

Pemanfaatan Membran Zeolit-Silika untuk Menurunkan COD pada Limbah Cair Kelapa Sawit

Tika Kumala Sari

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jalan Kalimantan No. 37, Kampus Tegalboto, Jember, 68121, Indonesia

*email: tikakumalasari@unej.ac.id

Abstrak

Produksi Kelapa sawit menghasilkan limbah cair yang dikenal dengan *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Proses produksi kelapa sawit pada umumnya menggunakan penambahan air selama proses ekstraksi minyak sawit mentah (CPO) dari tandan buah segar (TBS) dan menyebabkan jumlah air limbah yang dihasilkan cukup besar. Beberapa permasalahan lingkungan disebabkan oleh pembuangan POME secara langsung ke lingkungan yaitu kandungan BOD dan COD yang tinggi dan menjadi perhatian utama karena dapat mencemari air permukaan, karena alasan toksikologi dan estetika. Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014, karakteristik limbah cair POME melebihi baku mutu yang telah ditetapkan sehingga tidak dapat dibuang secara langsung karena dapat mencemari lingkungan. Limbah cair POME memiliki kandungan BOD₅ 10.000 mg/L; COD 22.115 mg/L; TSS sebesar 4.260 mg/L, kandungan minyak dan lemak sebesar 260 mg/L dan memiliki Ph asam sekitar 4,6. Berbagai metode pengolahan limbah POME telah diteliti seperti pengolahan biologis, teknologi membran, koagulasi, flokulasi dan elektrokoagulasi dan kombinasi pengolahan fisik biologi salah satunya teknologi Sequencing Batch Reactor. Membran dengan bahan anorganik seperti zeolit dan silika memiliki beberapa keuntungan dalam aplikasi pengolahan diantara distribusi ukuran pori kecil sehingga meningkatkan selektifitas. Penelitian ini difokuskan pada pengujian kinerja membran zeolit silika untuk mengukur nilai fluks dan nilai rejeksi COD pada limbah cair kelapa sawit. Variabel penelitian yang digunakan variasi kecepatan centrifuge 200 rpm dan 600 rpm. Reaktor yang digunakan adalah reaktor cross flow. Pengujian reaktor dilakukan selama 100 menit dan permeate diambil setiap 20 menit. Berdasarkan hasil penelitian, nilai fluks membran zeolit-silika tertinggi yaitu 73,7 L/m².jam pada variasi pembuatan membran dengan kecepatan centrifuge 200 rpm, sedangkan nilai rejeksi tertinggi yaitu membran zeolit-silika mampu mengurangi kandungan COD di limbah cair kelapa sawit sebesar 84,0% pada variasi pembuatan membran dengan kecepatan centrifuge 600 rpm.

Kata kunci: *cross flow*, membran, POME, silika, zeolit

Abstract

Palm oil production produces liquid waste known as Palm Oil Mill Effluent (POME). The palm oil production process generally uses the addition of water during the extraction process of crude palm oil (CPO) from fresh fruit bunches (FFB) and causes a large amount of wastewater to be generated. Some of the environmental problems caused by the direct discharge of POME into the environment are high BOD and COD contents and are of major concern as they can pollute surface water for toxicological and aesthetic reasons. According to the Minister of Environment Regulation No. 5/2014, the characteristics of POME effluent exceed the quality standards that have been set so that it cannot be disposed of directly because it can pollute the environment. POME effluent has a BOD₅ content of 10,000 mg/L; COD of 22,115 mg/L; TSS of 4,260 mg/L, oil and fat content of 260 mg/L and an acidic pH of 4.6. Various POME effluent treatment methods have been investigated such as biological treatment, membrane technology, coagulation, flocculation and electrocoagulation and a combination of physical and biological treatment such as Sequencing Batch Reactor technology. Membranes with inorganic materials such as zeolite and silica have several advantages in treatment applications including small pore size distribution thus increasing selectivity. This study focused on testing the performance of silica zeolite membranes to measure flux values and COD rejection values in palm oil liquid waste. The research variables used were variations in centrifuge speed of 200 rpm and 600 rpm. The reactor used is a cross flow reactor. Reactor testing was carried out for 100 minutes and permeate was taken every 20 minutes. Based on the results of the study, the highest zeolite-silica membrane flux value is 73.7 L/m².h in the variation of membrane manufacturing with a centrifuge speed of 200 rpm, while the highest rejection value is zeolite-silica membrane is able to reduce COD content in palm oil liquid waste by 84.0% in the variation of membrane manufacturing with a centrifuge speed of 600 rpm.

