

## Pengaruh karbon aktif terhadap *fouling* membran *reverse osmosis* pada pengolahan air terproduksi

### Effect of activated carbon on fouling of reverse osmosis membrane for produced water treatment

Mayang Bidari<sup>1</sup>, Merlinda Ariesty Putri<sup>1</sup>, Subriyer Nasir<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

<sup>2</sup>Laboratorium Teknik Separasi dan Purifikasi, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

\*Corresponding author: E-mail: [subriyer@unsri.ac.id](mailto:subriyer@unsri.ac.id)

#### Abstrak

Air terproduksi dari industri minyak dan gas memerlukan pengolahan untuk menurunkan parameter pencemarnya sebelum dibuang ke lingkungan atau digunakan kembali. Proses filtrasi dengan membran sebagai salah satu pilihan paling handal untuk proses pengolahan air dan air limbah dapat mengalami masalah *fouling* yang dapat mengurangi efisiensinya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis model pembentukan *fouling* pada membran *Reverse Osmosis (RO)* dengan mengintegrasikan filtrasi membran dengan proses adsorpsi menggunakan karbon aktif batok kelapa. Sistem membran RO menggunakan kondisi tekanan operasi yang berbeda (10, 11, 12 bar) dan waktu filtrasi (15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 menit). *Modified Fouling Index (MFI)* digunakan untuk menggambarkan *fouling* pada proses dan penelitian difokuskan pada penurunan zat padat terlarut (TDS). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa tekanan operasi terbaik terjadi pada tekanan 12 bar dengan nilai fluks *permeate* tertinggi yaitu 0,75 L/m<sup>2</sup>h dan rejeksi TDS tertinggi sebesar 95,90%. Sistem terintegrasi antara karbon aktif adsorpsi dan membran RO menghasilkan nilai MFI tertinggi sebesar 65,64 s/L<sup>2</sup> pada tekanan 10 bar.

**Kata Kunci:** adsorpsi, air terproduksi, fouling, karbon aktif, reverse osmosis.

#### Abstract

Produced water from the oil and gas industry required a treatment to reduce pollutant parameters before being discharged into water bodies or reinjection back to reservoirs. The filtration process using membranes is one of the most reliable options for water and wastewater treatment. The propensity of reverse osmosis (RO) membrane to fouling at a prolonged time of operation can reduce their efficiency. This study aims to model the RO fouling by the produced water using activated carbon as pretreatment. The RO membrane operating pressure was set to 10, 11, and 12 bar with filtration times of 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, and 120 min, respectively. Modified fouling index (MFI) was calculated using the total dissolved solids (TDS) data to predict the fouling of RO membrane. The result shows that the RO optimum operating pressure was 12 bar with the highest permeate flux was 0.75 L/m<sup>2</sup>.h and TDS removal was 95.90%. The integrated system of activated carbon adsorption and RO membrane showed the highest MFI of 65.64% at RO operating pressure of 10 bar.

**Keywords:** activated carbon, adsorption, fouling, produced water, reverse osmosis

## 1. PENDAHULUAN

Air terproduksi (*produced water*) mengandung ion logam dengan konsentrasi tinggi, bahan organik terlarut, bahan dengan sifat toksik, dan hidrokarbon, dengan padatan terlarut (TDS) yang tinggi (Alzahrani dan Muhammad, 2014, Al-Ghouti, dkk, 2019). Parameter acuan untuk kualitas air terproduksi yang akan dibuang ke lingkungan adalah COD, TDS, TSS, minyak dan lemak, pH, total amoniak dan sulfida terlarut (Permen LH No 19. 2010). Air terproduksi biasanya diinjeksikan kembali ke sumur minyak dan bila dibuang memerlukan pengolahan terlebih dahulu agar baku mutu dapat terpenuhi

Teknologi membran dapat dipilih menjadi metode pengolahan air dan air limbah yang mampu memenuhi karakteristik sesuai baku mutu. Teknologi membran juga beroperasi secara sederhana dengan tingkat efisiensi yang cukup tinggi. Proses pemisahan dengan membran dapat dilakukan secara kontinu dengan konsumsi energi relatif lebih rendah dibandingkan proses pemisahan lain.

