeabilitas gas pada membran

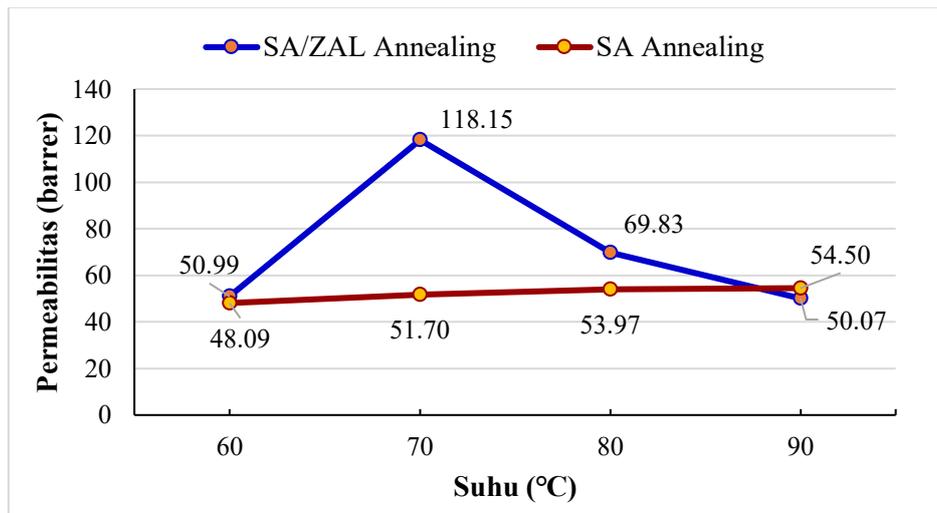
Tabel 1. Contoh data hasil uji permeabilitas membran komposit SA/ZAL

t (detik)	V (cm <sup>3</sup> )	V/AP × 10 <sup>3</sup> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-2</sup> cmHg <sup>-1</sup> )	Data permeasi
0,0	7,0	0,9617	
60,0	7,2	0,9892	
120,0	8,0	1,0991	Tekanan CO <sub>2</sub> umpan
180,0	8,8	1,2090	(P <sub>1</sub> ) = 4 bar
240,0	10,0	1,3739	Luas membran (A) =
300,0	11,1	1,5250	24,2617 cm <sup>2</sup>
600,0	12,0	1,6486	Ketebalan membran (l) =
900,0	12,9	1,7723	0,128 mm
1200,0	13,8	1,8959	
1500,0	15,0	2,0608	
1800,0	15,3	2,1020	

Keterangan: V/AP × 10<sup>3</sup> = 2,1020, artinya: V/AP = 2,1020 × 10<sup>-3</sup>

Pengaruh variasi suhu *annealing* pada membran SA dengan dan tanpa penambahan ZAL ditunjukkan pada Gambar 4. Permeabilitas gas CO<sub>2</sub> pada membran SA tanpa dikompositkan dengan ZAL mengalami peningkatan secara konsisten seiring dengan peningkatan suhu *annealing*, dengan nilai permeabilitas 48,09 sampai 54,50 barrer. Sedangkan pada membran komposit SA/ZAL, nilai permeabilitas CO<sub>2</sub> mengalami peningkatan pada suhu *annealing* 60 dan 70 °C, berturut-turut sebesar 50,9 dan 118,15 barrer. Namun nilai permeabilitas membran kemudian mengalami penurunan seiring dengan peningkatan suhu *annealing* (80 dan 90 °C). Nilai permeabilitas membran komposit SA/ZAL terhadap gas CO<sub>2</sub> dari suhu *annealing* 80 °C adalah sebesar 69,89 barrer, kemudian menjadi 50,07 barrer di suhu *annealing* 90 °C. Bahkan membran komposit SA/ZAL dari suhu *annealing* 90 °C memiliki nilai permeabilitas terhadap CO<sub>2</sub> paling rendah.

Secara umum, nilai permeabilitas terhadap gas CO<sub>2</sub> dari membran SA meningkat setelah dikompositkan dengan ZAL pada semua perlakuan suhu *annealing*. Peningkatan nilai permeabilitas tersebut disebabkan oleh karakteristik ZAL yang selektif terhadap gas CO<sub>2</sub>, sehingga meningkatkan interaksi permukaan membran SA setelah dikompositkan (Dorosti et al., 2015).



