

Kinerja Membran PVDF dalam Ultrafiltrasi Pengolahan Air Sungai dengan Variasi Jenis Adsorben pada Tahap *Pre-Treatment*

Yolanda Aprian Redatu Putri^{1*}, Rizka Novembrianto²

^{1,2}*Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya 60924, Jawa Timur, Indonesia*

**Email: yolandayeol61@gmail.com*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja membran PVDF pada proses ultrafiltrasi (UF) dengan penerapan adsorpsi sebagai pre-treatment menggunakan dua jenis adsorben, yaitu karbon aktif dan zeolit, dalam pengolahan air Sungai Jagir. Proses adsorpsi dilakukan selama 30 menit untuk menurunkan beban pencemar sebelum tahap UF, yang dioperasikan pada tekanan 1 bar, 1,5 bar, dan 2 bar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi zeolit-UF menghasilkan fluks yang lebih stabil dibandingkan karbon aktif-UF, terutama pada tekanan 1,5 bar dengan nilai fluks mencapai 490,35 L/m².jam. Penyisihan kekeruhan tertinggi diperoleh pada tekanan 2 bar, yaitu 0,17 NTU untuk karbon aktif-UF dan 0,33 NTU untuk zeolit-UF. Penurunan TDS relatif kecil, berkisar antara 2,5–8,1%, karena ukuran ion terlarut lebih kecil dari pori membran UF (sekitar 0,01 µm). Sementara itu, penyisihan Total Coliform mencapai lebih dari 99,9%, dari 33.000 MPN/100 mL menjadi 9,2 MPN/100 mL pada karbon aktif-UF dan 3 MPN/100 mL pada zeolit-UF. Secara keseluruhan, kombinasi zeolit sebagai pre-treatment dengan tekanan operasi 1,5 bar menghasilkan keseimbangan optimal antara stabilitas fluks dan efektivitas penyisihan, sehingga direkomendasikan sebagai sistem pengolahan air sungai yang efisien dan berkelanjutan.

Kata kunci: *adsorpsi, fouling, membran PVDF, ultrafiltrasi*

PENDAHULUAN

Sungai Jagir merupakan salah satu sungai utama yang mengalir di Kota Surabaya dan berperan penting sebagai sumber air baku untuk kebutuhan domestik maupun industri melalui suplai ke Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Karangpilang (Mawaddati, dkk., 2021). Tingginya pemanfaatan sungai ini menjadikannya sumber daya strategis, namun kualitas air Sungai Jagir menghadapi tantangan serius akibat pencemaran dari aktivitas domestik, pertanian, serta industri di sekitarnya. Teknologi membran, khususnya ultrafiltrasi (UF), merupakan metode pengolahan air yang dapat digunakan untuk mengolah air baku menjadi air bersih. Ultrafiltrasi dengan membran PVDF (*Polyvinylidene Fluoride*) dikenal memiliki keunggulan berupa kekuatan mekanik, stabilitas kimia, serta kemampuan rejeksi terhadap partikel koloid dan mikroorganisme (Liu *et al.*, 2011). PVDF terbuat dari fluoropolymer termoplastik

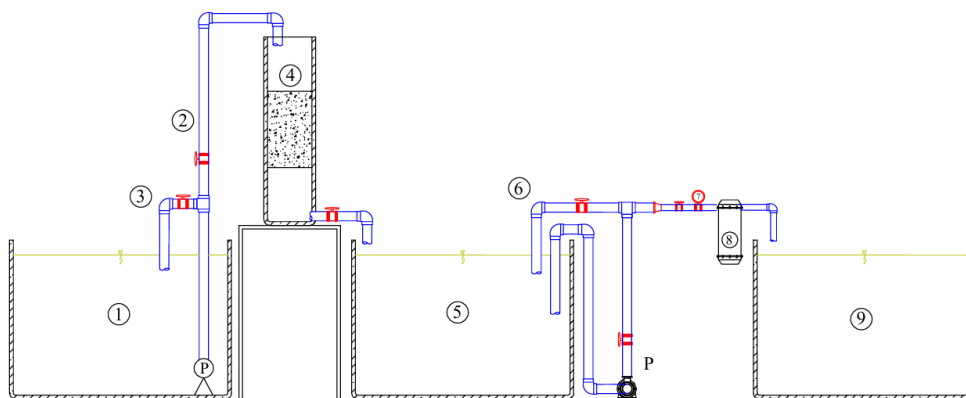
yang tidak reaktif dan dikenal sebagai polimer semikristalin yang terdiri dari molekul rantai panjang (Mohammadpourfazel *et al.*, 2023). Membran PVDF mendapat perhatian dikarenakan memiliki sifat yang istimewa seperti memiliki kekuatan mekanik tinggi, stabilitas termal, ketahanan kimia, dan hidrofobisitas tinggi dibandingkan dengan bahan polimer komersial lainnya. Namun, permasalahan utama pada pengoperasian membran adalah *fouling*, yaitu penyumbatan pori akibat akumulasi partikel, bahan organik, maupun mikroorganisme yang menempel pada permukaan membran. *Fouling* menyebabkan penurunan fluks dan mempercepat degradasi kinerja membran sehingga membatasi umur operasionalnya (Warsinger *et al.*, 2015).