*Pre-treatment* bertujuan untuk mengurangi potensi kontaminan penyebab *fouling* pada air limbah sebelum diolah lebih lanjut menggunakan membran. Salah satu metode *pre-treatment* yang sering dilakukan para peneliti adalah adsorpsi. Adsorpsi dapat dilakukan dengan bantuan adsorben seperti karbon aktif dari batok kelapa. Tahap *pre-treatment* diharapkan selain dapat mengurangi potensi *fouling*, juga dapat mencegah penurunan fluks *permeate*.

Terdapat beberapa indeks atau model untuk memprediksi kecenderungan *fouling* air umpan dari simulasi proses filtrasi yang telah dikembangkan. Model *fouling* seperti *Silt Density Index* (SDI), *Modified Fouling Index* (MFI), dan *Pore Blocking* telah banyak digunakan, namun model *fouling* yang paling sering diterapkan dalam sistem membran RO adalah SDI dan MFI (Schippers dkk, 2014, Salinas dkk, 2015, Garcia dkk, 2017, She dkk, 2019). MFI dapat ditentukan pada kondisi tekanan (P) atau fluks (I) konstan. MFI di bawah fluks konstan diukur dengan melibatkan kemiringan ( $\tan \theta$ ) yaitu bagian linier antar tekanan vs waktu (Jin dkk, 2018, Tong dkk, 2020).

Rahma, dkk (2018) telah mengamati pengaruh adsorpsi menggunakan karbon aktif sebagai *pre-treatment* untuk mengukur kerja membran UF tersulfon dalam pengolahan air gambut dengan pengujian nilai fluks. Nilai fluks dalam penelitian ini diamati setiap 5 menit selama 60 menit. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai fluks akan semakin menurun seiring semakin lamanya waktu operasi. Penurunan nilai fluks menjadi suatu indikator bahwa *fouling* semakin terbentuk pada permukaan membran.

Dalam penelitian tersebut juga dilakukan analisis pemodelan yang tepat untuk memprediksi kecenderungan pembentukan *fouling* yang paling tepat. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *Modified Fouling Indeks* (MFI) merupakan pemodelan yang dapat menggambarkan proses hybrid adsorpsi-membran karena hasil pemodelan dengan MFI sesuai dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa ketika tekanan 1 bar kecenderungan terbentuknya *fouling* tersebut lebih tinggi dengan bukti nilai fluks yang rendah dalam kondisi operasi tekanan 1 bar.

Penelitian lain juga telah dilakukan oleh Ginting, dkk. (2016) mengenai pengaruh kombinasi proses *pre-treatment*, yaitu koagulasi-flokulasi terhadap kinerja membran *Reverse Osmosis* (RO) dalam mengolah air payau. Variabel yang digunakan dalam penelitian adalah konsentrasi koagulan PAC yaitu 50, 100, 150, 200, dan 250 mg/l air payau serta tekanan operasi membran RO 2, 4, 6 dan 8 bar. Pengukuran fluks dilakukan setiap 5 menit selama 60 menit untuk setiap variasi tekanan operasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses *pre-treatment* mampu membantu membran RO dalam mengolah air payau sehingga menghasilkan air dengan kualitas yang telah memenuhi baku mutu air minum. Hasil penelitian juga menyatakan bahwa *pre-treatment* mampu mengurangi beban kerja membran RO sehingga dapat memperpanjang usia (*life-time*) membran dan hasil proses kombinasi lebih baik dibandingkan dengan tanpa kombinasi proses *pre-treatment*.

Martini dan Elfidiyah (2019) juga telah melakukan penelitian untuk mengetahui kinerja membran *ultra-filtration* (UF) berbahan polimer dengan proses *pre-treatment* karbon aktif untuk mengolah limbah cair minyak kanola. Variasi dilakukan pada tekanan 1, 2 dan 3 bar dan waktu operasi 50, 100, 150, 200 dan 250 menit. Hubungan *fouling* dan fluks membran dianalisis untuk mengetahui bagaimana kinerja membran setelah proses dengan pemodelan Hermia. Hasil menunjukkan bahwa *pre-treatment* dengan karbon aktif pada penelitian ini mampu mengurangi potensi terbentuknya *fouling* pada permukaan membran UF. Selain itu, potensi *fouling* dalam penelitian ini dapat dikurangi dengan mengatur tekanan dan kecepatan untuk meningkatkan fluks *permeate* sehingga potensi *fouling* terbentuk kecil.