Keywords: *cross flow*, membrane, POME, silica, zeolite

1. PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit memegang peranan penting bagi perekonomian di Indonesia. Namun dari sudut pandang lingkungan, produksi limbah cair yang dihasilkan dari kelapa sawit menghasilkan polutan yang banyak mengandung bahan organik. Produksi Kelapa sawit menghasilkan limbah cair yang dikenal dengan Limbah Cair Kelapa Sawit (LCPKS) atau juga dikenal dengan nama *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Proses produksi kelapa sawit pada umumnya menggunakan penambahan air selama proses ekstraksi minyak sawit mentah (CPO) dari tandan buah segar (TBS) dan menyebabkan jumlah air limbah yang dihasilkan cukup besar. Negara – negara penghasil kelapa sawit seperti Indonesia dan Malaysia, produksi CPO menghasilkan produksi tahunan POME sebanyak 3 miliar pon. Selain itu, diperkirakan 5-7,5 ton air yang dibutuhkan untuk memproduksi 1 ton CPO dengan lebih dari 50% air akan menjadi limbah cair kelapa sawit (Mohammad et al., 2021). Salah satu kandungan organik yang tinggi di limbah cair kelapa sawit yaitu kandungan *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD). Beberapa permasalahan lingkungan disebabkan oleh pembuangan POME secara langsung ke lingkungan yaitu kandungan BOD dan COD yang tinggi dan menjadi perhatian utama karena dapat mencemari air permukaan dan alasan toksikologi serta estetika. Limbah cair kelapa sawit mengandung konsentrasi bahan organik yang cukup tinggi dengan kandungan COD mencapai 40.000 mg/L (Kusmindari & Yuliwati, 2021) sedangkan berdasarkan Penelitian (Pinem et al., 2020), limbah cair POME memiliki kandungan BOD₅ 10.000 mg/L; COD 22.115 mg/L; TSS sebesar 4.260 mg/L, kandungan minyak dan lemak sebesar 260 mg/L dan memiliki Ph asam sekitar 4,6. Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014, karakteristik limbah cair POME melebihi baku mutu yang telah ditetapkan sehingga tidak dapat dibuang secara langsung karena dapat mencemari lingkungan.

Berbagai metode pengolahan limbah POME telah diteliti seperti pengolahan biologis, teknologi membran, koagulasi, flokulasi dan elektrokoagulasi dan kombinasi pengolahan fisik biologi salah satunya teknologi *sequencing batch reactor* (Sanjaya et al., 2024). Teknologi pengolahan air limbah menggunakan membran telah berkembang secara signifikan karena manfaat yang ditawarkan untuk pengolahan air limbah. Beberapa keuntungan pengolahan air limbah menggunakan teknologi membran yaitu penggunaan bahan kimia yang rendah, kebutuhan energi dan biaya modal yang rendah, ramah lingkungan dan mudah digunakan oleh banyak orang (Ezugbe & Rathilal, 2020).