Untuk mengurangi laju *fouling*, diperlukan tahapan *pre-treatment* yang efektif menurunkan beban pencemar sebelum proses membran berlangsung (Amalia, dkk., 2019). Adsorpsi menggunakan media karbon aktif dan zeolit merupakan salah satu opsi yang potensial. Karbon aktif memiliki luas permukaan besar dan efektif dalam menyerap senyawa organik serta partikel penyebab kekeruhan, sedangkan zeolit unggul dalam mekanisme pertukaran ion yang membantu menurunkan TDS serta parameter anorganik lain (Jiang *et al.*, 2020). Dengan demikian, kombinasi adsorpsi sebagai *pre-treatment* dengan ultrafiltrasi diharapkan mampu meningkatkan kinerja membran PVDF baik dari sisi efisiensi penyisihan maupun ketahanannya terhadap *fouling*. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis kinerja membran PVDF dalam pengolahan air Sungai Jagir dengan variasi jenis adsorben pada tahap *pre-treatment*. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan menentukan kombinasi terbaik antara jenis adsorben dan variasi tekanan operasi ultrafiltrasi dalam menyisihkan kekeruhan, TDS, dan *total coliform*, sehingga dapat memberikan rekomendasi strategi pengolahan yang lebih efektif untuk pemanfaatan air Sungai Jagir sebagai air baku.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas unit ultrafiltrasi skala laboratorium yang dirangkai secara terintegrasi dengan proses adsorpsi sebagai tahap *pre-treatment*. Sistem ini dilengkapi dengan pompa untuk mengalirkan air, pressure gauge untuk memantau tekanan operasi, serta beberapa bak penampung untuk menampung air baku, hasil adsorpsi, dan hasil ultrafiltrasi.



Gambar 1. Peralatan Operasi Adsorpsi-Ultrafiltrasi.

Keterangan:

P = pompa (*submersible* dan sentrifugal)

1 = bak penampung air baku

2 = pipa *inlet* adsorpsi

3 = pipa *overflow* adsorpsi

4 = bak adsorpsi

5 = bak penampung hasil adsorpsi

6 = pipa *overflow* ultrafiltrasi

7 = *pressure gauge*

8 = ultrafiltrasi

9 = bak penampung hasil ultrafiltrasi

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah air baku yang diambil dari Sungai Jagir, Surabaya. Sungai ini dipilih karena merupakan salah satu sumber air baku yang dimanfaatkan oleh Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Karangpilang. Pengambilan sampel dilakukan secara langsung pada bagian tengah aliran sungai untuk memperoleh kondisi air yang representatif terhadap kualitas air secara umum. Lokasi pengambilan sampel ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Pengambilan Sampel.

Penelitian ini menggunakan air baku yang diambil dari Sungai Jagir, Surabaya, sebagai sampel utama karena sungai tersebut dimanfaatkan sebagai salah satu sumber air baku bagi instalasi pengolahan air minum di wilayah setempat. Pengambilan sampel dilakukan secara langsung pada bagian tengah aliran sungai untuk memperoleh kondisi air yang representatif. Sampel yang telah diambil kemudian diuji untuk mengetahui konsentrasi parameter pencemar sebagai acuan efektivitas pengolahan. Hasil uji kualitas sampel menunjukkan air Sungai Jagir melampaui standar maksimum air bersih yang diatur dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 2 Tahun 2023 (Kementerian Kesehatan, 2023).

