

# Regenerasi Kinerja Fluks Membran PVDF Ultrafiltrasi Menggunakan Kombinasi Asam Sitrat & H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Dalam Pengolahan Air Sungai Jagir

Kresna Setyawan Adhi Pamungkas, Muhammad Abdus Salam Jawwad\*

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

\*Koresponden email: muhammad.abdus.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 20 November 2025

Disetujui: 24 November 2025

## Abstract

Polyvinylidene fluoride (PVDF)-based ultrafiltration membranes are widely used because they can remove suspended and dissolved contaminants from water. However, fouling remains a major challenge, causing flux reduction and shortening the lifespan of the membrane. This study evaluated the performance of PVDF membranes when filtering Jagir River water, and assessed the effectiveness of stepwise washing with citric acid (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>) and hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Experiments were conducted at operating pressures of 1, 1.5 and 2 bar. Membrane flux was measured under four operating conditions: initial flux using distilled water (Jw<sub>1</sub>); river water flux before washing; flux using distilled water after washing (Jw<sub>2</sub>); and river water flux after washing. The results showed that Jw<sub>1</sub> increased with increasing pressure, reaching a maximum value at 2 bar. However, river water filtration caused a significant decrease in flux due to fouling. Stepwise chemical washing partially recovered the flux, as indicated by the increases in Jw<sub>2</sub> and river water flux after washing. However, full recovery was limited by irreversible fouling. The highest Flux Recovery Ratio (FRR) value was obtained at 2 bar with a 6 wt% washing solution, indicating that the combination of high pressure and chemical treatment provides optimal performance recovery. Overall, the PVDF membrane can be effectively regenerated using citric acid and hydrogen peroxide; however, organic and inorganic mixed fouling limits total flux recovery.

**Keywords:** PVDF, ultrafiltration, fouling, flux recovery, chemical cleaning

## Abstrak

Membran ultrafiltrasi berbasis *Polyvinylidene Fluoride* (PVDF) banyak diterapkan karena kemampuannya dalam menghilangkan kontaminan tersuspensi dan terlarut dalam air. Namun, fouling tetap menjadi tantangan utama yang menyebabkan penurunan fluks dan memperpendek umur pakai membran. Penelitian ini mengevaluasi kinerja membran PVDF dalam menyaring air Sungai Jagir serta menilai efektivitas pencucian bertahap menggunakan asam sitrat (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>) dan hidrogen peroksida (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Percobaan dilakukan pada tekanan operasi 1 bar, 1,5 bar, dan 2 bar. Fluks membran diukur pada empat kondisi operasional, meliputi fluks awal menggunakan aquadest (Jw<sub>1</sub>), fluks air sungai sebelum pencucian, fluks menggunakan aquadest setelah pencucian (Jw<sub>2</sub>), dan fluks air sungai setelah proses pencucian. Hasil menunjukkan bahwa Jw<sub>1</sub> meningkat seiring bertambahnya tekanan dan mencapai nilai maksimum pada 2 bar, sementara filtrasi air sungai menyebabkan penurunan fluks yang signifikan akibat fouling. Pencucian kimia bertahap memulihkan sebagian fluks, yang ditunjukkan oleh peningkatan Jw<sub>2</sub> dan fluks air sungai setelah pencucian, meskipun pemulihan penuh terbatas oleh fouling irreversible. Nilai *Flux Recovery Ratio* (FRR) tertinggi diperoleh pada 2 bar dengan larutan pencuci 6 wt%, menunjukkan pemulihan kinerja yang optimal di bawah kombinasi tekanan tinggi dan perlakuan kimia. Secara keseluruhan, membran PVDF dapat diregenerasi secara efektif menggunakan asam sitrat dan hidrogen peroksida, tetapi fouling campuran organik dan anorganik membatasi pemulihan fluks secara total.

**Kata Kunci:** PVDF, ultrafiltrasi, fouling, pemulihan fluks, pencucian kimia

## 1. Pendahuluan

Pencemaran air tetap menjadi isu lingkungan penting, terutama di kawasan perkotaan, karena dapat menurunkan kualitas air permukaan dan berdampak pada keberlanjutan sumber daya air (Farhan et al., 2023). Untuk menjaga ketersediaan air bersih, berbagai teknologi filtrasi telah dikembangkan, salah satunya membran ultrafiltrasi berbasis *Polyvinylidene Fluoride* (PVDF). Membran PVDF efektif menyaring partikel tersuspensi dan senyawa terlarut, namun kinerjanya cenderung menurun seiring waktu akibat fouling, yaitu akumulasi zat organik dan anorganik di permukaan dan pori membran [1].