Membran dengan bahan anorganik seperti zeolit dan silika memiliki beberapa keuntungan dalam aplikasi pengolahan diantara distribusi ukuran pori kecil sehingga meningkatkan selektifitas. Zeolit alam memiliki kemampuan yang unik seperti kemampuan pertukaran ion, adsorpsi, porositas tinggi dan tahan terhadap panas membuat zeolit alam cocok untuk diaplikasikan untuk pengolahan air bersih maupun air limbah (Padaki et al., 2015). Penelitian ini difokuskan untuk memberikan salah satu solusi pengolahan limbah cair kelapa sawit menggunakan membran zeolit silika. Membran zeolit-silika dibuat dari bahan pasir zeolit dan silika. Pengujian kinerja membran dilakukan dengan mengukur nilai fluks dan nilai rejeksi COD (penyisihan kandungan COD) pada limbah cair kelapa sawit. Reaktor yang digunakan adalah reaktor *cross flow*. Beberapa kelebihan dari reaktor *cross flow* yaitu menghasilkan nilai fluks yang tinggi, kemudahan pencucian membran, fleksibel dalam penggunaannya, dan dapat digunakan untuk berbagai variasi karakteristik dan debit air umpan (Hai et al., 2018).

2. BAHAN DAN METODE

Limbah cair kelapa sawit yang digunakan diambil dari PT Riset Perkebunan Nusantara. Sampel ditampung menggunakan jerigen 10 L. Kandungan COD pada limbah cair kelapa sawit diujikan sebelum dan sesudah proses filtrasi menggunakan membran zeolit-silika. Pengujian kandungan COD mengacu pada standar SNI SNI 6989.2:2009 menggunakan metode Titrimetri. Pengujian kinerja membran dilakukan dengan mengukur nilai fluks dan nilai rejeksi membran. Prosedur pengujian kinerja membran diawali dengan menguji kandungan awal COD limbah cair kelapa sawit, dilanjutkan dengan mempersiapkan alat dan bahan untuk proses pembuatan membran. Setelah itu, membran yang telah selesai dibuat akan dilakukan pengujian kinerja membran atau proses filtrasi limbah cair kelapa sawit menggunakan membran zeolit-silika. Membran zeolit-silika diletakkan pada reaktor *cross flow* dan dilanjutkan proses filtrasi dengan pengambilan *permeate* setiap 20 menit selama 100 menit. Proses selanjutnya yaitu mengukur nilai fluks dari volume *permeate* yang dihasilkan dan menguji kandungan COD untuk setiap sampel *permeate* limbah cair kelapa sawit.

2.1 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan untuk penelitian ini yaitu reaktor membran dengan aliran *cross flow*, *centrifuge*, *magnetic stirrer*, neraca analitik, *beaker glass*, dan cawan petri, sedangkan bahan-bahan yang diperlukan yaitu pasir zeolit dan silika, larutan HCl, NH₄Cl, 2-Propanol, PVA (*Poly Vinyl Alcohol*) dan PEG (*Poly Etilen Glicol*).

2.2 Aktivitasi zeolit dan silika

Zeolit dan silika yang digunakan berbentuk butiran dan dihaluskan sampai berukuran 200 mesh. Zeolit dan silika dihaluskan menggunakan alat *ball milling* dan dilanjutkan mengayak serbuk zeolit dan silika sampai berukuran 200 mesh. Zeolit dan silika diaktivasi menggunakan larutan asam klorida (HCl) selama 24 jam. Serbuk zeolit dan silika yang masing-masing telah diaktivasi dicuci menggunakan aquadest sampai kandungan HCl hilang. Serbuk zeolit dan silika yang telah dicuci kemudian dikeringkan menggunakan oven selama 24 jam.

2.3 Pembuatan Membran

Proses pembuatan membran menggunakan teknik inversi fasa. Teknik ini dipilih karena mempunyai kelebihan yaitu pembuatan yang mudah dilakukan, pembentukan membran dapat dikendalikan dan dapat digunakan untuk berbagai macam polimer. Teknik inversi fasa dapat dibuat menjadi dua konfigurasi yaitu datar (lembaran) dan pipa (turbular) (Wahyuni dan Damayanti, 2016).