Tabel 1. Hasil Uji Awal Kualitas Air Sungai Jagir

Parameter	Satuan	Nilai	Baku Mutu
Kekeruhan	NTU	170	<3
TDS	mg/L	288	<300
<i>Total Coliform</i>	MPN/100mL	33.000	0

Selain air baku, bahan lain yang digunakan dalam penelitian meliputi media adsorben berupa karbon aktif granular dan zeolit alam dengan ukuran 8×16 mesh yang telah dicuci serta dikeringkan sebelum digunakan sebagai *pre-treatment*. Membran yang digunakan adalah membran PVDF tipe *hollow fiber* dengan ukuran pori 0,01 µm.

Penentuan Waktu Adsorpsi sebagai *Pre-Treatment*

Prosedur penelitian diawali dengan tahap *pre-treatment* melalui proses adsorpsi menggunakan dua jenis media, yaitu karbon aktif granular dan zeolit alam. Sampel air Sungai Jagir dicampurkan dengan berat adsorben sebanyak 400 g. Waktu kontak yang ditentukan yaitu 10 menit, 20 menit, dan 30 menit. Hal ini bertujuan untuk memastikan interaksi optimal antara partikel pencemar dan media adsorben. Dari 3 variasi waktu kontak tersebut, dilakukan uji kualitas air untuk mengetahui waktu kontak optimal. Waktu kontak optimal ini selanjutnya dijadikan air umpan untuk tahap ultrafiltrasi.

Ultrafiltrasi

Tahap berikutnya adalah proses ultrafiltrasi yang menggunakan membran PVDF tipe *hollow fiber* dalam sistem *crossflow*. Variasi tekanan operasi yang digunakan adalah 1 bar, 1,5 bar, dan 2 bar. Selama pengoperasian, volume *permeat* diukur secara berkala dengan penentuan waktu sampling tertentu untuk menentukan nilai fluks. Selain itu, kestabilan fluks diamati untuk mengevaluasi ketahanan membran terhadap potensi *fouling*. Untuk mengetahui kinerja membran, dilakukan analisis permeabilitas, yaitu dengan perhitungan fluks *permeat*. Fluks air menunjukkan banyaknya air (*permeat*) yang dihasilkan oleh ultrafiltrasi. Perhitungan fluks dirumuskan melalui persamaan berikut (Mulder,1996):

$$J = \frac{V}{A.t}$$

Dimana:

- J : fluks air (L/m².h)
- V : volume *permeate* (L)
- A : luas permukaan (m²)
- t : waktu (h)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan Waktu Optimum Adsorpsi sebagai *Pre-Treatment*

Penelitian ini dilakukan dengan kombinasi adsorpsi sebagai tahap *pre-treatment* sebelum menuju ultrafiltrasi. Adsorpsi dilakukan untuk mengurangi beban pencemar pada air umpan yang digunakan.

Tabel 2. Hasil *Pre-Treatment* dengan Variasi Adsorben

Jenis Adsorben	Waktu	Parameter		
		Kekeruhan (NTU)	TDS (ppm)	Total Coliform (MPN/100 mL)
Karbon Aktif	10 menit	7,74	292	24.000
	20 menit	7,51	306	79.000
	30 menit	6,635	320	33.000
Zeolit	10 menit	28,8	277	33.000
	20 menit	22,3	276	240.000
	30 menit	15,25	272	33.000