Fouling pada membran dapat menyebabkan penurunan fluks, peningkatan tekanan operasi, serta peningkatan biaya operasional [2]. Oleh karena itu, regenerasi membran melalui metode pencucian menjadi langkah penting untuk memulihkan kinerja membran dan memperpanjang masa pakainya. Salah satu metode yang efektif adalah pencucian bertahap menggunakan asam sitrat ( $C_6H_8O_7$ ) dan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ). Asam sitrat ( $C_6H_8O_7$ ) berperan sebagai agen chelating untuk menghilangkan endapan anorganik, sedangkan  $H_2O_2$  bekerja sebagai oksidator kuat untuk degradasi fouling organik [3], [4]. Kombinasi kedua zat ini diharapkan mampu memulihkan fluks membran secara optimal.

Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan dalam pengolahan air adalah membran ultrafiltrasi berbasis *Polyvinylidene Fluoride* (PVDF). Membran PVDF efektif menyaring partikel tersuspensi dan senyawa terlarut karena memiliki ukuran pori yang sangat kecil, hingga  $0,01 \mu m$  [5]. Namun, kinerja membran cenderung menurun akibat terjadinya fouling, yaitu penumpukan zat padat, bahan organik, dan anorganik di permukaan membran yang menghambat aliran air [6]. Oleh karena itu, diperlukan upaya regenerasi membran untuk memulihkan performanya agar dapat digunakan kembali secara efisien.

Metode pencucian bertahap menggunakan asam sitrat ( $C_6H_8O_7$ ) dan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) telah terbukti mampu mengembalikan kinerja membran melalui penghilangan fouling organik dan anorganik. Asam sitrat ( $C_6H_8O_7$ ) bekerja sebagai agen pembersih anorganik dengan kemampuan mengikat logam sedangkan  $H_2O_2$  berfungsi sebagai oksidator kuat untuk degradasi bahan organik yang menempel pada pori membran [7], [8]. Kombinasi kedua bahan tersebut diharapkan dapat meningkatkan efektivitas proses regenerasi membran secara signifikan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi penurunan fluks membran PVDF selama filtrasi air sungai dan menilai efektivitas pencucian menggunakan kombinasi asam sitrat ( $C_6H_8O_7$ ) dan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) melalui analisis fluks dan *Flux Recovery Ratio* (FRR) pada variasi tekanan operasi.

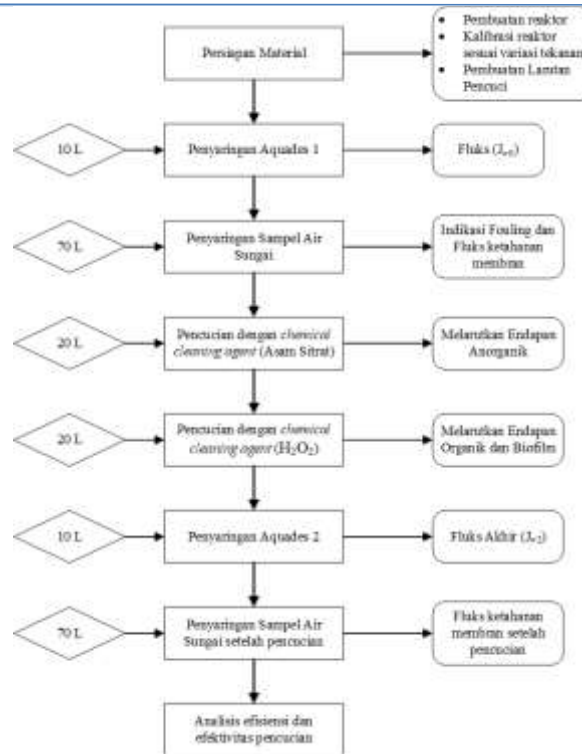
## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Material

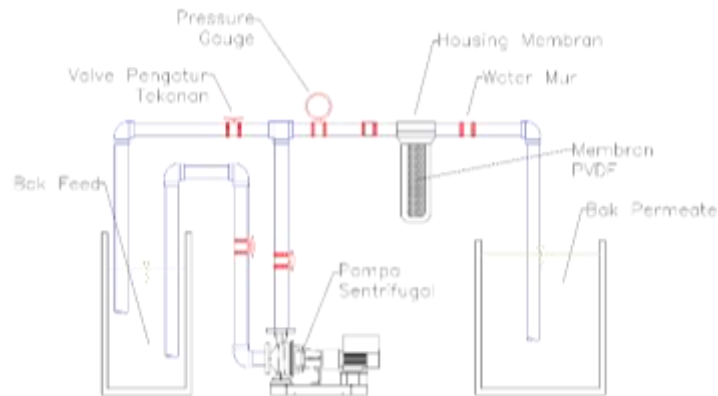
Bahan dan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi asam sitrat ( $C_6H_8O_7$ ), hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) 50%, aquadest sebagai pengencer larutan pembersih membran, air Sungai Jagir sebagai sampel uji, membran ultrafiltrasi PVDF *hollow fiber* dengan luas efektif  $0,2871 m^2$ , pompa sentrifugal dengan spesifikasi *Max Head* 35 meter dan *Max Capacity* 38 liter/min, neraca analitik, tangki penyimpanan, dan gelas beker.