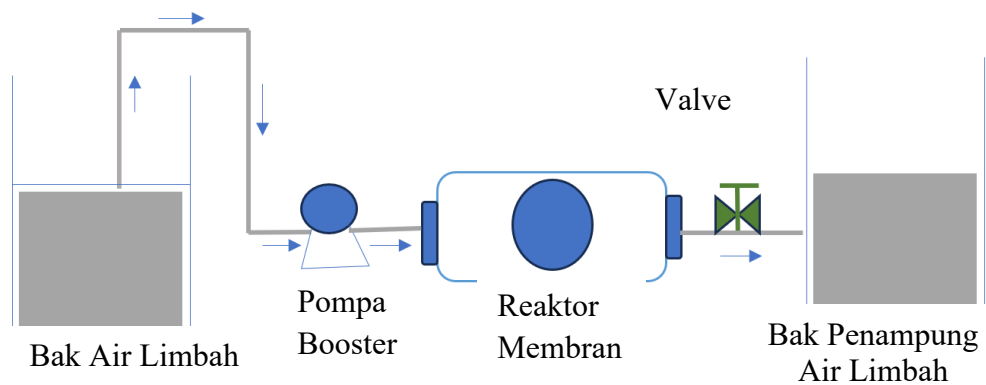
Pembuatan membran diawali dengan menimbang variasi zeolit dan silika sebanyak 3 gram. Serbuk zeolit-silika yang sudah ditimbang *dicentrifuge* selama 10 menit dengan variasi kecepatan 200 rpm dan 600 rpm. Endapan zeolit-silika yang berada dibawah dicampur dengan 3,5 gram NH₄Cl dan 200 ml aquadest diaduk dan dipanaskan dengan *magnetic stirrer* selama 1 jam, kemudian ditambahkan PVA 5% dan PEG Penambahan PEG bertujuan untuk pembentukan dan penyeragaman pori-pori membran (Nurratri et al., 2020) Larutan yang sudah tercampur kemudian dicetak menggunakan cawan petri dengan diameter 15 cm dan dikeringkan pada suhu 80°C selama 24 jam sampai kadar air yang terkandung pada membran hilang.

2.4 Proses Filtrasi Membran Zeolit – Silika

Pengujian membran dilakukan untuk setiap variabel membran zeolit-silika kecepatan *centrifuge* 200 rpm dan 600 rpm. Membran yang telah dibuat dan dikeringkan diletakkan di reaktor *cross flow* yang ditunjukkan pada Gambar 1 dan skema reaktor ditunjukkan pada Gambar 2. Limbah cair kelapa sawit sebanyak 10 liter ditampung di bak penampung air limbah yang selanjutnya akan dipompa meng menuju reaktor *cros flow* dengan menggunakan pompa *booster*. Reaktor *cross flow* yang digunakan terdiri dari manometer, *water mur*, *valve* dan selang. Manometer berfungsi untuk menunjukkan tekanan di dalam reaktor, *valve* digunakan untuk membuka dan menutup aliran untuk mengatur tekanan. Pengujian membran zeolit-silika pada reaktor *cross flow* dilakukan selama 100 menit dan *permeate* diambil setiap 20 menit untuk setiap variasi membran zeolit-silika



Gambar 1. Peletakan membran pada reaktor *cross flow*



Keterangan:

→ Arah aliran

Gambar 2. Skema reaktor *cross flow* pengujian membran

2.5 Karakterisasi Membran

2.5.1 Analisis Uji Tarik Membran

Uji tarik membran dilakukan untuk mengetahui kekuatan membran terhadap gaya yang berasal dari luar. Semakin rapat struktur membran menunjukkan jarak antara molekul dalam membran semakin rapat sehingga membran mempunyai kekuatan tarik yang kuat. Kekuatan tarik membran zeolit-silika dapat dilihat dari nilai *Load* yaitu nilai kuat tegang membran pada saat putus dan *stroke* yaitu kekuatan regangan pada saat putus yang dimiliki oleh membran.