Penelitian yang telah dilakukan Cai, et al (2021) membandingkan pengaruh dua metoda *pre-treatment* yaitu *biofiltration*, *coagulation and microfiber filtration* (BCMF) dan *ultrafiltration* (UF) membran pada pengolahan *effluent* limbah cair pada Instalasi Pengolahan Limbah (IPAL) Shafdan sebelum dilanjutkan ke membran RO. Kadar BOD, TOC, dan *Modified Fouling Index* (MFI) diukur untuk memperkirakan potensi *biofouling*, *organic fouling*, dan *colloidal fouling* pada air umpan yang diolah untuk sistem RO. Hasil

menunjukkan bahwa proses *pre-treatment* BCMF memiliki dampak yang signifikan terhadap potensi *fouling*, tetapi tidak dapat menghasilkan *permeate* dan menurunkan potensi *fouling* RO sebaik proses *pre-treatment* dengan UF. BCMF menyebabkan koloid dan *bio-fouling* yang lebih parah.

Dalam penelitian ini, *pre-treatment* dilakukan dengan cara adsorpsi dengan menggunakan karbon aktif. Sampel limbah cair yang dipilih adalah limbah air terproduksi dari industri minyak dan gas. Pembaruan yang terdapat dalam penelitian ini yaitu adanya tahap analisis peningkatan efisiensi membran RO dilihat dari asumsi mekanisme *fouling* pemodelan MFI. Dalam penelitian ini, dilakukan uji perbandingan proses karbon aktif secara tunggal dan proses kombinasi karbon aktif dan membran RO. Selain itu, pengaruh tekanan (P) dan lama waktu filtrasi (t) terhadap profil fluks *permeate* juga diteliti. Parameter yang digunakan untuk menguji efektivitas dan efisiensi penggunaan membrane RO adalah TDS dan pH.

Karbon aktif dari batok kelapa dipilih sebagai adsorben karena pada karbon aktif jenis ini terdapat banyak mikropori sehingga lebih unggul untuk digunakan sebagai tahap *pre-treatment*. Model MFI dipilih karena lebih mewakili kondisi operasi membran RO (Garcia dkk, 2017). Nilai MFI didapatkan dengan cara mengetahui rasio waktu operasi dan volume *permeate* (t/V) sebagai fungsi kumulatif volume *permeate* pada masing-masing tekanan yang diujikan.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Kegiatan penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Separasi dan Purifikasi Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

### 2.1. Alat dan Bahan

Air terproduksi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari PT Pertamina Energi Tanjung Tiga di Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan. Air terproduksi tersebut dilakukan analisis terlebih dahulu sebelum melalui proses filtrasi. Parameter pengujian yang diterapkan pada penelitian ini meliputi pH dan TDS. Dua parameter ini dipilih untuk mempermudah indikasi *fouling* dengan MFI. Hasil analisis sampel awal disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil Analisis Awal Air Terproduksi

Parameter	Satuan	Hasil Analisis	Kadar Maksimum
TDS	mg/L	13700	4000
pH	-	8,4	6-9

Hasil analisis awal sampel air terproduksi tersebut mengacu pada Peraturan Men.LH No. 19

Tahun 2010 tentang Baku Mutu Air Limbah Kegiatan Eksplorasi dan Produksi Migas. Namun karena fokus penelitian ini hanya pada bagaimana memodelkan MFI, maka parameter yang diperiksa hanya TDS dan pH sampel.

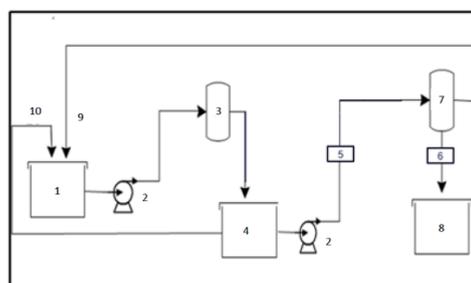
Sampel yang digunakan pada penelitian ini melewati pengolahan adsorpsi dengan karbon aktif sebagai tahap pengolahan awal (*pre-treatment*). Karbon aktif yang digunakan tersebut terlebih dahulu diayak hingga diperoleh ukuran 20 mesh. Pada tahap kedua, air terproduksi dilanjutkan dengan proses pengolahan menggunakan membran RO.

