

Penyisihan Metilen Biru Menggunakan Membran Komposit Polisulfon/Zeolit

Removal of Methylene Blue using Polysulfone/Zeolite Composite Membrane

Wahyu Fiqih Virdiansyah, Susianto, Siti Nurkhamidah*

Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

Artikel histori :

Diterima 1 Juni 2024
Diterima dalam revisi 22 Juni 2024
Diterima 24 Juni 2024
Online 8 Agustus 2024

ABSTRAK: Industri tekstil menghasilkan limbah cair dengan kandungan zat warna sekitar 40%. Metilen biru adalah zat warna yang dapat berdampak pada terganggunya ekosistem perairan dan kesehatan manusia karena bersifat karsinogenik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan zeolit pada membran polisulfon (PSF) terhadap kinerja membran dalam penyisihan metilen biru. Metode pembuatan membran menggunakan metode inversi fasa dengan N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) sebagai solvent dan akuades sebagai nonsolvent. Karakterisasi membran berdasarkan uji SEM-EDX, menunjukkan zeolit terdeposit pada permukaan membran secara merata. Pada penyisihan metilen biru didapatkan permeabilitas lebih rendah dengan menggunakan zeolit dibanding yang tidak menggunakan zeolit. Sedangkan rejeksi membran PSF dengan zeolit lebih tinggi daripada membran PSF tanpa zeolit. Rejeksi membran PSF dengan zeolit didapatkan hasil hingga 93%.

Kata Kunci: inversi fasa; membran; polisulfon; zeolit

ABSTRACT: The textile industry produces liquid waste with a dye content of around 40%. Methylene blue is a dye that can have an impact on disrupting aquatic ecosystems and human health because it is carcinogenic. This research aims to determine the effect of adding zeolite to polysulfone (PSF) membranes on membrane performance in removing methylene blue. The membrane manufacturing method uses the phase inversion method with N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) as the solvent and distilled water as the nonsolvent. Membrane characterization based on the SEM-EDX test shows that zeolite is deposited on the membrane surface evenly. In removing methylene blue, it was found that permeability was lower when using zeolite than when not using zeolite. Meanwhile, the rejection of PSF membranes with zeolite is higher than PSF membranes without zeolite. Rejection of PSF membranes with zeolite yields up to 93%.

Keywords: phase inverse; membrane; polysulfone; zeolite

1. Pendahuluan

Limbah cair yang berasal dari sektor tekstil adalah faktor utama yang menyebabkan polusi air di lingkungan. Hal ini disebabkan oleh limbah kimia yang dihasilkan selama proses produksi tekstil. Proses penununan pada industri tekstil adalah langkah untuk menyusun benang menjadi kain yang selanjutnya akan melalui proses pencelupan untuk meningkatkan nilai komersialisasi. Pada proses pencelupan ini, sekitar 40% zat warna reaktif dapat terbuang ke lingkungan (Sastrawidana dan Rachmawati, 2016). Sebanyak 60% - 70% zat warna azo yang memiliki gugus benzena pada limbah cair industri tekstil tidak dapat

didegradasi (Wijaya, et al., 2006). Tingkat kepekatan zat warna pada limbah industri tekstil dapat mengganggu ekosistem seperti menghambat masuknya sinar matahari, mengganggu proses fotosintesis, dan mengurangi kadar oksigen bagi biota air (Purnama et al., 2024). Oleh karena itu, perlu dilakukan pengolahan limbah cair dari industri tekstil.