Gambar 3. Permeabilitas membran terhadap gas CO<sub>2</sub> dari membran SA/ZAL *annealing* dan SA *annealing*

Pada membran SA tanpa pengkompositan, nilai permeabilitas terhadap CO<sub>2</sub> dari membran meningkat secara konsisten dengan dinaikannya suhu *annealing*. Fakta tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan suhu *annealing* menyebabkan penurunan *free volume* pada matrik polimer dari SA, sehingga permeabilitas SA terhadap gas CO<sub>2</sub> akan meningkat (Li et al., 2013). *Free volume* membran merupakan rongga pada membran yang tidak ditempati oleh molekul membran itu sendiri, sehingga bersifat tidak selektif terhadap spesi kimia target pemisahan, baik dengan mekanisme difusi maupun permeasi (Tao et al., 2023).

Temuan pada penelitian ini terkait peningkatan suhu *annealing* sampai pada suhu tertentu mengakibatkan penurunan nilai permeabilitas dari membran komposit, relatif bersesuaian dengan hasil penelitian dari Sanaeepur et al. (2014). Penurunan nilai permeabilitas dari membran pada suhu *annealing* tertentu, salah satunya disebabkan oleh lebih padat dan kerasnya matrik polimer, sehingga mengurangi ruang gerak bagi molekul (Abdel-Hai et al., 2024). Keberadaan zat aditif pada membran, misalnya ZAL, pada suhu *annealing* yang lebih tinggi diduga berkontribusi dominan dalam peningkatan kepadatan dan kekerasan matrik polimer.

Nilai permeabilitas dari membran terhadap gas CO<sub>2</sub> dapat dijadikan acuan dalam menentukan kinerja pemurnian campuran gas yang mengandung pengotor CO<sub>2</sub>, seperti pada gas alam. Jika gas alam diasumsikan hanya tersusun dari metana (CH<sub>4</sub>) dan CO<sub>2</sub>, selektifitas membran terhadap CO<sub>2</sub> dirumuskan sebagai rasio antara permeabilitas CO<sub>2</sub> terhadap CH<sub>4</sub>. Oleh karena itu, membran dengan permeabilitas terhadap CO<sub>2</sub> yang tinggi, akan memiliki kemampuan memisahkan atau mem-permeasi CO<sub>2</sub> dari gas alam yang tinggi juga.

Nilai permeabilitas (P) dari membran terhadap gas pada penelitian ini dinyatakan dalam satuan barrer. Jika didasarkan pada satuan dari semua parameter yang terlibat pada penentuan nilai P secara grafis (Gambar 3), nilai P akan memiliki satuan cm<sup>3</sup> cm<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> cmHg<sup>-1</sup>. Sedangkan barrer, sebagai satuan lainnya dari permeabilitas gas yang digunakan pada penelitian ini, memiliki nilai konversi, 1 barrer = 10<sup>-10</sup> cm<sup>3</sup> cm<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> cmHg<sup>-1</sup> (Tepljakov et al., 2003).

## KESIMPULAN

Membran SA dan komposit SA/ZAL berhasil disintesis dengan bahan baku selulosa dari serat tanaman rami. Pengkompositan SA dengan ZAL terbukti mampu meningkatkan permeabilitas material membran terhadap gas CO<sub>2</sub>.