### 2.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini diawali dengan persiapan material berupa reaktor filtrasi serta larutan *chemical cleaning agent* yaitu asam sitrat ( $C_6H_8O_7$ ) dan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ). Membran terlebih dahulu diuji menggunakan aquades untuk memperoleh fluks awal ( $J_{w2}$ ) pada tiga variasi tekanan operasi yaitu 1 bar, 1,5 bar dan 2 bar. Kemudian digunakan untuk menyaring 70 L air sungai sebagai proses induksi fouling. Setelah terjadi penurunan kinerja, membran dicuci bertahap menggunakan larutan asam sitrat ( $C_6H_8O_7$ ) dan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) dengan variasi dosis pencucian yaitu 0 wt%, 2 wt%, 4 wt%, dan 6 wt% dengan volume masing-masing sebanyak 20 L untuk meluruhkan fouling organik, anorganik, serta mikroba. Selanjutnya membran diuji kembali dengan aquades untuk memperoleh fluks setelah pencucian ( $J_{w2}$ ), kemudian dilakukan penyaringan ulang air sungai sebanyak 70 L untuk menguji *reusabilitas* membran. Tahap akhir berupa analisis *Flux Recovery Ratio* (FRR%) sebagai indikator keberhasilan pemulihan kinerja membran dibandingkan kondisi awal dan pasca fouling. Berikut merupakan rangkaian proses penyaringan air Sungai Jagir ditampilkan pada **Gambar 2**. Sementara **Tabel 1** menunjukkan skema pengkodean untuk sampel membran berdasarkan tekanan operasi dan konsentrasi agen pembersih kimia.



Gambar 1. Flow Chart Prosedur Penelitian  
Sumber: Hasil Analisis



Gambar 2. Rangkaian Proses Penyaringan Air Sampel  
Sumber: Hasil Analisis

Tabel 1. Kode Sampel Penelitian

Tekanan Operasi (Bar)	Dosis Chemical Cleaning Agent (wt%)	Kode Sampel
1	0	M1.0
	2	M1.2
	4	M1.4
	6	M1.6
1,5	0	M1,5.0
	2	M1,5.2
	4	M1,5.4
	6	M1,5.6
2	0	M2.0
	2	M2.2
	4	M2.4
	6	M2.6

Sumber: Hasil Analisis

### 2.3 Fluks Membran

Fluks bertujuan untuk menentukan volume air signifikan yang dihasilkan oleh membran dibandingkan dengan suplai air yang masuk. Perhitungan fluks dilakukan dengan membagi volume aliran permeat (V) terhadap waktu (t) pada laju konstan dengan luas permukaan membran (A). Adapun perhitungan nilai fluks membran menggunakan persamaan yang digunakan oleh Fathanah et al., 2021 pada persamaan (1).

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

- J = Fluks (L/m<sup>2</sup>. Jam)
- V = Volume permeat (L)
- A = Luas permukaan (m<sup>2</sup>)
- t = Waktu (Jam)

### 2.4 Flux Recovery Ratio (FRR)

*Flux recovery ratio* (FRR) menggambarkan kemampuan membran untuk mengembalikan fluks air murni ke kondisi awal setelah mengalami penurunan akibat akumulasi fouling organik dan anorganik. Nilai FRR yang tinggi menunjukkan proses pembersihan yang efektif dan fouling yang bersifat *reversible*, sedangkan nilai FRR yang rendah mengindikasikan adanya fouling yang sulit dihilangkan atau bersifat *irreversible* [10]. FRR dihitung menggunakan persamaan yang digunakan oleh Fathurrahman et al., (2021), sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2).

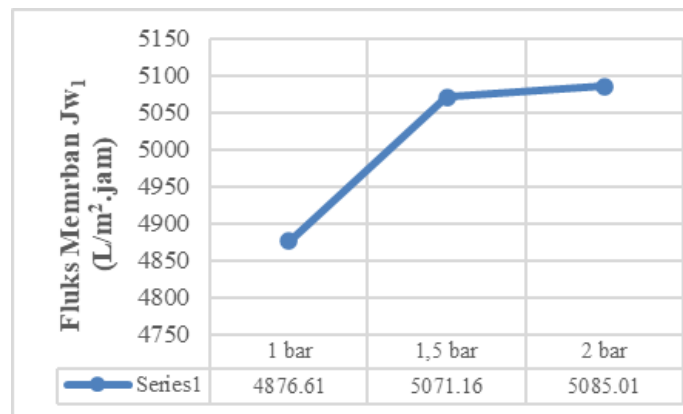
$$FRR (\%) = \left( \frac{J_{w1}}{J_{w2}} \right) \times 100 \quad (2)$$

- FRR = Persentase pemulihan fluks setelah proses pembersihan (%)
- J<sub>w1</sub> = Fluks air murni sebelum pencucian (L/m<sup>2</sup>.jam)
- J<sub>w2</sub> = Fluks air murni setelah pencucian (L/m<sup>2</sup>.jam)

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Kinerja Fluks Membran Selama Siklus Operasional Sebelum Pencucian

Fluks awal membran (J<sub>w1</sub>) diperoleh dari pengukuran menggunakan aquades sebelum membran digunakan untuk filtrasi air sungai. Nilai ini menunjukkan kinerja dasar membran dalam kondisi bersih, tanpa adanya fouling.