Proses pemisahan menggunakan teknologi membran terjadi karena membran memiliki sifat selektivitas yang memungkinkan untuk memisahkan partikel dalam suatu campuran. Selektivitas merupakan kemampuan membran untuk memisahkan partikel tertentu pada suatu campuran sehingga partikel tertentu yang akan tertahan pada membran

* Corresponding author
Email address: nurkhamidah@its.ac.id

atau partikel tertentu saja yang dapat melewati membran. Partikel yang lebih besar dari pori membran akan terperangkap di permukaan membran, sedangkan partikel yang lebih kecil akan mampu melewati pori membran dengan mudah (Kesting, 2000). Terdapat dua istilah pada proses pemisahan membran yaitu umpan (*feed*) dan permeat. Umpan adalah campuran yang ingin dipisahkan yang akan diumpankan menuju membran. Sedangkan permeat adalah hasil dari proses filtrasi yang biasanya berisi partikel spesifik yang dapat melewati membran (Pratomo, 2003). Proses pemisahan dengan membran didorong oleh adanya gaya dorong, yang terjadi karena adanya gradien pada sisi membran yang berlawanan. Gaya dorong ini umumnya dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu dorongan tekanan (*pressure driven*) dan dorongan non-tekanan (*nonpressure driven*). Pada membran yang didorong oleh tekanan, gaya dorong berasal dari perbedaan tekanan di kedua sisi membran. Sementara pada membran *non-pressure driven*, gaya dorong berasal dari gradien suhu, gradien konsentrasi, atau potensial listrik (Madsen, 2014).

Zeolit telah menerima banyak perhatian dalam fabrikasi membran karena ketersediaannya, biaya rendah, dan fungsionalitas tinggi (tersedia dari grup Si–O–Al dan –OH) (Kotoulas et al, 2019). Menariknya, membran berbasis zeolit memiliki adsorpsi yang sangat baik terhadap ion logam (Castañeda dan Medina, 2017). Namun, zeolit juga dikaitkan dengan beberapa kelemahan, karena tidak dapat langsung digunakan dalam aplikasi pengolahan air karena ukuran partikelnya yang kecil (Zheng et al, 2011). Di sisi lain, Polysulfone (PSF) adalah polimer yang banyak digunakan dalam banyak aplikasi sebagai hasil dari kekakuan yang tinggi, ketahanan creep, kondisi termal yang baik, dan stabilitas (Shokri et al. 2017). Namun, penggunaan PSF untuk larutan berair dibatasi karena hidrofobitasnya. Namun demikian, dapat ditingkatkan dengan modifikasi melalui pencampuran dengan bahan hidrofilik seperti Polietilen Glikol (PEG).

Penambahan zeolit pada membran dapat meningkatkan fluks dan rejeksinya (Dong et al, 2016). Selain itu pada penelitian Dong et al (2015), zeolit adalah salah satu nanopartikel yang dapat menempel pada permukaan membran hingga 49% daripada nanopartikel lain yang memiliki rasio yang lebih rendah. Zeolit yang ditanamkan pada membran dapat meningkatkan roughness dan hidrofilitas membran. Oleh karena itu, dilakukan upaya untuk memadukan PSF dengan zeolit untuk meningkatkan kinerja membran modifikasi PSF dalam hal fungsionalitas dan permeabilitas air. Namun hingga saat ini belum ada penelitian yang pernah dilakukan untuk diuji dengan zat warna metilen biru.

2. Metode Penelitian

2.1 Alat dan Bahan

Support membran yang digunakan dalam penelitian ini adalah polisulfon (PSF) yang didapatkan dari Sigma Aldrich. Polietilen Glikol (PEG) digunakan untuk meningkatkan hidrofilitas membran didapatkan dari Sigma

Aldrich. Pelarut yang digunakan adalah N-Metil Pirolidon (NMP) yang didapatkan dari Merck.

2.2 Prosedur Penelitian

Membran komposit dibuat dengan mencampurkan PSF, PEG dan NMP hingga tercampur sempurna pada suhu 85°C dan kecepatan pengadukan 210 rpm yang kemudian disebut *dope solution*. Pori yang lebih sedikit menyebabkan kemampuan umpan untuk melewati membran semakin berkurang menyebabkan permeabilitas membran PSF dengan zeolit menunjukkan permeabilitas yang lebih rendah daripada membran PSF tanpa zeolit. Selain itu, zeolit memiliki daya adsorpsi terhadap zat warna metilen biru yang dapat menyebabkan fouling pada membran (Choiriyah et al., 2015). Ukuran pori yang lebih besar pada membran PSF dengan zeolit menjadi salah satu penyebab terjadinya fouling lebih mudah (Zhao et al., 2022).