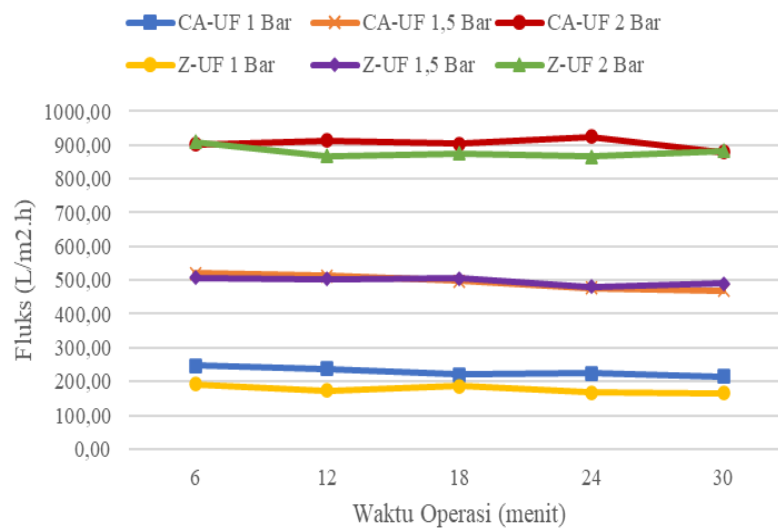
Berdasarkan hasil penelitian, proses adsorpsi dengan karbon aktif dan zeolit menunjukkan bahwa waktu kontak berpengaruh nyata terhadap efektivitas penurunan parameter kualitas air Sungai Jagir. Pada menit ke-10, penurunan kekeruhan, TDS, dan *total coliform* mulai terlihat, meskipun belum signifikan karena interaksi antara polutan dengan permukaan adsorben masih terbatas. Pada menit ke-20, efisiensi adsorpsi meningkat, ditandai dengan penurunan kekeruhan dan TDS yang lebih stabil. Namun, pada menit ke-30, kinerja adsorpsi mencapai titik optimum dengan pencapaian penurunan kekeruhan paling tinggi dibandingkan dengan menit sebelumnya. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin lama kontak antara air dengan adsorben, semakin banyak partikel tersuspensi yang dapat terikat pada pori-pori karbon aktif maupun permukaan zeolit.

Karbon aktif lebih dominan dalam menurunkan kekeruhan karena memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi dan struktur mikropori yang efektif untuk menangkap partikel koloid (Sindim, dkk.,

2023). Sementara itu, zeolit memberikan kontribusi lebih besar terhadap penurunan TDS karena mekanisme pertukaran ion. Struktur kristalin zeolit memiliki muatan negatif yang berperan aktif dalam menarik serta menyerap ion-ion kationik terlarut di dalam air yang merupakan penyumbang utama terhadap nilai TDS (Nugroho *et al.*, 2013). Selain itu, penyisihan *total coliform* juga lebih optimal pada menit ke-30 karena semakin banyak mikroorganisme yang terperap pada permukaan adsorben. Dengan demikian, waktu 30 menit dipilih sebagai waktu optimum adsorpsi sebelum tahap ultrafiltrasi, karena pada kondisi ini beban pencemar yang masuk ke membran dapat ditekan secara maksimal, sehingga meningkatkan kinerja penyisihan membran sekaligus memperlambat laju *fouling*.

Penentuan Fluks Air Hasil Ultrafiltrasi

Penentuan nilai fluks atau permeabilitas membran dalam penelitian ini dilakukan melalui pengujian menggunakan air yang telah melalui pre-treatment adsorpsi dengan variasi adsorben karbon aktif dan zeolit. Selama proses percobaan, volume *permeat* yang berhasil melewati membran dicatat secara sistematis pada interval waktu tertentu, yaitu setiap 6 menit, sehingga data yang diperoleh dapat menggambarkan kecenderungan perubahan fluks dan permeabilitas secara lebih akurat sepanjang periode pengujian.



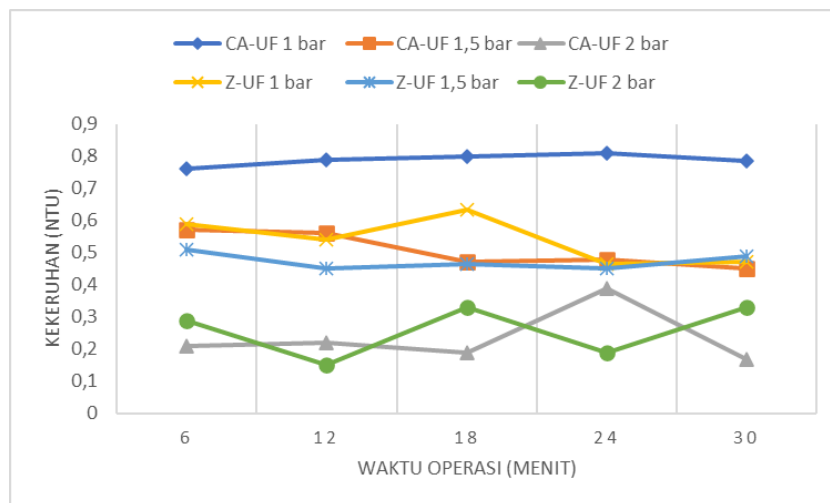
Gambar 2. Grafik Penurunan Fluks pada Ultrafiltrasi dengan Variasi Tekanan Berbeda.