*Pre-treatment* air terproduksi bertujuan untuk mengurangi kontaminan partikel kasar yang tersebar dan berbagai konstituen air terproduksi sehingga dapat meminimalkan pembentukan *fouling* pada membran RO.

### 2.2. Metode

Skema pengolahan air terproduksi dengan membran RO skala laboratorium ditampilkan pada Gambar 1. Rancangan alat percobaan dibagi menjadi empat komponen utama yaitu tangki umpan air terproduksi, karbon aktif dalam *housing filter*, membran RO, dan tangki *permeate*. Sistem dilengkapi dengan *flow meter* untuk mengukur aliran yang masuk ke membran dan pengukur tekanan untuk mengukur tekanan aliran fluida yang keluar dari membran. *Filtrat* yang diperoleh dari kolom karbon aktif ditampung dalam tangki penampung, kemudian dipompakan menuju membran RO pada tekanan 10, 11, dan 12 bar dan hasilnya ditampung dalam tangki *permeate*. Volume yang diperoleh dalam interval 15 menit diukur untuk mendapatkan fluks *permeate*.

Hasil keluaran karbon aktif tersebut akan diambil sampelnya untuk dianalisis sebelum dilanjutkan ke rangkaian membran RO. Analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh perlakuan pendahuluan terhadap konsentrasi TDS. Karbon aktif diganti 3 kali untuk setiap perubahan tekanan operasi. Berat rata-rata karbon aktif yang digunakan adalah 420 gram.



**Gambar 1.** Skema Pengolahan Air Terproduksi

Keterangan :

- |                           |                            |
|---------------------------|----------------------------|
| 1) Tangki Air Terproduksi | 6) <i>Flow meter</i>       |
| 2) Pompa                  | 7) Membran RO              |
| 3) Activated Carbon       | 8) Tangki <i>Permeate</i>  |
| 4) Tangki Penampung       | 9) Aliran <i>Retentate</i> |
| 5) <i>Pressure Gauge</i>  | 10) Aliran <i>recycle</i>  |
- Dari kolom karbon aktif

Fluks *permeate* dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

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

Simbol J adalah fluks *permeate* (L/m<sup>2</sup>h), V adalah volume *permeate* (L), A adalah luas membran (m<sup>2</sup>) dan t adalah waktu (h).

*Fouling* membran RO yang terbentuk dari proses pengolahan air terproduksi pada penelitian ini dapat diprediksi pada level terkecil dan terbesar pada setiap tekanan operasi dengan menghitung *Modified Fouling Index* (MFI). MFI dapat dinyatakan sebagai grafik gradien linier hubungan antara t/V terhadap V (Garcia dkk, 2017).

Untuk menghitung laju alir (Q) *permeate* digunakan persamaan (2):

$$Q = \frac{\text{Volume Permeate}}{\text{Waktu}} \quad (2)$$

V merupakan volume tersaring dan t adalah waktu.

Untuk menghitung aliran *inverse* atau t/V digunakan persamaan berikut:

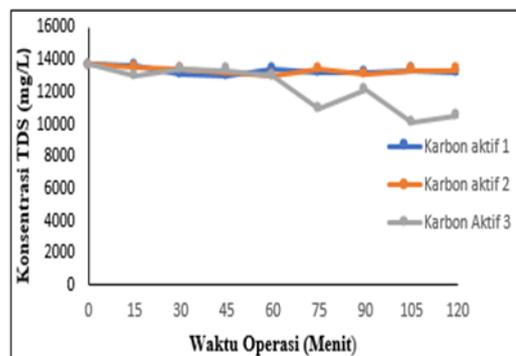
$$\text{Inverse Flow} = \frac{1}{Q} \quad (3)$$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Pengaruh *Pre-treatment* terhadap TDS

