

Modifikasi Membran *Polyethersulfone* (PES) dengan PVA dan Selulosa untuk Peningkatan Hidrofilisitas dan Kinerja Antifouling

Siti Khairani¹, Umi Fathanah^{1*}, Fauzi¹, Syawaliah Muchtar¹, Cut Meurah Rosnelly¹, Mirna Rahmah Lubis¹, Abubakar¹, Zuhra¹, dan Sidik Marsudi²

¹Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia; e-mail: umifathanah@usk.ac.id

²Jurusan Teknik Kimia, Institut Teknologi Indonesia, Banten, Indonesia

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji modifikasi membran *polyethersulfone* (PES) dengan penambahan *polyvinyl alcohol* (PVA) dan selulosa dari daun pandan laut (*Pandanus tectorius*) untuk meningkatkan hidrofilisitas, permeabilitas, dan ketahanan fouling. Selulosa diperoleh melalui delignifikasi, pemutihan, dan hidrolisis asam, lalu dikarakterisasi dengan FTIR. Membran dibuat menggunakan metode *Non-solvent Induced Phase Separation* (NIPS) dengan 1% b/b PVA dan variasi selulosa 0–2% b/b, serta diuji menggunakan FTIR, SEM, WCA, porositas, dan filtrasi asam humat 50 ppm pada sistem *dead-end*. Penambahan PVA dan selulosa meningkatkan porositas dari 55,59% menjadi 80,18% dan menurunkan WCA dari 69,33° menjadi 45,31°, sehingga fluks air murni naik dari 26,16 menjadi 44,82 L/m²·jam pada MPS2 (1% PVA, 2% selulosa). Namun, rejeksi asam humat menurun dari 71,32% menjadi 57,06%, menunjukkan *trade-off* antara fluks dan selektivitas. MPS2 juga menunjukkan FRR tertinggi 95,51% dengan *Fouling total* (Rt), *Fouling reversible* (Rr) dan *Fouling irreversible* (Rir) masing-masing sebesar 29,79%, 25,31%, dan 4,48%, yang mengindikasikan dominasi *fouling reversibel*. Peningkatan antifouling dikaitkan dengan gugus –OH yang meningkatkan hidrofilisitas dan mengurangi interaksi polutan dengan membran. Secara keseluruhan, kombinasi PVA dan selulosa berpotensi meningkatkan kinerja membran PES, namun diperlukan pengujian lanjutan pada air limbah nyata dan operasi jangka panjang untuk evaluasi lebih komprehensif.

Kata kunci: *polyethersulfone*, *polyvinyl alcohol*, selulosa, hidrofilisitas, antifouling

ABSTRACT

This study investigates the modification of *polyethersulfone* (PES) membranes by incorporating *polyvinyl alcohol* (PVA) and cellulose derived from *Pandanus tectorius* leaves to enhance hydrophilicity, permeability, and fouling resistance. Cellulose was obtained through delignification, bleaching, and acid hydrolysis and subsequently characterized by FTIR. The membranes were fabricated using the non-solvent induced phase separation (NIPS) method with 1 wt% PVA and cellulose concentrations ranging from 0 to 2 wt%. Membrane characterization included FTIR, SEM, water contact angle (WCA), porosity, and filtration tests using a 50 ppm humic acid solution in a *dead-end* system. The incorporation of PVA and cellulose increased membrane porosity from 55.59% to 80.18% and decreased the WCA from 69.33° to 45.31°, resulting in an increase in pure water flux from 26.16 to 44.82 L/m²·h for MPS2 (1 wt% PVA and 2 wt% cellulose). However, humic acid rejection decreased from 71.32% to 57.06%, indicating a *trade-off* between water flux and selectivity. MPS2 also exhibited the highest flux recovery ratio (FRR) of 95.51%, with total fouling (Rt), reversible fouling (Rr), and irreversible fouling (Rir) values of 29.79%, 25.31%, and 4.48%, respectively, indicating the predominance of reversible fouling. The improved antifouling performance was attributed to hydroxyl (–OH) groups that enhanced membrane hydrophilicity and reduced pollutant–membrane interactions. Overall, the combination of PVA and cellulose shows potential for improving PES membrane performance; however, further evaluation using real wastewater and long-term filtration is required to comprehensively assess its practical applicability.