. **Tabel 1.** Komposisi Membran

Sampel	PSF (gr)	PEG (gr)	NMP (mL)	Zeolit (ppm)
N	2	0,5	17	0
Z1	2	0,5	17	100
Z2	2	0,5	17	200
Z3	2	0,5	17	300
Z4	2	0,5	17	400
Z5	2	0,5	17	500

Setelah itu larutan tersebut didiamkan selama 24 jam pada suhu ruang untuk memastikan gelembung udara telah hilang dalam larutan. Kemudian *Dope solution* dicetak pada glass plate kemudian direndam pada larutan zeolit selama 15 menit. Zeolit yang dilarutkan dalam akuades disonifikasi pada sonikator untuk memastikan zeolit larut dengan sempurna. Membran yang terbentuk dikeringkan pada suhu ruang hingga kering.

2.2.1 Uji Permeabilitas Air Murni

Pengujian permeabilitas air murni bertujuan untuk mengetahui kemampuan air murni untuk dapat melewati membran tanpa dipengaruhi oleh zat terlarut. Permeabilitas air murni didapatkan dari jumlah air murni yang mampu melewati membran pada waktu tertentu yang biasa disebut fluks air murni. Pengukuran dilakukan pada suhu ruang menggunakan tekanan 2 bar. Konfigurasi aliran membran yang digunakan adalah *dead-end* dimana aliran feed tegak lurus terhadap membran. Dilakukan kompaksi pada membran pada tekanan 2 bar selama 30 menit untuk membuat struktur membran lebih kompak dan rapat (Mansourizadeh & Azad, 2014). Pengukuran fluks dapat menggunakan persamaan berikut (Murni, 2014)

$$J = \frac{V}{A \times t} \quad (1)$$

Sedangkan untuk menghitung permeabilitas menggunakan persamaan berikut (Mulder, 1996) :

$$L_p = \frac{J}{\Delta P} \quad (2)$$

2.2.2 Uji Permeabilitas Metilen biru

Membran PSF tanpa zeolit dan dengan zeolit dipasang dalam Housing membran dan digunakan untuk proses filtrasi larutan metilen biru. Proses filtrasi dilakukan pada suhu ruang dengan tekanan 2 bar menggunakan konfigurasi cross flow. Untuk mendapatkan hasil yang akurat dan memastikan stabilitas kondisi pengujian, pengukuran fluks larutan metilen biru dilakukan setelah 15 menit tidak terdapat perubahan yang signifikan pada tekanan. Perhitungan permeabilitas metilen biru dapat menggunakan persamaan 1 dan 2.

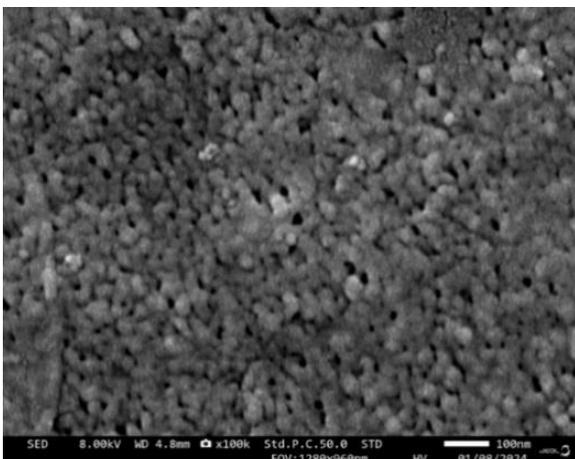
2.2.3 Uji Rejeksi Metilen biru

Konsentrasi larutan metilen biru yang berhasil melewati membran dalam permeat diukur untuk menentukan konsentrasinya. Absorbansi larutan metilen biru diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimumnya (Siswanti et al., 2023). Hasil absorbansi kemudian digunakan dalam kurva kalibrasi metilen biru untuk menghitung konsentrasi metilen biru dalam permeat. Proses ini penting untuk mengukur efisiensi filtrasi membran dalam menyisihkan zat terlarut. Perhitungan rejeksi menggunakan persamaan sebagai berikut (Morentera et al., 2022):