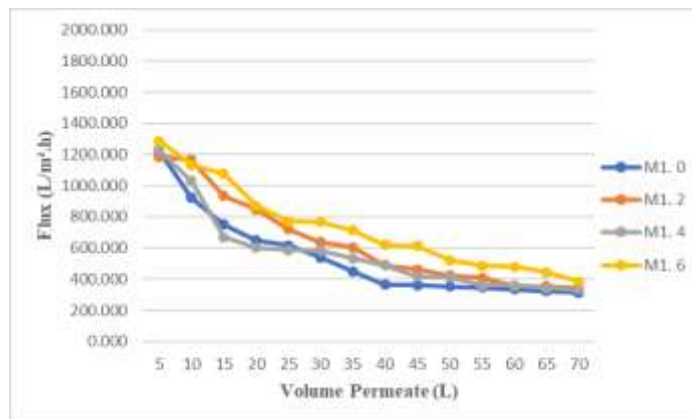


Gambar 3. Fluks Awal Membran baru Menggunakan Aquades  
Sumber: Hasil Analisis

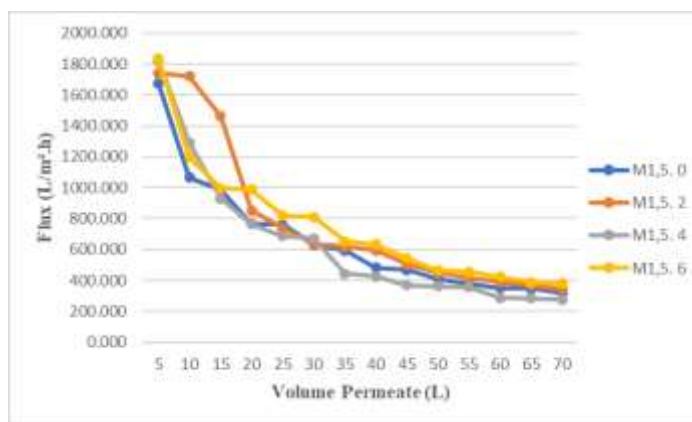
Pada Gambar 3 terlihat bahwa nilai fluks awal membran menggunakan aquades meningkat seiring tekanan operasi, dengan nilai tertinggi 5085,01 L/m<sup>2</sup>.jam pada tekanan 2 bar dan nilai terendah 4876,61 L/m<sup>2</sup>.jam pada tekanan 1 bar. Nilai tersebut menunjukkan bahwa membran masih berada pada kondisi ideal, di mana tidak terdapat hambatan aliran akibat fouling maupun penumpukan partikel. Dengan demikian, fluks awal ini menggambarkan performa intrinsik membran dalam kondisi bersih dan optimal.

Nilai tersebut menunjukkan bahwa nilai fluks awal ini memberikan gambaran kinerja membran dalam kondisi optimal, tanpa adanya fouling. Nilai J<sub>w1</sub> menjadi acuan untuk menilai penurunan kinerja

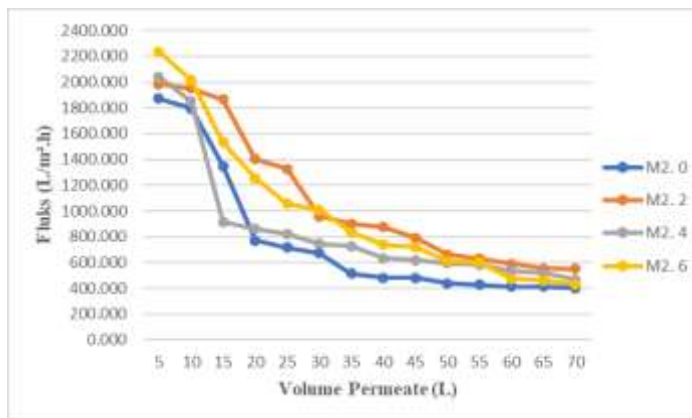
membran saat digunakan menyaring air sungai dan juga sebagai dasar perhitungan *Flux Recovery Ratio* (FRR) setelah pencucian.