2.5.2 Pengujian Nilai Fluks Membran

Parameter utama pengujian kinerja membran yaitu berdasarkan nilai fluks. Secara kuantitas, permeabilitas membran sering dinyatakan sebagai nilai fluks atau koefisien permeabilitas. Nilai fluks adalah volume hasil filtrasi membran (*permeate*) yang lewati satuan luas membran. Nilai fluks biasanya diukur dengan L/m².h (Voutchkov, 2017). Secara sistematis fluks dirumuskan dengan formula sebagai berikut:

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

Dimana :

J = Fluks (L/m².h)

V = volume *permeate* (ml)

A = Luas permukaan membran (m²)

t = Waktu (jam)

2.5.3 Pengujian Nilai Rejeksi Membran

Parameter lainnya untuk menguji kinerja membran yaitu pengujian nilai rejeksi membran. Nilai rejeksi juga disebut permselektivitas membran. Permselektivitas adalah kemampuan membran untuk menahan atau melewatkan suatu spesi tertentu. Nilai rejeksi dihitung dengan simbol R (%) menggunakan persamaan :

$$R = \frac{c_f - c_p}{c_f} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana :

R = nilai rejeksi (%)

C_p = konsentrasi zat terlarut dalam *permeate*

C_f = konsentrasi zat terlarut dalam umpan.

Nilai R berkisar antara 0 sampai 1. Nilai R = 1 menunjukkan kontaminan ditahan oleh membran dengan sempurna. f (Voutchkov, 2017).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

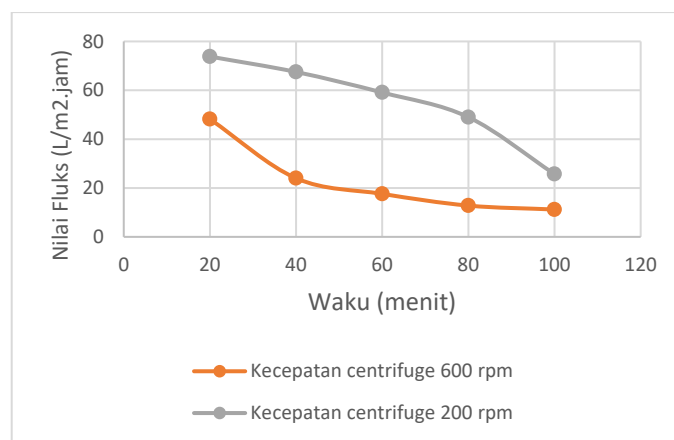
Limbah cair kelapa sawit diuji kandungan COD awal dan akhir untuk mengetahui kinerja membran zeolit-silika. Konsentrasi COD limbah cair kelapa sawit berdasarkan hasil penelitian yaitu 50.198,47 mg/L.

Pengaruh Variasi Kecepatan *Centrifuge* Terhadap Nilai Fluks

Nilai fluks membran merupakan salah satu faktor utama dalam performa membran. Fluks menjadi parameter penting dalam penentuan kinerja membran, berperan penting dalam menentukan biaya *maintenance* dan operasional secara keseluruhan. Perhitungan nilai fluks untuk setiap variasi membran dihitung menggunakan Persamaan 1. Tabel 1 menunjukkan volume *permeate* yang dihasilkan dan nilai fluks membran untuk setiap variasi kecepatan *centrifuge*.

Tabel 1. Nilai fluks membran

Waktu pengambilan <i>permeate</i> (menit)	Variasi kecepatan <i>centrifuge</i>	Volume <i>permeate</i> (ml)	Nilai Fluks (L/m ² .jam)
20	200 rpm	30,9	73,8
40		28,3	67,5
60		24,8	59,1
80		20,5	49,0
100		10,8	25,7
20	600 rpm	20,2	48,2
40		10,0	24,0
60		7,4	17,6
80		5,3	12,8
100		4,7	11,2



Gambar 2. Pengaruh kecepatan *centrifuge* terhadap nilai fluks

Berdasarkan pada **Tabel 1** dan **Gambar 2** menunjukkan terjadinya penurunan pada nilai fluks membran. Nilai fluks terbesar terjadi pada menit ke 20 dan terus menurun hingga menit ke 100. Penurunan nilai fluks dapat terjadi karena semakin lama waktu pengoperasian membran semakin banyak fouling yang terbentuk di area permukaan membran. Nilai fluks tertinggi pada variasi kecepatan *centrifuge* 200 rpm terjadi pada menit ke -20 sebesar 73,8 L/m².jam sedangkan pada variasi kecepatan *centrifuge* 600 rpm nilai fluks tertinggi sebesar 48,2 L/m².jam. Tabel 1 menunjukkan membran zeolit-silika kecepatan *centrifuge* 200 rpm menghasilkan nilai fluks yang lebih tinggi dibandingkan membran dengan kecepatan *centrifuge*