Pada tekanan operasi 1 bar, terlihat bahwa fluks *permeat* yang dihasilkan dari kombinasi karbon aktif–UF lebih tinggi dibandingkan dengan zeolit–UF pada seluruh waktu operasi. Nilai fluks awal karbon aktif–UF mencapai 247,55 L/m².jam, sedangkan zeolit–UF hanya 192,62 L/m².jam. Meskipun demikian, fluks karbon aktif–UF cenderung menurun lebih tajam seiring waktu, mencapai 214,59 L/m².jam pada menit ke-30. Sebaliknya, zeolit–UF menunjukkan tren penurunan fluks yang lebih landai, yaitu dari 192,62 menjadi 165,74 L/m².jam. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun karbon aktif mampu menghasilkan fluks awal yang lebih tinggi, potensi *fouling* akibat partikel halus lebih besar sehingga menurunkan kestabilan kinerja membran dibandingkan dengan zeolit. Pada kondisi 1,5 bar, baik karbon aktif–UF maupun zeolit–UF menghasilkan fluks awal yang relatif tinggi, masing-masing 520,47 dan 507,83 L/m².jam. Namun, fluks karbon aktif–UF mengalami penurunan yang lebih signifikan, mencapai 468,63 L/m².jam pada menit ke-30. Sedangkan zeolit–UF menunjukkan kestabilan yang lebih baik, meskipun sempat menurun hingga 480,30 L/m².jam pada menit ke-24, kemudian sedikit meningkat menjadi 490,35 L/m².jam pada menit ke-30. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kombinasi zeolit–UF pada tekanan 1,5 bar memberikan performa lebih stabil dibandingkan dengan karbon aktif–UF. Dengan demikian, tekanan 1,5 bar dapat dianggap sebagai kondisi optimum karena selain menghasilkan fluks

yang tinggi, kestabilan membran relatif terjaga. Pada tekanan operasi 2 bar, kedua jenis *pre-treatment* menghasilkan fluks awal yang lebih tinggi dibandingkan dengan tekanan sebelumnya. Karbon aktif-UF mencapai fluks awal 902,03 L/m².jam, sedangkan zeolit-UF 908,57 L/m².jam. Namun, seiring berjalannya waktu, tren penurunan fluks juga mulai terlihat. Fluks karbon aktif-UF sempat meningkat hingga 923,97 L/m².jam pada menit ke-24, tetapi kemudian menurun menjadi 878,95 L/m².jam pada menit ke-30. Sedangkan zeolit-UF mengalami fluktuasi lebih stabil, dengan nilai akhir fluks 882,04 L/m².jam. Meskipun pada tekanan ini fluks awal tinggi, kestabilannya relatif kurang baik akibat peningkatan laju *fouling* yang dipicu oleh tingginya tekanan operasi. Tekanan operasi yang tinggi menimbulkan gesekan (*shear stress*) antara aliran air dengan *cake layer* yang terbentuk pada permukaan membran, sehingga *cake layer* ikut lolos bersama *effluent* ultrafiltrasi dan memengaruhi kualitas *permeat* (Wenten *et al.*, 2013).

Hasil analisis kinerja membran menunjukkan bahwa pada tekanan menengah (1,5 bar), kombinasi zeolit sebagai pretreatment dan ultrafiltrasi menghasilkan fluks yang relatif tinggi sekaligus stabil, dibandingkan dengan tekanan rendah (1 bar) yang menghasilkan fluks rendah dan tekanan tinggi (2 bar) yang menunjukkan penurunan fluks lebih tajam akibat *fouling*. Kondisi ini menunjukkan bahwa tekanan 1,5 bar berada di dekat titik batas optimal di mana keuntungan kenaikan tekanan masih lebih besar daripada kerugian akibat laju *fouling* yang meningkat. Pilihan tekanan menengah sebagai kondisi optimum juga didukung oleh literatur sebelumnya yang menyatakan bahwa peningkatan tekanan hingga titik tertentu dapat meningkatkan fluks, tetapi jika melampaui batas tertentu akan mempercepat *fouling* yang merusak kestabilan jangka panjang (Yuliwati *et al.*, 2022). Dengan demikian, pemilihan tekanan 1,5 bar sebagai kondisi operasi unggul dalam penelitian ini konsisten dengan prinsip kritikal flux dan mekanisme *fouling* membran yang telah banyak dibahas dalam kajian membran modern.