(a)



(b)



(c)

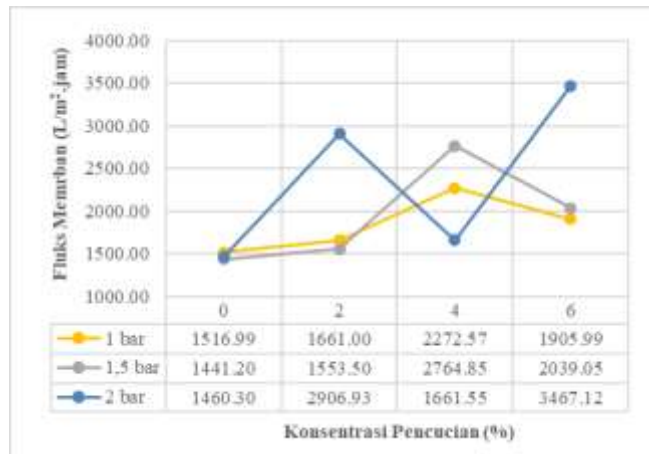
**Gambar 4.** Fluks Membran Menggunakan Air Sampel Sungai Jagir Sebelum Pencucian: (a) Tekanan 1 bar, (b) Tekanan 1,5 bar, (c) Tekanan 2 bar  
Sumber: Hasil Analisis

Sementara itu untuk nilai fluks membran menggunakan air sampel Sungai Jagir yang ditunjukkan pada **Gambar 4**. Fluks membran diukur selama proses filtrasi 70 liter sampel air sungai untuk mengetahui penurunan kinerja akibat fouling alami. Pada tekanan 1 bar dihasilkan nilai fluks sebesar 1287.294 L/m<sup>2</sup>.jam pada sampel M1. 6, dan tekanan 1,5 bar dihasilkan nilai fluks sebesar 1833.612 L/m<sup>2</sup>.jam pada sampel M1,5. 6. Hasil terbaik ditunjukkan pada tekanan operasi 2 bar dengan nilai fluks tertinggi yaitu sebesar 2237.374 L/m<sup>2</sup>.jam pada sampel M2. 6, namun tetap mengalami penurunan setelah beberapa partikel menyumbat pori membran.

Hal ini membuktikan bahwa meskipun peningkatan tekanan memperbesar gaya dorong filtrasi, akumulasi partikel tersuspensi, senyawa organik, dan mikroba yang menyebabkan *pore blocking* dan pembentukan *cake layer* justru menurunkan permeabilitas membran dan menghasilkan penurunan fluks. [12], [13]. Perbandingan nilai fluks awal antara aquades dan air sungai menunjukkan bahwa semakin kompleks kualitas air feed maka semakin besar resistansi yang dibentuk pada permukaan membran, sehingga fluks awal mengalami penurunan meskipun tekanan tetap meningkat.

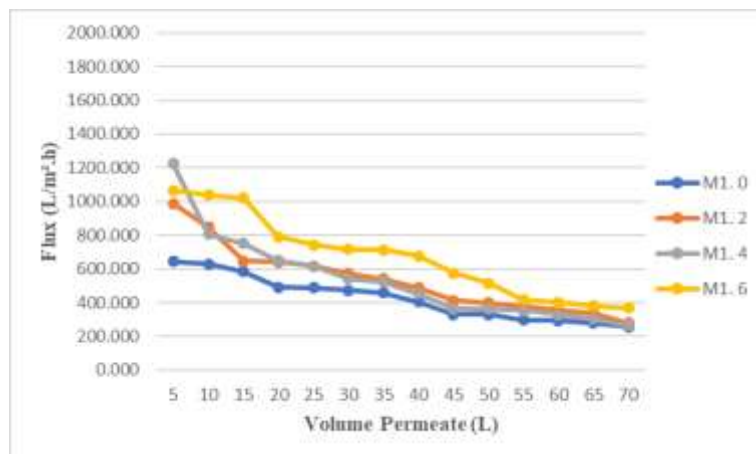
### 3.2 Kinerja Fluks Membran Selama Siklus Operasi Setelah Pencucian

Setelah pencucian bertahap menggunakan asam sitrat dan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, fluks membran diuji kembali menggunakan aquades.