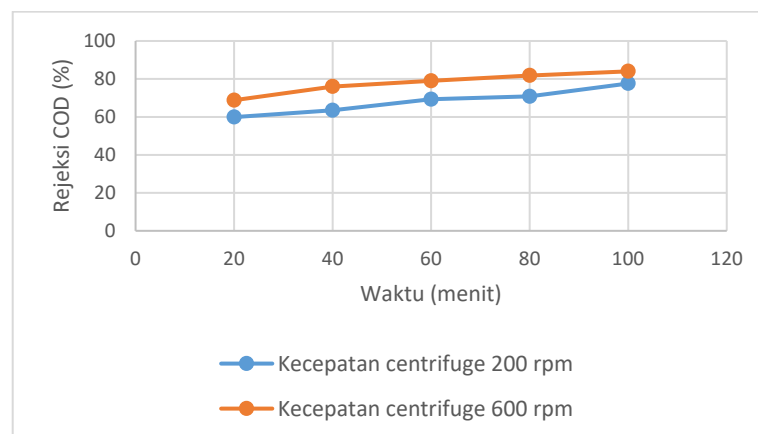
600 rpm. Semakin cepat kecepatan *centrifuge*, distribusi partikel zeolit dan silika akan semakin merata sehingga menghasilkan pori yang semakin rapat. Hal ini sejalan dengan penelitian (Putri & Damayanti, 2017) yang menyebutkan bahwa penurunan nilai fluks seiring dengan penambahan waktu pengoperasian disebabkan terjadinya *fouling* membran.

Pengaruh Variasi Kecepatan *Centrifuge* Terhadap Nilai Rejeksi COD

Nilai rejeksi menggambarkan nilai permselektivitas dari suatu membran. Permselektivitas merupakan ukuran kemampuan membran untuk menahan suatu spesi atau melewatkan suatu spesi tertentu. Nilai rejeksi COD dihitung menggunakan Persamaan 2. Perhitungan dengan persamaan tersebut merupakan perbandingan nilai konsentrasi awal dan konsentrasi akhir. Apabila membran memiliki nilai rejeksi 100%, maka membran mengalami rejeksi sempurna yang menunjukkan semakin bagus kualitas *permeate* yang dihasilkan, begitu juga dengan sebaliknya. Nilai rejeksi merupakan salah satu parameter untuk menentukan kinerja membran. Semakin besar nilai rejeksi menunjukkan bahwa membran mempunyai kemampuan yang baik untuk menyaring polutan di air limbah (Voutchkov, 2017). Nilai BOD dianalisis setiap 20 menit selama 100 menit untuk mengetahui nilai rejeksi COD pada setiap variasi membran zeolit-silika.

Tabel 2. Nilai rejeksi membran pada variasi kecepatan *centrifuge*

No	Waktu (menit)	Nilai rejeksi COD pada variasi kecepatan <i>centrifuge</i> (%)	
		200 rpm	600 rpm
1	20	59,9	68,8
2	40	63,5	76
3	60	69,3	79
4	80	70,8	81,8
5	100	77,6	84