Setelah dilakukan proses adsorpsi dengan karbon aktif terjadi perubahan konsentrasi TDS, seperti terlihat pada Gambar 2. Nilai TDS dari hasil adsorpsi menggunakan karbon aktif mengalami penurunan tertinggi pada filtrat kolom karbon aktif ketiga pada tekanan operasi RO sebesar 12 bar dan waktu operasi 105 menit yaitu 10100 mg/L dengan persentase rejeksi sebesar 26,28%. Kemudian, konsentrasi TDS mengalami penurunan paling rendah pada karbon aktif pertama untuk tekanan 10 bar dan waktu operasi 15 menit dengan persentase rejeksi sebesar 0,73%.

Konsentrasi TDS pada keluaran karbon aktif pertama tidak menunjukkan hasil yang jauh berbeda dengan keluaran karbon aktif kedua. Namun, keluaran karbon aktif ketiga mengalami penurunan yang tinggi.

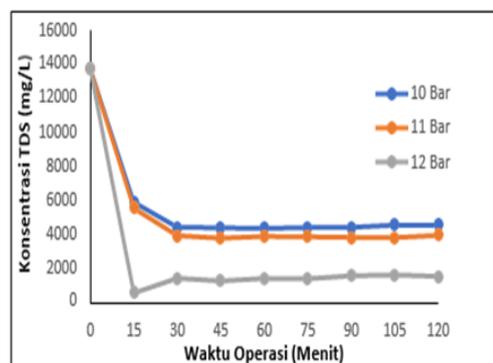


**Gambar 2.** Penurunan TDS pada karbon aktif 1 (untuk tekanan 10 bar), karbon aktif 2 (untuk tekanan 11 bar), dan karbon aktif 3 (untuk tekanan 12 bar) terhadap fungsi waktu

Rata-rata penurunan keluaran TDS *pre-treatment* cenderung rendah, yaitu pada kisaran 0,73 - 26,28%. Hal ini sesuai dengan Nandari, dkk (2018) yang menyatakan bahwa karbon aktif tidak terlalu efektif dalam menurunkan konsentrasi TDS air terproduksi karena cenderung hanya menyerap senyawa organik dan menghilangkan bau yang hasilnya tergantung pada kualitas air yang dihasilkan. karbon aktif tersebut.

#### 3.2. Pengaruh Tekanan dan Waktu Operasi Membran terhadap TDS

Pada Gambar 3. dapat dilihat hubungan antara tekanan dan waktu operasi membran terhadap perubahan konsentrasi TDS yang jauh lebih rendah dari keluaran karbon aktif.



**Gambar 3.** Konsentrasi TDS Karbon Aktif dan *Permeate* RO

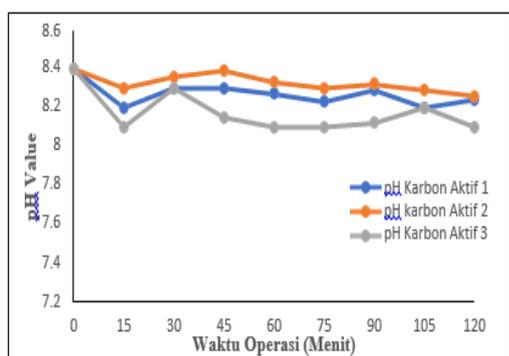
Konsentrasi TDS menurun secara signifikan pada kondisi operasi 12 bar. Namun penurunan TDS

di bawah tekanan 12 bar tertinggi terjadi pada waktu operasi 15 menit dengan persentase rejeksi sebesar 95,90% mencapai 562 mg/L, dan penurunan konsentrasi TDS terendah pada waktu operasi 105 menit dengan persentase penolakan sebesar 88,18%. Menurut teori, penurunan konsentrasi TDS tertinggi seharusnya terjadi pada waktu operasi terlama, yaitu 120 menit. Hal ini dapat terjadi karena adanya komponen karbon aktif yang terlarut dan terbawa aliran air terproduksi setelah waktu operasi 15 menit saat melewati membran RO sehingga dapat meningkatkan nilai TDS (Meilani et al., 2017).