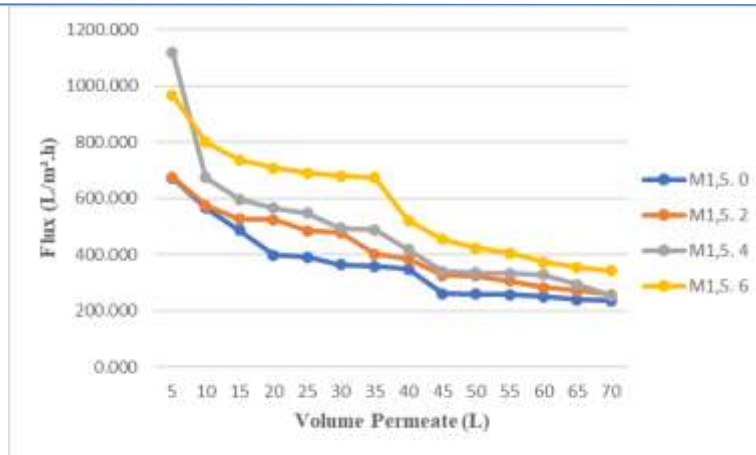


**Gambar 5.** Fluks Awal Membran Menggunakan Aquades Setelah Pencucian  
 Sumber: Hasil Analisis

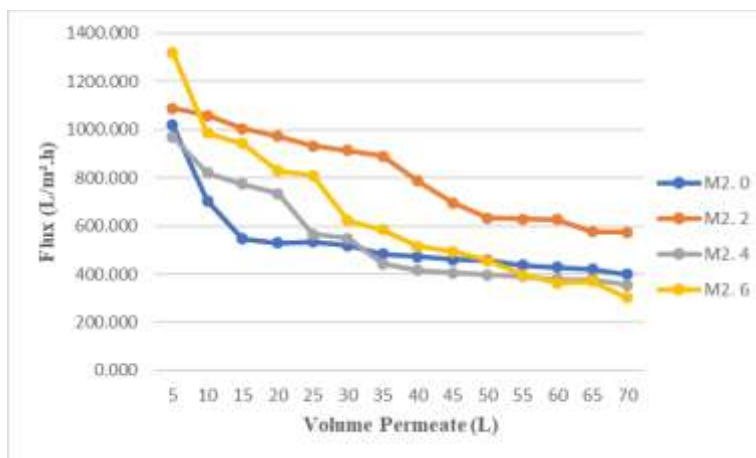
Hasil grafik pada **Gambar 5** menunjukkan peningkatan fluks dibandingkan kondisi awal sebelum digunakan menyaring air sampel, mendekati fluks awal membran bersih ( $J_{w1}$ ). Tekanan 2 bar dengan dosis pencucian 6 wt% menghasilkan fluks tertinggi pasca pencucian, menunjukkan bahwa pencucian berhasil menghilangkan fouling *reversible* dengan nilai 3467,12 L/m<sup>2</sup>.jam. Nilai ini menjadi dasar perhitungan *Flux Recovery Ratio* (FRR) untuk menilai efektivitas pencucian.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 6.** Fluks Membran Menggunakan Air Sampel Sungai Jagir Setelah Pencucian: (a) Tekanan 1 Bar, (b) Tekanan 1,5 Bar, (c) Tekanan 2 Bar

Sumber: Hasil Analisis

Hasil fluks membran saat menyaring air sampel setelah pencucian juga menurun dibandingkan dengan kondisi awal pada saat membran baru menyaring air sampel. Penurunan ini berkaitan dengan fouling *irreversible* yang masih tersisa pada permukaan dan pori membran, sehingga permeabilitas tidak pulih sepenuhnya meskipun telah dilakukan pencucian kimia [14].

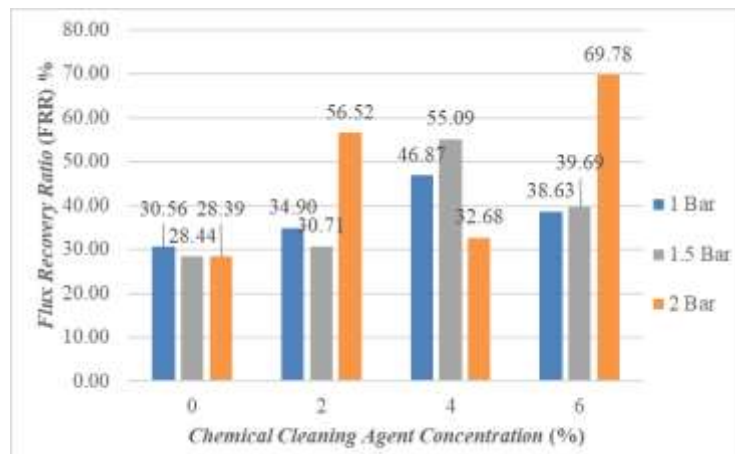
Pada Tekanan 1 bar dan 1,5 bar, nilai awal fluks membran mencapai 1223,48 L/m<sup>2</sup>.jam dan 1119,086 L/m<sup>2</sup>.jam pada variasi dosis pencucian pada sampel M1. 4 dan M1,5. 4. Tekanan 2 bar menghasilkan fluks tertinggi pasca pencucian dengan nilai 1098,78 L/m<sup>2</sup>.jam, pada sampel M2. 6, menunjukkan bahwa kombinasi asam sitrat (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>) dan hidrogen peroksida (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) berhasil menghilangkan sebagian besar fouling *reversible* sehingga permeabilitas membran kembali meningkat. Nilai ini mendekati lebih dari 50% dari fluks awal membran ketika pertama kali menyaring air sampel sebelum fouling terjadi.