Gambar 3. Pengaruh kecepatan *centrifuge* terhadap nilai rejeksi COD

Berdasarkan **Tabel 2** dan **Gambar 3** nilai rejeksi COD mengalami peningkatan yang cukup signifikan dengan semakin meningkatnya waktu pengoperasian membran. Pada menit ke-20 efisiensi penyisihan COD berkisar antara 59,9% - 68,8% dan semakin meningkat sampai menit ke 100 dengan efisiensi removal COD berkisar antara 77,6% – 84,0%. Berdasarkan hasil penelitian, nilai rejeksi COD pada variasi membran kecepatan *centrifuge* 200 rpm terjadi pada menit ke-100 sebesar 77,6%, sedangkan pada variasi membran dengan kecepatan *centrifuge* 600 rpm nilai rejeksi tertinggi juga terjadi pada menit ke-100 sebesar 84,0%. Peningkatan nilai efisiensi penyisihan COD dapat disebabkan oleh pori-pori membran yang semakin kecil karena adanya polutan air limbah yang tertahan pada permukaan membran. Hal ini sejalan dengan penelitian Suprihatin et al (2015), penurunan kandungan COD pada limbah cair kelapa sawit berhubungan dengan berkurangnya senyawa organik yang telah tertahan oleh membran saat limbah cair dilewatkan melalui membran. Membran zeolit-silika dengan kecepatan *centrifuge* 600 rpm menunjukkan efisiensi penyisihan COD yang lebih tinggi dibandingkan membran dengan kecepatan *centrifuge* 200 rpm. Hal ini juga didukung oleh penelitian Yulianti et al (2007), penggunaan kecepatan sentrifugasi optimal menyebabkan partikel akan tersebar merata dan menghasilkan tingkat homogenitas yang tinggi sehingga pori-pori membran yang terbentuk akan lebih seragam dan rapat. Penelitian (Pramitasari dan Damayanti, 2017) juga menyebutkan bahwa kecepatan *centrifuge* 600 rpm merupakan kecepatan *centrifuge* yang optimal untuk proses pembuatan membran. Hal ini dikarenakan material zeolit dan silika akan tercampur sempurna dengan kecepatan *centrifuge* yang lebih tinggi ketika di*centrifuge* bersama dengan pelarut 2-propanol. 2 Propanol digunakan untuk mencuci campuran material zeolit dan silika sehingga kotoran akan terlarut dan didapatkan endapan zeolit dan silika yang lebih murni. Semakin besar kecepatan *centrifuge* membuat bahan pengotor dapat dipisahkan dari endapan.

Pengujian Kuat Tarik Membran Zeolit-Silika

Uji kuat tarik (*tensile test*) digunakan untuk mengetahui elastisitas. Membran dijepit pada sisi atas dan bawah kemudian dihubungkan dengan sensor gaya yang terhubung dengan komputer. Membran zeolit silika yang diujikan memiliki dimensi panjang 6 cm x lebar 1 cm. Gaya tarik memiliki arah dari bawah ke atas, lapisan membran dijepit oleh sistem penjepit pada kedua sisi lebar dengan arah berlawanan. Membran zeolit – silika yang digunakan mempunyai Elastisitas *Modulus Young* sebesar 0,141 Mpa/ N/mm² atau berdasarkan penelitian (Park & Kim, 2008), elastisitas membran *hollow fiber* yang terbuat dari *polyvinylidenedifluoride* menghasilkan

elastisitas sebesar 2,462 N/mm². Hal ini menunjukkan membran zeolit silika mempunyai elastisitas yang sangat kurang dari membran *polyvinylidenedifluoride* sehingga kurang kompatibel untuk diaplikasikan menjadi bentuk *hollow fiber*. Berdasarkan penelitian (Elhady et al., 2020), membran komposit yang dibuat dari film tipis poliamida untuk menurunkan kandungan COD pada limbah cair minyak nabati memiliki nilai *Modulus Young* sebesar 1000 MPa. Nilai ini menunjukkan elastisitas membran zeolit – silika sangat kurang dibandingkan dengan membran komposit yang terbuat dari film tipis poliamida.