$$\%R = \frac{c_f - c_p}{c_f} \quad (3)$$

2.3 Karakterisasi Membran

Scanning Electron Microscopy (SEM) berfungsi untuk menunjukkan gambar morfologi membran tanpa zeolit dan dengan zeolit. Instrumen SEM yang digunakan pada penelitian ini adalah JSM-IT800 buatan JEOL. Membran dianalisa morfologinya pada bagian permukaan dan penampang lintang menggunakan nitrogen liquid untuk memotong membran (Nyamiati et al., 2023). SEM-EDX juga dilakukan untuk mengetahui persebaran zeolit pada permukaan membran. Selain itu, morfologi permukaan membran yang didapatkan dari analisa SEM dilakukan pengukuran pori menggunakan aplikasi *ImageJ*.

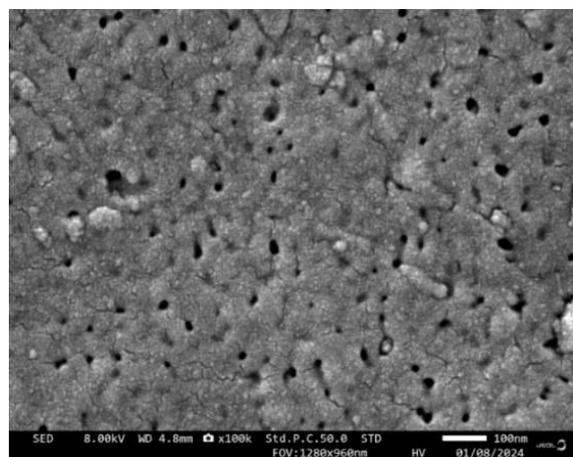


Gambar 1. Morfologi Permukaan Membran PSF

3. Hasil dan Pembahasan

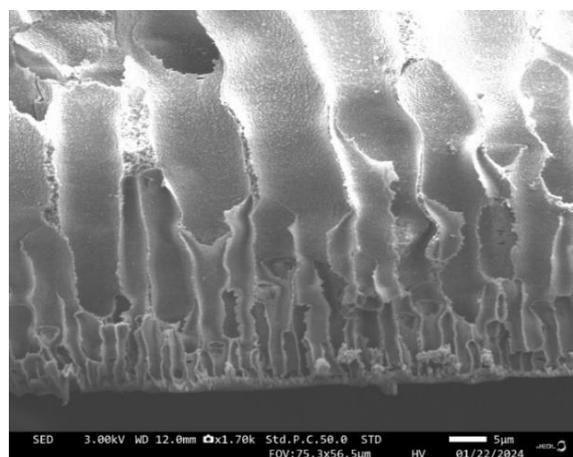
3.1. Karakterisasi Membran

Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) dilakukan secara cross-section untuk melihat gambar penampang melintang membran dan pada permukaan membran (Gambar 1). Adanya zeolit pada saat perendaman membran pada *waterbath* menyebabkan pori semakin besar dengan jumlah pori semakin sedikit (Gambar 2). Namun zeolit memiliki daya adsorpsi terhadap zat warna metilen biru yang dapat meningkatkan kemampuan rejeksi membran (Choiriyah et al., 2015).