Perbedaan nilai fluks antar tekanan menunjukkan bahwa efektivitas pemulihan fluks dipengaruhi oleh tekanan operasi. Tekanan yang lebih tinggi memberikan dorongan filtrasi yang lebih besar sehingga permeat mengalir lebih cepat dan pori membran terbuka lebih optimal setelah pencucian. Namun demikian, fluks tetap tidak dapat kembali ke kondisi awal, menandakan bahwa sebagian fouling bersifat *irreversible* dan tidak terangkat oleh proses pencucian, sehingga masih membatasi kapasitas permeasi membran. Hasil ini menegaskan bahwa efektivitas pencucian tergantung pada tekanan operasi, di mana tekanan lebih tinggi mempercepat aliran permeat dan pemulihan fluks, meskipun fouling *irreversible* tetap membatasi fluks maksimal yang dapat dicapai.

### 3.3 Efektivitas Pencucian Berdasarkan Nilai Flux Recovery Ratio (%)

*Flux recovery ratio* (FRR) digunakan untuk menilai efektivitas pencucian membran dalam mengembalikan fluks ke kondisi awal. FRR dihitung berdasarkan perbandingan fluks pasca pencucian

menggunakan aquades ( $J_{w2}$ ) terhadap fluks awal membran bersih ( $J_{w1}$ ). Hasil perhitungan *flux recovery ratio* (FRR) ditunjukkan pada **Gambar 7**.



**Gambar 7.** Nilai *Flux Recovery Ratio* (FRR)

Berdasarkan hasil analisis *flux recovery ratio* (FRR) pada berbagai tekanan operasi yang ditunjukkan pada **Gambar 7**, terlihat bahwa efektivitas proses pencucian masih belum optimal. Nilai FRR tertinggi dicapai pada tekanan 2 bar, yaitu sebesar 69,78% dengan dosis chemical cleaning agent 6 wt% pada masing-masing larutan pencuci.

Perbedaan efektivitas pencucian menunjukkan bahwa kombinasi asam sitrat ( $C_6H_8O_7$ ) dan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) belum sepenuhnya mampu menghilangkan fouling pada seluruh kondisi operasi. Asam sitrat bekerja melarutkan fouling anorganik melalui mekanisme kelasi, di mana ion sitrat mengikat ion logam seperti  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , dan  $Fe^{3+}$  sehingga deposit scaling dapat terlarut [15]. Sementara itu,  $H_2O_2$  bertindak sebagai oksidator yang menguraikan foulant organik dan biofilm melalui pembentukan radikal hidroksil ( $\cdot OH$ ), dan bersifat ramah lingkungan karena terdekomposisi menjadi  $H_2O$  dan  $O_2$  [4], [16].

Kombinasi kedua reaksi tersebut membuat pencucian kimia lebih efektif dibandingkan pencucian tanpa bahan kimia. Namun, nilai FRR yang tidak mencapai 100% menunjukkan bahwa sebagian fouling bersifat *irreversible*, sehingga tidak dapat dihilangkan meskipun telah dilakukan kombinasi kimia. Kondisi ini menandakan perlunya optimasi konsentrasi, waktu kontak, dan frekuensi pencucian agar pemulihan fluks dapat lebih maksimal pada siklus berikutnya.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa membran PVDF ultrafiltrasi masih dapat dipulihkan setelah terjadi fouling, dibuktikan oleh kenaikan fluks dan nilai FRR setelah pencucian. Pencucian kimia menggunakan asam sitrat ( $C_6H_8O_7$ ) dan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) memberikan pemulihan tertinggi pada tekanan 2 bar dengan konsentrasi larutan pencuci 6 wt% dibandingkan tanpa bahan kimia, karena mampu menghilangkan endapan organik dan mikroba pada permukaan membran. Tekanan 2 bar menghasilkan fluks pasca pencucian paling besar dan mendekati kondisi awal dengan nilai 2237,374 L/m<sup>2</sup>.jam menjadi 1098,78 L/m<sup>2</sup>.jam. Hal tersebut dibuktikan pada nilai *flux recovery ratio* (FRR) dari sampel tersebut mencapai 69,78%. Dengan demikian, kombinasi tekanan 2 bar dan pencucian kimia dengan konsentrasi larutan pencuci 6 wt% merupakan kondisi paling optimal untuk memulihkan kinerja membran PVDF dalam penyaringan air sungai.

#### 5. Singkatan

<i>FRR</i>	Flux Recovery Ratio
<i>PVDF</i>	Polyvinylidene Fluoride
$J_{w1}$	Fluks awal membran bersih
$J_{w2}$	Fluks awal membran setelah pencucian

#### 6. Referensi

- [1] M. El Batouti, N. F. Alharby, and M. M. Elewa, "Review of new approaches for fouling mitigation in membrane separation processes in water treatment applications," *Separations*, vol. 9, no. 1, 2022, doi: 10.3390/separations9010001.