Berdasarkan hasil yang diperoleh, semakin tinggi tekanan operasi membran yang digunakan maka semakin tinggi pula penurunan konsentrasi TDS. Hal ini sesuai dengan penelitian Ginting dkk (2016) yang menyatakan bahwa membran lebih selektif jika dioperasikan dengan tekanan yang lebih tinggi sehingga nilai TDS yang dihasilkan dapat lebih kecil pada tekanan yang lebih tinggi.

### 3.3. Pengaruh *Pre-treatment* dan operasi Membran terhadap (pH)

Gambar 4. menunjukkan pengaruh adsorpsi karbon aktif terhadap nilai pH air terproduksi. Diketahui bahwa nilai pH air terproduksi setelah melewati karbon aktif yang diganti 3 kali relatif tidak berubah dari kondisi awal.

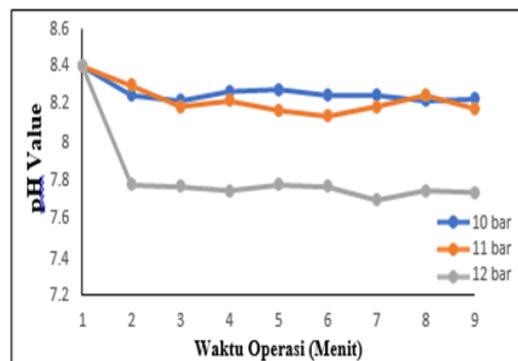


Gambar 4. Nilai pH Filtrat Proses Karbon Aktif

Nilai pH setelah melewati proses karbon aktif berkisar antara 8,1 hingga 8,4 yang cenderung bersifat basa. Terlihat bahwa karbon aktif tidak terlalu efektif untuk menurunkan pH air terproduksi. Hal ini disebabkan karena karbon aktif memiliki ukuran pori yang tidak terlalu rapat sehingga kandungan mineral alkali masih dapat lolos ketika dilakukan penyaringan.

Gambar 5. menunjukkan pengaruh kombinasi proses karbon aktif dan membran RO terhadap nilai pH. Laju *permeate* RO menurun pada setiap variasi tekanan dengan meningkatnya waktu operasi. Tekanan operasi sebesar 10 bar dan 11 bar menghasilkan *permeate* dengan nilai pH yang relatif lebih rendah pada kisaran yang sama yaitu 8,1-8,4.

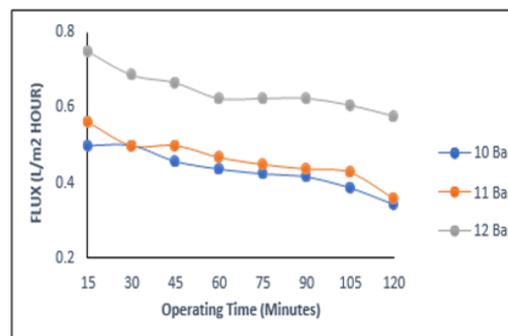
Pada tekanan membran 12 bar, nilai pH relatif menurun jauh dari kondisi pH awal, yaitu pada kisaran 7,71 – 7,78. Nilai pH mengalami penurunan karena membran RO mampu menyaring kandungan mineral alkali pada air terproduksi sehingga menyebabkan pH air terproduksi turun (Hyung-gyu dan Young-Nam, 2018).



Gambar 5. Nilai pH keluaran Proses Karbon Aktif dan Membran RO

### 3.4. Hasil Analisis Fluks Membran

Gambar 6. menunjukkan pengaruh waktu dan tekanan terhadap nilai fluks *permeate*. Nilai fluks pada setiap tekanan berbeda. Rentang nilai fluks tertinggi terjadi pada tekanan 12 bar, dan rentang nilai fluks terendah terjadi pada tekanan 10 bar.