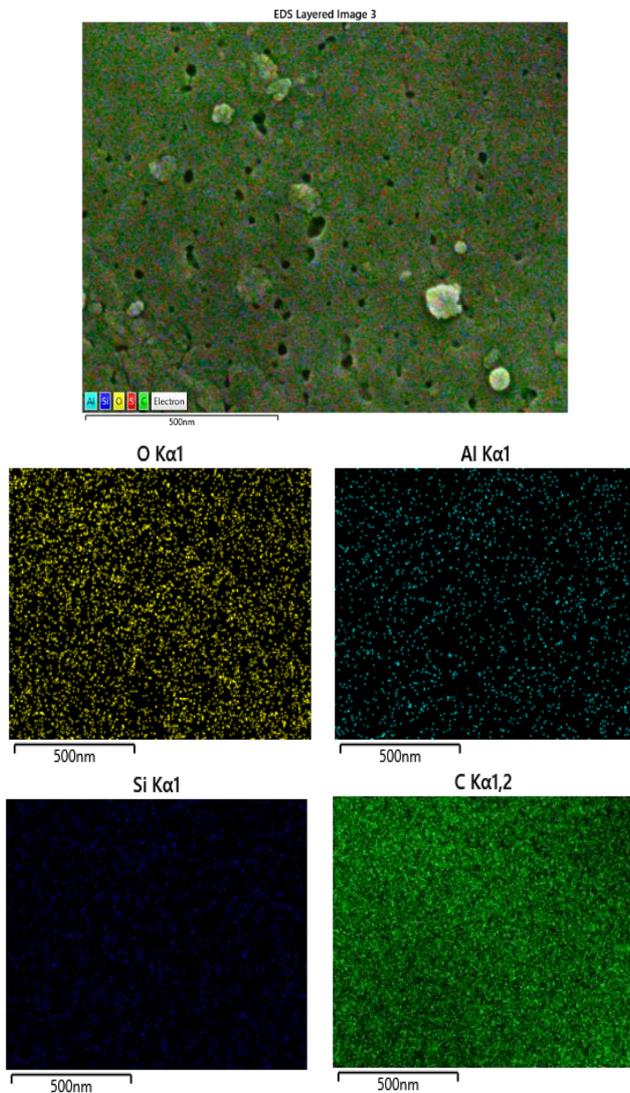
Gambar 2. Morfologi Permukaan Membran PSF dengan Zeolit 200 ppm

Pada Gambar 3 dapat dilihat struktur membran PSF dengan zeolit memiliki struktur finger-like yang disebabkan efek termodinamika non-pelarut (Barth et al, 2000). Struktur ini terbentuk pada laju presipitasi yang tinggi yang juga dipengaruhi oleh PEG.



Gambar 3. Morfologi penampang lintang Membran PSF- Zeolit 200 ppm

Pengujian SEM-EDX dilakukan untuk mengetahui persebaran zeolit pada permukaan membran PSF. Zeolit identik dengan ikatan Si-O-Al dimana dapat kita asumsikan bahwa persebaran zeolit pada permukaan membran PSF dapat dilihat dari atom Si dan Al.



Gambar 4. Hasil SEM-EDX Membran PSF-Zeolit 200 ppm

Berdasarkan Gambar 4 menunjukkan bahwa persebaran zeolit pada permukaan membran PSF merata dan tidak berkumpul pada titik-titik tertentu saja. Selain itu dari Tabel 2 dapat disimpulkan terjadi kenaikan persen atom O dan penurunan atom C yang disebabkan zeolit memiliki atom O yang berkontribusi untuk menaikkan persen atom O dan menurunkan persen atom C.

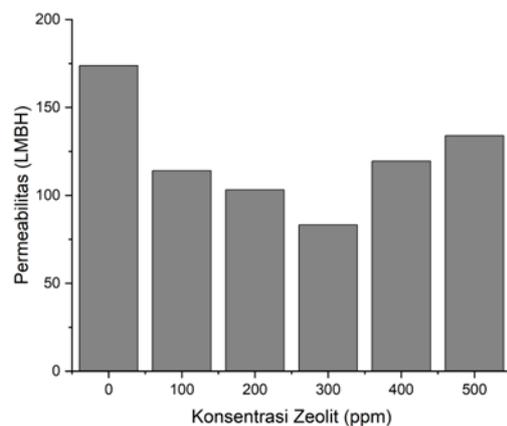
Persen atom Si pada zeolit dapat terdeteksi oleh SEM-EDX namun persen atom Al tidak dapat terdeteksi karena terlalu kecil. Hal ini dapat disimpulkan bahwa zeolit yang digunakan termasuk golongan *high-silica* karena pada penelitian Li et al (2023) menyatakan jika rasio Si/Al lebih dari sama dengan 20 maka termasuk golongan *high-silica*.