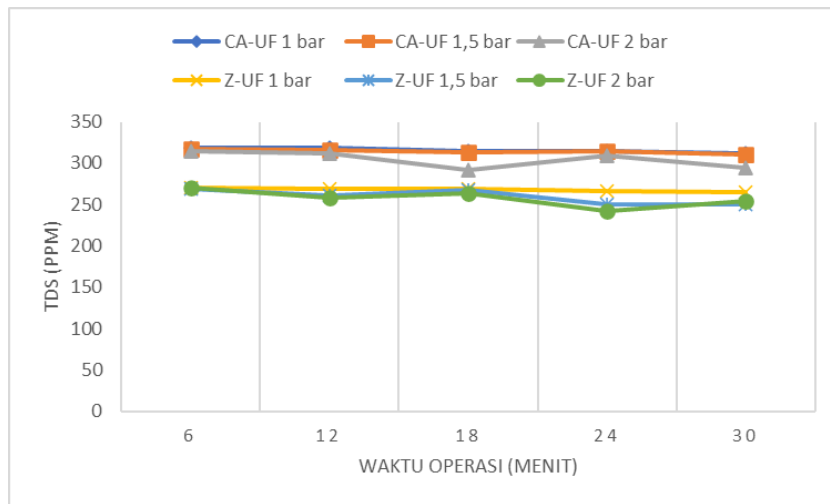
Penyisihan Kekeruhan, TDS, dan Total Coliform



Gambar 3. Grafik Penurunan Parameter Kekeruhan Air Hasil Ultrafiltrasi.

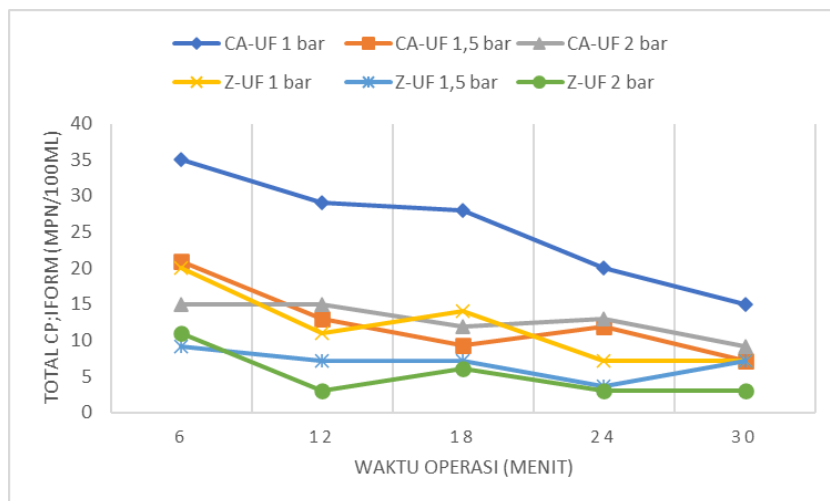
Penyisihan kekeruhan pada kombinasi adsorpsi-ultrafiltrasi menunjukkan pola berbeda pada tiap variasi jenis adsorben dan tekanan. Pada tekanan 1 bar, tren kekeruhan relatif stabil, terutama pada karbon aktif-UF, hasil penyisihan kekeruhan relatif lebih kecil daripada pada tekanan lain. Pada menit ke-30, kekeruhan turun hingga 0,785 NTU pada karbon aktif-UF dan 0,47 NTU pada zeolit-UF. Pada tekanan 1,5 bar, penyisihan menjadi lebih stabil dengan penurunan 0,45 NTU (karbon aktif-UF) dan 0,49 NTU (zeolit-UF). Tekanan 2 bar menghasilkan penurunan terbesar pada karbon aktif-UF yaitu 0,17 NTU dan 0,33 NTU pada zeolit-UF, namun nilai kekeruhan cenderung fluktuatif akibat gaya geser (*shear stress*) tinggi yang dapat melepaskan *cake layer* dari permukaan membran (Bacchin *et al.*, 2006).