Suhu *annealing* terhadap membran SA dan komposit SA/ZAL mempengaruhi kinerja membran dalam permeasi gas CO<sub>2</sub>. Permeabilitas membran SA terhadap gas CO<sub>2</sub> meningkat secara konsisten seiring dengan peningkatan suhu *annealing*. Namun pada membran komposit SA/ZAL, peningkatan permeabilitas membran terhadap gas CO<sub>2</sub> hanya terjadi dari suhu *annealing* 60 ke 70 °C, kemudian nilai permeabilitasnya mengalami penurunan seiring dengan naiknya suhu *annealing*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Hai, S. I., El-Tonsy, M. M., & El-Henawey, M. I. (2024). Investigations for the heat treatment effects on permeability of some semi-permeable membranes. *Physica Scripta*, 99, 095901. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad669a>
- Dorosti, F., Omidkhah, M., & Abedini, R. (2015). Enhanced CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> separation properties of asymmetric mixed matrix membrane by incorporating nano-porous ZSM-5 and MIL-53 particles into Matrimid® 5218. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 25, 88-102.
- Ernawati, E., Christine, A. F., Haryono, Julaeha, E., Deawati, Y., Noviyanti, A. R., & Ishmayana, S. (2023). The effect of glutaraldehyde concentration and immersion duration on cellulose acetate/chitosan composite membrane crosslinking and its application for ethanol/water pervaporation. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 24(6), 736-746.
- Ernawati, E. (2014). Pembuatan membran selulosa asetat termodifikasi zeolit alam Lampung untuk pemisahan etanol-air secara pervaporasi. *Journal Chimica et Natura Acta*, 2(1), 101-104.
- Gaol, R. (2013). Pembuatan selulosa asetat dari α-selulosa tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 2(3), 33-39.
- Heinze, T. & Liebert, T. (2004). Chemical characteristics of cellulose acetate. *Macromolecular Symposia*, 208, 167-237.
- Jeon, W. J. & Shin, M. S. (2017). Separation of biogas using newly prepared cellulose acetate hollow fiber membranes. *Energy Procedia*, 14(23), 3282–3287.
- Li, T., Pan, Y., Peinemann, K. V., & Lai, Z. (2013). Carbon dioxide selective mixed matrix composite membrane containing ZIF-7 nano-filler. *Journal of Membrane Science*, 425-426, 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.09.006>
- Meideliza, T., R. Mayerni, & Rezki, D. (2017). Comparative study of length and growth rate of ramie (*Boehmeria nivea* L. Gaud) bast fiber of Indonesian clones. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 6(1), 2273-2278. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.7.6.1335>
- Meireles, C., Filho, G. R., Ferreira, M. F., & Cerqueira, D. A. (2010). Characterization of asymmetric membranes of cellulose acetate from biomass: Newspaper and mango seed. *Carbohydrate Polymers*, 80, 954-961.
- Novarini, E. & Sukardan, M. D. (2015), Potensi serat rami (*Boehmeria nivea*) sebagai bahan baku industri tekstil dan produk Tekstil. *Arena Tekstil*, 50(2), 113-122.
- Rehman, M. M., Zeeshan, M., Shaker, K., & Nawab, Y. (2019). Effect of micro-crystalline cellulose particles on mechanical properties of alkaline treated jute fabric reinforced green epoxy composite. *Cellulose*, 26(17), 9057–9069. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02679-4>
- Rodrigues, G., Santos, D., Meireles, S., Maria, R., & Assunc, N. D. (2008). Synthesis and characterization of cellulose acetate produced from recycled newspaper. *Carbohydrate Polymer*, 73, 74-82.

- Sanaeepur, H., Ahmadi, R., Sinaei, M., & Kalgari, A. (2019). Pebax-modified cellulose acetate membrane for CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> separation. *Journal of Membrane Science*, 5, 25-32. <https://doi.org/10.22079/jmsr.2018.85813.1190>
- Sanaeepur, H., Nasernejad, B., & Kalgari, A. (2014). Cellulose acetate/nano-porous zeolite mixed matrix membrane for CO<sub>2</sub> separation. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 5(4), 1-14. <http://dx.doi.org/10.1002/ghg.1478>
- Shelby, J. E., Raszewski, F. C., & Hall, M. M. (2009). Fuels – Hydrogen storage. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 488-492. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00334-8>
- Supriyadi, J., Cahya Hakika, D., & Tutuk, K. (2013). Peningkatan kinerja membran selulosa asetat untuk pengolahan air payau dengan modifikasi penambahan aditif dan pemanasan. *Teknologi Kimia dan Industri*, 2(3), 96-108.
- Tao, L., He, J., Arbaugh, T., McCutcheon, J. R., & Li, Y. (2023). Machine learning prediction on the fractional free volume of polymer membranes. *Journal of Membrane Science*, 665. 121131. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121131>
- Tepliyakov, V. V., Roizard, D., Favre, E., & Khotimsky, V. S. (2003). Investigations on the peculiar permeation properties of volatile organic compounds and permanent gases through PTMSP. *Journal of Membrane Science*, 220(Issue 1–2), 165-175. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(03\)00229-1](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(03)00229-1)