Tabel 2. Hasil Persen Atom SEM-EDX

Element	Signal Type	Atomic (%)	
		PSF	PSF +zeolit 200 ppm
C	EDS	90,80	89,49
O	EDS	5,77	6,78
S	EDS	3,43	3,63
Al	EDS	0,00	0,00
Si	EDS	0,00	0.1

3.2. Uji Permeabilitas Membran

Gambar 5 menunjukkan permeabilitas air murni setiap membran dengan konsentrasi zeolit 0 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 300 ppm, 400 ppm, dan 500 ppm berturut-turut adalah 173,83 LMBH; 114,08 LMBH; 103,21 LMBH; 83,33 LMBH; 119,51 LMBH; dan 134 LMBH. Membran PSF tanpa zeolit memiliki hasil permeabilitas lebih tinggi daripada membran dengan zeolit. Hal ini dikarenakan jumlah pori membran PSF tanpa zeolit lebih banyak yang memungkinkan air dapat melewati membran dengan lebih mudah.

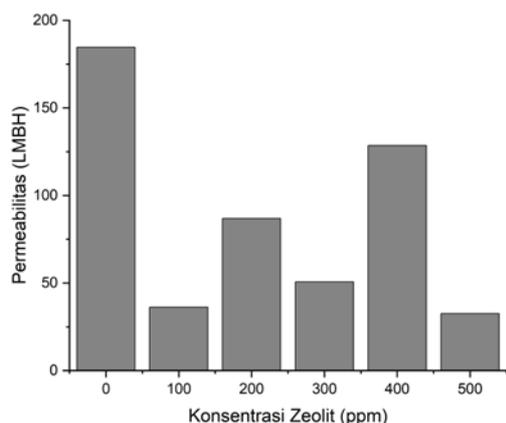


Gambar 5. Grafik Konsentrasi Zeolit Terhadap Permeabilitas Air Murni

Zeolit dapat meningkatkan hidrofilitas dari membran, sehingga memungkinkan air murni untuk dapat lolos lebih banyak dan meningkatkan fluks. Namun pada konsentrasi kurang dari sama dengan 200 ppm terlihat fluks menurun dengan penambahan zeolit disebabkan peningkatan hidrofilitas membran tidak signifikan, sehingga dengan jumlah pori yang sedikit menyebabkan air murni yang lolos hanya sedikit. Sedangkan pengujian permeabilitas metilen biru pada Gambar 6 didapatkan permeabilitas metilen biru pada membran PSF tanpa zeolit dan membran dengan membran PSF dengan konsentrasi zeolit 100 ppm, 200 ppm, 300 ppm, 400 ppm, dan 500 ppm adalah 184,70 LMBH; 35,22 LMBH; 86,92 LMBH; 50,70 LMBH; 128,56 LMBH; dan 32,60 LMBH. Hal ini dikarenakan jumlah pori lebih banyak daripada membran PSF dengan zeolit.

Pori yang lebih sedikit menyebabkan kemampuan umpan untuk melewati membran semakin berkurang

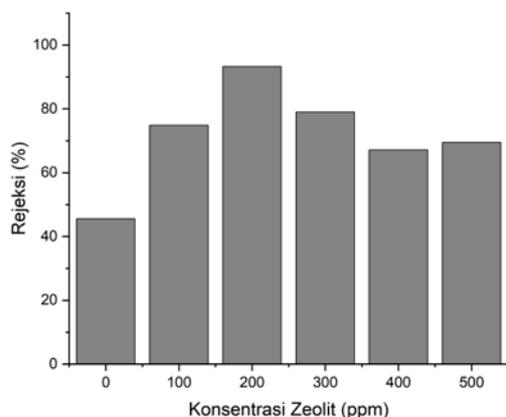
menyebabkan permeabilitas membran PSF dengan zeolit menunjukkan permeabilitas yang lebih rendah daripada membran PSF tanpa zeolit. Selain itu, zeolit memiliki daya adsorpsi terhadap zat warna metilen biru yang dapat menyebabkan fouling pada membran (Choiriyah et al., 2015). Ukuran pori yang lebih besar pada membran PSF dengan zeolit menjadi salah satu penyebab terjadinya fouling lebih mudah (Zhao et al., 2022).