Gambar 6. *Permeate* Flux terhadap Waktu dan Tekanan

Secara umum, peningkatan tekanan operasi akan menyebabkan peningkatan fluks *permeate*. Kenaikan tekanan operasi proses membran RO pada penelitian ini berbanding lurus dengan kenaikan nilai fluks. Tekanan yang tinggi akan mendorong cairan lebih cepat melalui pori-pori membran sehingga meningkatkan nilai fluks. Namun peningkatan fluks akan menyebabkan potensi *fouling* pada membran

Nilai fluks menurun seiring dengan meningkatnya waktu operasi. Penurunan fluks adalah salah satu cara identifikasi terjadinya *fouling* pada permukaan membran. *Fouling* terbentuk karena adanya partikel yang terdeposisi di permukaan membran ketika melewatkan air umpan

yang dihasilkan. Nilai fluks dan kemungkinan terjadinya *fouling* pada membrane berbanding terbalik; jika nilai fluks menurun, maka *fouling* meningkat, dan sebaliknya.

Nilai fluks tidak selalu menurun secara linier selama periode pengamatan karena adanya titik jenuh. Ketika mencapai titik jenuh atau kondisi batas kemampuan membran untuk menyaring kontaminan, nilai fluks akan cenderung landai. Pada penelitian ini dapat dilihat pada nilai fluks tekanan 10 bar dan 11 bar yang mulai menunjukkan nilai fluks yang landai.

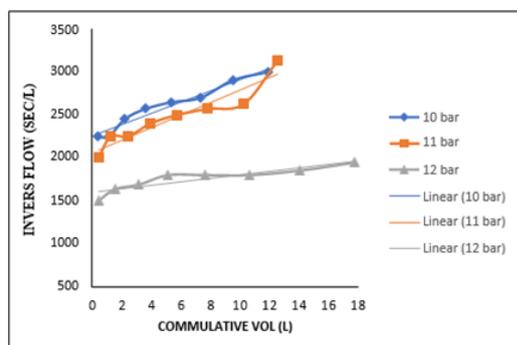
### 3.5. Analisis Fouling Membran RO dengan MFI

Tabel 2. menunjukkan hasil pemodelan *fouling* membran RO pada variasi tekanan 10 bar, 11 bar dan 12 bar selama waktu operasi 120 menit.

**Tabel 2.** Nilai MFI pada berbagai Tekanan

Tekanan (Bar)	MFI (s/L <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup>
10	65,65	0,96
11	59,44	0,89
12	20,56	0,82

Dari tabel tersebut diketahui bahwa nilai MFI tertinggi pada kondisi operasi membran dengan tekanan operasi 10 bar adalah 65,65 s/L<sup>2</sup>.



**Gambar 7.** Rasio Waktu dan Volume Permate (t/V) sebagai Fungsi dari Volume Permate Kumulatif (V) pada berbagai Tekanan

Hal ini sesuai dengan Rahma, dkk (2018) yang menyatakan bahwa nilai MFI akan mempunyai nilai yang berbanding lurus terhadap pembentukan *fouling*, yaitu semakin besar gradien MFI maka semakin besar juga peluang terbentuknya *fouling*, ataupun juga sebaliknya

Berdasarkan hasil pada penelitian ini, model MFI dapat digunakan untuk mengetahui potensi *fouling* yang terjadi pada proses gabungan adsorpsi dan membran RO pada pengolahan air terproduksi. Adanya adsorben sebagai tahap *pre-treatment* menghambat pembentukan *fouling* pada membran RO.