4. KESIMPULAN

Nilai fluks membran zeolit-silika tertinggi yaitu 73,7 L/m².jam pada variasi pembuatan membran dengan kecepatan centrifuge 200 rpm, sedangkan nilai rejeksi tertinggi untuk kandungan COD yaitu sebesar 84,0% pada variasi pembuatan membran dengan kecepatan *centrifuge* 600 rpm. Semakin tinggi kecepatan *centrifuge*, material zeolit dan silika dapat tercampur sempurna dan menghasilkan membran dengan nilai rejeksi yang paling tinggi. Penelitian lanjutan dapat difokuskan pada eksplorasi material membran lain yang memiliki daya tahan lebih tinggi terhadap fouling dan pengoperasian membran zeolit-silika pada reaktor yang lebih besar dengan beberapa optimasi parameter yang lebih beragam seperti tekanan, waktu filtrasi untuk meningkatkan efisiensi filtrasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Elhady, S., Bassyouni, M., Mansour, R. A., Elzahar, M. H., Abdel-Hamid, S., Elhenawy, Y., & Saleh, M. Y. (2020). Oily wastewater treatment using polyamide thin film composite membrane technology. *Membranes*, 10(5), 1–17. <https://doi.org/10.3390/membranes10050084>
- Ezugbe, E. O., & Rathilal, S. (2020). Membrane technologies in wastewater treatment: A review. *Membranes*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>
- Hai, F. I., Yamamoto, K., & Lee, C. H. (2018). *Membrane Biological Reactors: Theory, Modeling, Design, Management and Applications to Wastewater Reuse - Second Edition*. IWA Publishing. <https://books.google.co.id/books?id=0kWwDwAAQBAJ>
- Kusmindari, C. D., & Yuliwati, E. (2021). Optimasi Kondisi Proses Pengolahan Limbah Cair Industri Kelapa Sawit. *Distilasi*, 6(1), 18–25. <https://jurnal.um-palembang.ac.id/distilasi/article/view/3384>
- Mohammad, S., Baidurah, S., Kobayashi, T., Ismail, N., & Leh, C. P. (2021). Palm oil mill effluent treatment processes—A review. *Processes*, 9(5), 1–22. <https://doi.org/10.3390/pr9050739>
- Nuryanto, R. (2020). PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI MEMBRAN PADUAN KITOSAN (Nurrarti et al; 2020). 14(9), 3261–3270.
- Park, M. J., & Kim, H. (2008). Indirect measurement of tensile strength of hollow fiber braid

- membranes. *Desalination*, 234(1), 107–115.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.09.076>
- Pinem, J. A., Tumanggor, I., & Saputra, E. (2020). The Application of Nanofiltration Membrane for Palm Oil Mill Effluent Treatment by Adding Polyaluminium Chloride (PAC) as Coagulant. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 15(1), 1–9.
<https://doi.org/10.23955/rkl.v15i1.13952>
- Pramitasari, N dan Damayanti, A. (2017). Pemanfaatan Zeolit Dan Silika Sebagai Material Warna Limbah Cair Batik Zeolite and Silica As Material for Filter Membrane To Remove Color From Batik Wastewater. *Jurnal Purifikasi*, 17(1), 11–21.
- Putri, R., & Damayanti, A. (2017). Pencucian Membran Zeolit dengan Menggunakan Natrium Hipoklorit (Naocl) dan Larutan Lerak. *Jurnal Teknik ITS*, 6(1), 94–100.
<https://media.neliti.com/media/publications/214336-pencucian-membran-zeolit-dengan-mengguna.pdf>
- Sanjaya, A., Saputri, D. R., Damayanti, D., Fahni, Y., Auriyani, W. A., & Mustafa, M. (2024). Palm Oil Mill Effluent Treatment Technology using Sequencing Batch Reactor (SBR) with Oxidation Reduction Potential (ORP) Monitoring. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, 8(1), 14–24. <https://doi.org/10.33795/jtkl.v8i1.3340>
- Voutchkov, N. (2017). Pretreatment for Reverse Osmosis Desalination. ISBN- 978-0-12-809953-7, Elsevier
- Yulianti, E., Grace, TJ., Sulungbudi dan Mujamilah. (2007). Sintesis dan Prosese ekapsulasi errofluid Fe_3O_4 / Fe_2O_3 dengan Polymer POLY (Lactic Acid). Batan : PTBIN