Gambar 6. Grafik Konsentrasi Zeolit Terhadap Permeabilitas Metilen biru

3.3 Uji Rejeksi Membran

Konsentrasi permeat didapatkan dengan mengukur absorbansi setiap sampel pada panjang gelombang maksimum dimana didapatkan sebesar 664 nm. Dari Gambar 7 menunjukkan rejeksi membran pada setiap konsentrasi zeolit 0 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 300 ppm, 400 ppm, dan 500 ppm berturut-turut adalah 45,53%; 74,87%; 93,3%; 79,03%; 67,13%; dan 69,51%.



Gambar 7. Konsentrasi Zeolit Terhadap Rejeksi Metilen biru

Membran PSF tanpa zeolit menunjukkan hasil rejeksi yang lebih rendah daripada membran PSF dengan zeolit. Hal ini disebabkan adanya zeolit pada permukaan membran yang

mengubah jumlah pori pada permukaan membran. Selain itu, zeolit memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi zat warna metilen biru pada permukaan membran yang menyebabkan jumlah zat warna metilen biru yang mampu melewati membran menurun secara signifikan (Setyaningsih, 2017). Rejeksi dari membran PSF dengan penambahan zeolit didapatkan hasil yang fluktuatif dikarenakan ukuran pori yang semakin besar dengan ukuran pori yang tidak seragam. Membran PSF dengan konsentrasi zeolit 200 ppm memberikan hasil permeabilitas dan rejeksi yang bagus. Dengan persen rejeksi mencapai 93%, membran PSF dengan konsentrasi zeolit 200 ppm menunjukkan kinerja yang lebih baik daripada membran PSF tanpa zeolit.

4. Kesimpulan

Membran komposit PSF/Zeolit berhasil dibuat dengan persebaran zeolit merata pada permukaan membran PSF dengan pori membran dengan PSF memiliki ukuran lebih kecil dengan jumlah pori lebih banyak. Kinerja terbaik ditunjukkan pada membran PSF dengan konsentrasi 200 ppm dengan hasil permeabilitas air murni sebesar 103.21 LMBH. Adanya zeolit yang ditambahkan pada membran PSF dapat meningkatkan rejeksi terhadap metilen biru hingga 93%. Sehingga membran PSF dengan penambahan zeolit 200 ppm dapat dikatakan sebagai membran yang paling cocok untuk digunakan pada industri tekstil.

Daftar Pustaka

- Barth, C., Gonçalves, M. C., Pires, A. T. N., Roeder, J. & Wolf, B. A. (2000). Asymmetric polysulfone and polyethersulfone membranes: effects of thermodynamic conditions during formation on their performance. *Journal of Membrane Science*, 169(2), 287–299.
- Choiriyah, D., Riandini, E., Wulandari, A., P, O. D. I., Rachma, A. H. & Pramono, E. (2015). Pembuatan dan karakterisasi membran keramik micro filtrasi dari zeolit alam untuk filtrasi zat warna procion red mx8b dan metilen biru. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 11(1), 8–14.
- Dong, L., Huang, X., Wang, Z., Yang, Z., Wang, X. & Tang, C. Y. (2016). A thin-film nanocomposite nanofiltration membrane prepared on a support with in situ embedded zeolite nanoparticles. *Separation and Purification Technology*, 166, 230–239.
- Ike, I. A., Zhang, J., Groth, A., Orbell, J. D. & Duke, M. (2017). Effects of dissolution conditions on the properties of PVDF ultrafiltration membranes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 39, 716–726.
- Jiménez-Castañeda, M. & Medina, D. (2017). Use of Surfactant-Modified Zeolites and Clays for the Removal of Heavy Metals from Water. *Water*, 9(4), 235.