Dengan demikian, *shear stress* berperan ganda, yakni membantu mencegah penumpukan *cake layer*, namun juga dapat menyebabkan peningkatan sementara kekeruhan akibat pelepasan partikel.



Gambar 4. Grafik Penurunan Parameter TDS Air Hasil Ultrafiltrasi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penurunan nilai TDS pada proses adsorpsi-ultrafiltrasi tidak signifikan pada seluruh variasi tekanan. Pada tekanan 1 bar, TDS menurun dari 320 ppm menjadi 312 ppm untuk kombinasi karbon aktif-UF (penurunan 2,5%) dan dari 272 ppm menjadi 265 ppm untuk kombinasi zeolit-UF (penurunan 2,6%). Pada tekanan 1,5 bar, TDS turun hingga 311 ppm untuk karbon aktif-UF dan 251 ppm untuk zeolit-UF, sedangkan pada tekanan 2 bar, nilai akhir mencapai 294 ppm dan 255 ppm secara berturut-turut. Penurunan yang relatif kecil ini disebabkan oleh ukuran partikel TDS yang lebih kecil dari ukuran pori membran ultrafiltrasi (0,01 μm), sehingga sebagian besar ion terlarut tetap lolos melalui membran (Gregory, 2005). Fenomena serupa dilaporkan oleh Huang et al. (2021) dan Wibowo et al. (2020), yang menyatakan bahwa ultrafiltrasi lebih efektif untuk penyisihan padatan tersuspensi dan makromolekul, sedangkan penghilangan TDS memerlukan proses lanjutan seperti nanofiltrasi atau reverse osmosis.



Gambar 5 Grafik Penurunan Parameter Total Coliform Air Hasil Ultrafiltrasi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi adsorpsi–ultrafiltrasi (UF) mampu menurunkan kadar *total coliform* air sungai secara signifikan pada semua variasi tekanan operasi. Sebelum proses pengolahan, *total coliform* awal tercatat sebesar 33.000 MPN/100 mL, dan setelah dilakukan ultrafiltrasi nilainya turun menjadi 15 MPN/100 mL pada kombinasi karbon aktif–UF serta 7,2 MPN/100 mL pada kombinasi zeolit–UF pada tekanan 1 bar. Pada tekanan 1,5 bar, konsentrasi *coliform* akhir mencapai 7,2 MPN/100 mL untuk kedua jenis adsorben, sedangkan pada 2 bar turun lebih lanjut menjadi 9,2 MPN/100 mL (karbon aktif–UF) dan 3 MPN/100 mL (zeolit–UF). Penurunan yang tinggi ini menunjukkan efisiensi sistem dalam menghilangkan mikroorganisme, dengan tingkat penyisihan mencapai lebih dari 99,9%. Efektivitas proses dipengaruhi oleh kombinasi mekanisme adsorpsi mikroba pada permukaan adsorben, penyaringan fisik oleh pori membran UF, serta gaya geser (*shear stress*) yang dihasilkan oleh tekanan operasi, yang membantu mengurangi penumpukan biofilm di permukaan membran. Adapun faktor lain yang menyebabkan tingginya penyisihan *Total Coliform* pada ultrafiltrasi yaitu ukuran partikel pada bakteri *Total Coliform* diketahui lebih besar daripada ukuran pori membran PVDF yaitu 10^{-5} m, nilai ini lebih besar dari ukuran pori pada membran yang digunakan pada penelitian yaitu 0,01 μ m, sehingga bakteri *Total Coliform* dapat tersaring dengan baik pada membran (Gregory, 2005).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi adsorpsi–ultrafiltrasi menggunakan membran PVDF efektif dalam meningkatkan kualitas air Sungai Jagir. Tahap adsorpsi dengan karbon aktif dan zeolit mampu menurunkan beban pencemar awal, dengan waktu optimum pada menit ke-30. Variasi tekanan operasi memengaruhi kinerja membran, di mana tekanan 1,5 bar menghasilkan fluks yang lebih stabil dengan potensi fouling yang lebih rendah. Penyisihan kekeruhan terbaik diperoleh pada tekanan 2 bar, sedangkan penurunan TDS relatif rendah (2,5–8,1%) karena keterbatasan ukuran pori membran ultrafiltrasi. Efisiensi penyisihan total coliform sangat tinggi (>99,9%) pada kedua jenis adsorben. Secara keseluruhan, kombinasi zeolit–ultrafiltrasi pada tekanan 1,5 bar memberikan kinerja paling optimal, sehingga berpotensi diterapkan sebagai sistem pengolahan air sungai yang efisien dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amalia, A., Mirwan, M., dan Farid, M. S., 2019. *Pengaruh Kombinasi Pretreatment Adsorpsi-Ultrafiltrasi dalam Menyisihkan Total Organic Carbon*. Jurnal Envirotek. 11(2): 68–72. DOI: <https://doi.org/10.33005/envirotek.v11i2.3>.
- Bacchin, P., Espinasse, B., Bessiere, Y., Fletcher, D. F., and Aimar, P., 2006. *Numerical Simulation of Colloidal Dispersion Filtration: Description of Critical Flux and Comparison with Experimental Results*. Desalination. 192: 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.05.028>.
- Gregory, J., 2005. *Particles in Water, Particles in Water*. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203508459>.
- Jiang, N., Erdos, M., Moulton, O. A., Shang, R., Vlught, T. J. H., Heijman, S. G. J., and Retveld. L. C., 2020. *The Adsorption Mechanisms Of Organic Micropollutants On High-Silica Zeolites Causing S-Shaped Adsorption Isotherms: An Experimental And Monte Carlo Simulation Study*. Chemical Engineering Journal. 389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123968>.
- Kementerian Kesehatan. 2023. *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023*. 55: 1-175.
- Liu, F., Hashim, N. A., Liu, Y., Abed, M. R. M., and Li, K., 2011. *Progress in the Production and Modification of PVDF Membranes*. Journal of Membrane Science. 375(1-2): 1-27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.03.014>.
- Mawaddati, I., Munfarida, I., dan Hakim, A., 2021. *Evaluasi Daya Tampung Beban Pencemaran Air Sungai Wonokromo (Kali Jagir) Kota Surabaya*. Jurnal Teknik Lingkungan. 7(1): 33–43.
- Mohammadpourfazel, S., Arash, S., Ansari, A., Yang, S., Mallick, K., and Bagherzadeh, R., 2023.