- [2] X. Du, Y. Shi, V. Jegatheesan, and I. Ul Haq, *A review on the mechanism, impacts and control methods of membrane fouling in MBR system*, vol. 10, no. 2. 2020. doi: 10.3390/membranes10020024.
- [3] M. Chheang, N. Hongprasith, C. Ratanatawanate, and J. Lohwacharin, "Effects of Chemical Cleaning on the Ageing of Polyvinylidene Fluoride Microfiltration and Ultrafiltration Membranes Fouled with Organic and Inorganic Matter," *Membranes*, vol. 12, no. 3. 2022. doi: 10.3390/membranes12030280.
- [4] H. Z. Yasmin, "Efektivitas Kombinasi Konsentrasi Hidrogen Peroksida (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) dan Waktu Kontak Sinar Ultraviolet-C Terhadap Penurunan Bakteri Coliform pada Limbah Cair RS PKU Muhammadiyah Surakarta," *J. Kesehat. Masy.*, vol. 11, no. 1, pp. 72–81, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jkm/article/download/34578/28999>
- [5] L. Xiang, M. Yuanyuan, C. Zhonglin, and Q. Shuhao, "A simple and effective method to adjust the size of micropores on the inner surface of Polyvinylidene fluoride hollow fiber membranes," *Polym. Eng. & Sci.*, vol. 63, no. 12, pp. 3998–4006, 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.26500>.
- [6] N. Alsawaftah, W. Abuwatfa, N. Darwish, and G. Hussein, "A comprehensive review on membrane fouling: Mathematical modelling, prediction, diagnosis, and mitigation," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 9, 2021, doi: 10.3390/w13091327.
- [7] N. Hidayati, Mardiyono, and Wimpy, "Pemanfaatan larutan asam sitrat sebagai upaya penurunan kadar logam berat krom pada sayuran kubis," vol. 11, no. 3, pp. 237–246, 2022, [Online]. Available: [http://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=3396069&val=29790&title=Pemanfaatan Larutan Asam Sitrat sebagai Upaya Penurunan Kadar Logam Berat Krom pada Sayuran Kubis](http://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=3396069&val=29790&title=Pemanfaatan%20Larutan%20Asam%20Sitrat%20sebagai%20Upaya%20Penurunan%20Kadar%20Logam%20Berat%20Krom%20pada%20Sayuran%20Kubis)
- [8] I. Ibrar *et al.*, "Feasibility of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> cleaning for forward osmosis membrane treating landfill leachate," *J. Environ. Manage.*, vol. 294, no. April, p. 113024, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113024.
- [9] U. Fathanah *et al.*, "Sintesis, Karakterisasi dan Kinerja Membran Hidrofobik Menggunakan Polyvinyl Pyrrolidone (PVP) sebagai Aditif," *ALCHEMY J. Penelit. Kim.*, vol. 17, no. 2, p. 140, 2021, doi: 10.20961/alchemy.17.2.48435.140-150.
- [10] M. Al-Shaeli, S. J. D. Smith, S. Jiang, H. Wang, K. Zhang, and B. P. Ladewig, "Long-term stable metal organic framework (MOF) based mixed matrix membranes for ultrafiltration," *J. Memb. Sci.*, vol. 635, 2021, doi: 10.1016/j.memsci.2021.119339.
- [11] A. Fathurrahman, R. Arisandi, A. Fahrina, N. Arahman, and F. Razi, "Filtration performance of polyethersulfone (PES) composite membrane incorporated with organic and inorganic additives," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1087, no. 1, p. 012049, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1087/1/012049.
- [12] G. Hu and Z. Wang, "The sedimentation probability model based on the particle size distribution and cake morphology in the cross-flow membrane process," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 304, p. 121045, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.121045>.
- [13] H. John, S. K. Giri, L. K. Sinha, R. Pandiselvam, M. Sain, and A. Ray, "Investigating Flux Decline and Fouling Mechanisms in Ultrafiltration of Soy Protein Using a 10 kDa Hollow Fiber Membrane Module," *J. Food Process Eng.*, vol. 48, no. 5, p. e70113, 2025, doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.70113>.
- [14] A. Gul, J. Hruza, and F. Yalcinkaya, "Fouling and Chemical Cleaning of Microfiltration Membranes :," *Polimers*, vol. 13, no. 4, p. 846, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13060846>.
- [15] E. Melliti, B. Van der Bruggen, and H. Elfil, "Chemical inhibition of combined gypsum and iron oxides membrane fouling during reverse osmosis desalination process: Prevention and regeneration of membranes," *Desalination*, vol. 551, p. 116414, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116414>.
- [16] Y. Hata, Y. Bouda, S. Hiruma, H. Miyazaki, and S. Nakamura, "Biofilm Degradation by Seashell-Derived Calcium Hydroxide and Hydrogen Peroxide," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 20, 2022, doi: 10.3390/nano12203681.