## 4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa *pre-treatment* dengan karbon aktif memiliki kemampuan rejeksi TDS yang rendah, sehingga tidak banyak berpengaruh dalam mengurangi potensi *fouling* pada membran RO. Kondisi optimum dicapai pada tekanan membran 12 bar dengan waktu operasi 15 menit, nilai fluks *permeate* sebesar 0,75 L/m<sup>2</sup>h dan TDS rejeksi tertinggi 95,90 %. Kadar TDS dan pH *permeate* RO telah memenuhi baku mutu air limbah untuk tekanan operasi sebesar 11 dan 12 bar. Fluks *permeate* menurun dengan meningkatnya waktu operasi pada tekanan konstan akan meningkatkan potensi terjadinya *fouling*. *Modified Fouling Index* (MFI) mampu menggambarkan potensi terbentuknya *fouling* pada proses, tekanan 10 bar memiliki potensi *fouling* yang tinggi dengan nilai MFI sebesar 65,64 s/L<sup>2</sup>.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Ghouthi, M., Al-Khaabi, M.A., Ashfaq, M.Y., dan Da'na, D.A. 2019. Produced Water Characteristics, Treatment and Reuse: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 28: 222-239.
- Alzahrani, S., dan Mohammad, A. W. 2014. Challenges and Trends in Membrane Technology Implementation for Produced Water Treatment: A Review. *Journal of Water Process Engineering*, 4: 107-133.
- Cai, Y., Galili, N., Herzberg, M., dan Gilron, J. 2021. Evaluating The Impact of Pretreatment Processes on Fouling of Reverse Osmosis Membrane by Secondary Wastewater. *Journal of Membrane Science*.
- Garcia, A.R., Martel, N.M., dan Nuez, I. 2017. Short Review on Predicting Fouling in RO Desalination. *Journal Membranes*, 7(62): 1-17.
- Ginting, S. S., Pinem, J. A., dan Irianty, R. S. 2016. Pengaruh Kombinasi Proses Pretreatment (Koagulasi-Flokulasi) dan Membran Reverse Osmosis untuk Pengolahan Air Payau. *Jurnal FTEKNIK*, 3(2): 1-7.
- Hyung-gyu, P., dan Young-nam, K. 2018. Investigation on the Factors Determining Permeate pH In Reverse Osmosis Membrane Processes. *Journal Desalination*. 147-158.
- Jin, Y., Hyunkyung, L., Chanyuk, P., Seungkhwan, H. 2018. ASTM Standard Modified Fouling Index for Seawater Reverse Osmosis Desalination Process: Status, Limitations, and Perspectives. *Separation and Purification Reviews*, 1-13.
- Martini, S., dan Elfidiyah. 2019. Pengolahan Limbah Cair Minyak Kanola Menggunakan Kombinasi

- Adsorpsi dan Membran Ultrafiltrasi Polimer. *Jurnal Kinetika*. 10(02): 36-41.
- Meilani., Syafalni, S., Santoso, Y., dan Malau, G. 2017. Rainwater Quality Improvement Using Zeolite, Activated Carbon, Limestone and Preheated 400oC Limestone. *MATEC Web Of Conferences (SICEST 2016), EDP Sciences*.
- Nandari, W.W., Yogafanny, E., dan Kristiari, M.T. 2018. Pengolahan Air Terproduksi dengan Membran Bioreaktor di Wilayah Penambangan Wonocolo. *Jurnal Eksergi*. 15(2): 34-40.
- Permen LH No 19. 2010. Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Minyak dan Gas Serta Panas Bumi.
- Rahma, A., Mahmud, M., dan Abdi, C. 2018. Pengaruh Pra-Perlakuan Adsorpsi Karbon Aktif terhadap Fouling Membran Ultrafiltrasi Polisulfon (UF-PSf) pada Penyisihan Bahan Organik Alami (BOA) Air Gambut. *Jurnal JTAM*, 1(2): 1-15.
- Salinas, S. G., Amy, G. L., Schippers, J. C., dan Kennedy, M. D. 2015. The Modified Fouling Index Ultrafiltration Constant Flux for Assessing Particulate/Colloidal Fouling of RO Systems. *Journal of Desalination*. 365: 79-91.
- Schippers, J. C., Rodriguez, S. G. S., dan Kennedy, M. D. 2014. Why MFI is Edging SDI as a Fouling Index. *Journal of Desalination and Water Reuse*, 2: 28-32.
- Shalahuddin, I., dan Wibisono, Y. 2019. Mekanisme Fouling pada Membran Mikrofiltrasi Mode Aliran Searah dan Silang. *Jurnal Rekayasa Proses*, 13(1): 6-15.
- She, Q., Wan.g, R., Fane, A.G., dan Tang, C.Y. 2016. Membrane Fouling in Osmotically Driven Membrane Processes: A Review. *Journal Membrane Sci*. 499: 201–233.
- Tong, X., Wua, Y. H., Wanga, Y. H., Baia, Y., Zhaoa, H. H., Luoa, L. W. Maoa, Y., Ikunob, N., dan Hua, H. Y. 2020. Simulating and Predicting the Flux Change of Reverse Osmosis Membranes Over Time during Wastewater Reclamation caused by Organic Fouling. *Environment International*. 140: 1-11.