- Future Prospects and Recent Developments of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Piezoelectric Polymer; Fabrication Methods, Structure, and Electro-Mechanical Properties*. RSC Advances. 13(1): 370–387. DOI: <https://doi.org/10.1039/d2ra06774a>.
- Mulder, M., 1996. *Basic Principles of Membrane Technology*. 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-1766-8>.
- Nugroho, Wahyu, dan Purwoto, S., 2013. *Removal Klorida, TDS dan Besi Pada Air Payau melalui Penukar Ion dan Filtrasi Campuran Zeolit Aktif dengan Karbon Aktif*. Waktu: Jurnal Teknik Unipa. 11(1): 47-59. DOI: <https://doi.org/10.36456/waktu.v11i1.861>.
- Sindim, S., Taunaumang, H., dan Rampengan, A. M., 2023. *Pembuatan Karbon Aktif Bambu dengan Metode Termolisis dan Karakterisasinya*. Jurnal FisTa : Fisika dan Terapannya. 4(2): 46–52. DOI: <https://doi.org/10.53682/fista.v4i2.285>.
- David, M. W., Swaminathan, J., Guillen-Burrieza, E., Arafat, H. A., Lienhard V, J. H., 2015. *Scaling And Fouling in Membrane Distillation for Desalination Applications: A Review*. Desalination. 356: 294-313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.06.031>.
- Wenten, I. G., Hakim, A. N., Khoiruddin, Aryanti, P. T. P., 2013. *Troubleshooting dalam Operasi Membran*. Diktat. Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung.
- Yuliwati, E., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., Shirazi, M. M. A., 2022. *Critical Flux and Fouling Analysis of PVDF-Mixed Matrix Membranes for Reclamation of Refinery-Produced Wastewater: Effect of Mixed Liquor Suspended Solids Concentration and Aeration*. Membranes. 12(2). DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes12020161>.