- Kesting, R. E. (1993). *Synthetic polymeric membranes: a structural perspective* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Kotoulas, A., Agathou, D., Triantaphyllidou, I. E., Tatoulis, T. I., Akratos, C. S., Tekerlekopoulou, A. G. & Vayenas, D. V. (2019). Zeolite as a Potential Medium for Ammonium Recovery and Second Cheese Whey Treatment. *Water*, 11(1), 136.
- Li, J., Gao, M., Yan, W. & Yu, J. (2023). Regulation of the Si/Al ratios and Al distributions of zeolites and their impact on properties. *Chemical Science*, 14(8), 1935–1959.
- Madsen, H. T. (2014). Membrane Filtration in Water Treatment – Removal of Micropollutants. In *Chemistry of Advanced Environmental Purification Processes of Water* (pp. 199–248). Elsevier.
- Mansourizadeh, A. & Javadi Azad, A. (2014). Preparation of blend polyethersulfone/cellulose acetate/polyethylene glycol asymmetric membranes for oil–water separation. *Journal of Polymer Research*, 21(3), 375.
- Morentera, B. G., Wahyuningsih, S. & Sudarni, D. H. A. (2022). Pengaruh Variasi Waktu Kontak dan Dosis Adsorben Fly ash teraktivasi NaOH terhadap Adsorpsi Metilen Biru. *Eksergi*, 19(3), 104.
- Murni, S. W. (2014). Preparasi Membran Selulosa Asetat untuk Penyaringan Nira Tebu. *Eksergi*, 10(2), 36.
- Nyamiati, R. D., Nurkhamidah, S., Rahmawati, Y. & Meka, W. (2023). Kinetic and Thermodynamic Studies in Cellulose Acetate-Polybutylene Succinate(CA-PBS)/Single Solvent/Water System for Desalination Membrane. *Eksergi*, 20(1), 8.
- Pratomo, I. H. (2003). Pembuatan dan Karakterisasi Membran Komposit Polisulfon Selulosa Asetat untuk Proses Ultrafiltrasi. *Jurnal Pendidikan Matematika Dan Sains*, 3, 168–173.
- Purnama, H., Jannah, N. M. & Hidayati, N. (2024). Penghilangan Rhodamin B dari Limbah Cair Menggunakan Pelarut Minyak Goreng Bekas dalam Membran Cair Emulsi Herry Purnama, Nabilah Miftachul Jannah, Nur Hidayati. *Eksergi*, 21(2), 94–102.
- Sastrawidana, I. D. K. & Rahmawati, D. O. (2016). Efisiensi perombakan warna air limbah tekstil buatan yang diolah secara elektrooksidasi pada variasi PH, konsentrasi garam dan beda potensial. *Prosiding Seminar Nasional MIPA*, 2016: Prosiding Seminar Nasional Mipa UNDIKSHA 2016, 356–362.
- Setyaningsih, L. W. nuzulia. (2017). Aktivasi Dan Aplikasi Zeolit Alam Sebagai Adsorben Logam Kromium Dalam Air Limbah Industri Penyamakan Kulit. *Eksergi*, 14(1), 7.
- Shokri, E., Yegani, R. & Akbarzadeh, A. (2017). Novel adsorptive mixed matrix membranes by embedding modified montmorillonite with arginine amino acid into polysulfones for As(V) removal. *Applied Clay Science*, 144, 141–149.
- Wijaya, K., Fatimah, I., Kurniaysih, D., Sugiharto, E. & Sudiono, S. (2006). Utilisasi TiO₂- Zeolit Dan Sinar UV Untuk Fotodegradasi Zat Warna Congo Red. *TEKNOIN*, 11(3), 199–209.
- Zhao, F., Han, X., Shao, Z., Li, Z., Li, Z & Chen, D. (2022). Effects of different pore sizes on membrane fouling and their performance in algae harvesting. *Journal of Membrane Science*, 641, 11916.
- Zheng, S., Zuo, F., Wu, T., Irfanoglu, B., Chou, C., Nieto, R. A., Feng, P. & Bu, X. (2011). Cooperative Assembly of Three-Ring-Based Zeolite-Type Metal–Organic Frameworks and Johnson-Type Dodecahedra. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(8), 1849–1852.