Keywords: *polyethersulfone*, *polyvinyl alcohol*, cellulose, hydrophilicity, antifouling

Citation: Khairani, S., Fathanah, U., Fauzi, Muchtar, S., Rosnelly, C. M., Lubis, M. R., Abubakar, Zuhra, dan Marsudi, S. (2026). Modifikasi Membran *Polyethersulfone* (PES) dengan PVA dan Selulosa untuk Peningkatan Hidrofilisitas dan Kinerja Antifouling. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(4), 900-909, doi:10.14710/jil.24.4.900-909

1. PENDAHULUAN

Teknologi membran telah berkembang dalam beberapa dekade terakhir sebagai salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan ketersediaan air bersih secara global (Gao et al., 2025; Alhussaini et al., 2024; Mulyati et al., 2024; Rana et al., 2025). Berdasarkan prinsip pemisahan selektif, teknologi ini mampu menghasilkan air berkualitas tinggi secara efisien dan berkelanjutan (Shoshaa et al., 2023). Penelitian terbaru difokuskan pada pengembangan material inovatif, penambahan aditif fungsional, dan optimasi teknik fabrikasi untuk meningkatkan selektivitas, permeabilitas, serta ketahanan fouling, sehingga menghasilkan teknologi pengolahan air yang lebih efisien dan ramah lingkungan (Behroozi et al., 2023; Kim et al., 2022; Vishwakarma et al., 2023).

Membran berbasis *polyethersulfone* (PES) banyak digunakan dalam proses pemisahan karena memiliki kekuatan mekanik yang tinggi serta stabilitas termal dan kimia yang baik. Namun, sifat alami PES yang hidrofobik membuatnya rentan terhadap fouling, yakni akumulasi zat pengotor pada permukaan dan pori membran (Fathanah et al., 2025; Otitoju et al., 2018; Wasyleczko et al., 2024). Fouling berdampak signifikan terhadap kinerja membran dengan menurunkan fluks, mengubah selektivitas, serta mempercepat kerusakan membran karena membutuhkan proses pencucian yang lebih sering. Akibatnya, umur pakai membran menjadi lebih pendek dan biaya operasional meningkat (Du et al., 2020; Mulyati et al., 2020). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai pendekatan modifikasi telah dikembangkan, seperti *polymer blending*, pencangkakan kimia, maupun modifikasi permukaan (Arahman et al., 2021; Geleta et al., 2023; Yin & Zhang, 2021). Di antara strategi tersebut, pencampuran dengan aditif hidrofilik menjadi salah satu metode paling menjanjikan karena mampu meningkatkan hidrofilisitas dan menekan potensi fouling tanpa menurunkan performa pemisahan. Berbagai aditif telah dilaporkan efektif, seperti *polyethylene glycol* (PEG) (Muchtar et al., 2017), *polyvinyl alcohol* (PVA) (Ghobadi Moghadam & Hemmati, 2023), *polyvinylpyrrolidone* (PVP) (Alam et al., 2024), *magnesium hydroxide* (Fathanah et al., 2024), *polydopamine* (PDA) (Muchtar et al., 2023), silika (Mulyati et al., 2020), surfaktan nonionik (Mukramah et al., 2017), selulosa (Acarer et al., 2023; Nazri et al., 2021) dan kitosan (Fathanah et al., 2020).

PVA merupakan aditif hidrofilik yang umum digunakan karena kemampuan membentuk film yang baik, biaya rendah, dan kandungan gugus -OH tinggi yang meningkatkan afinitas terhadap air. Namun, penggunaannya secara tunggal memiliki kelemahan seperti pembengkakan, penurunan stabilitas mekanik, dan daya tahan rendah (Filimon et al., 2025). Oleh karena itu, kombinasi PVA dengan material berbasis selulosa berpotensi menjadi strategi untuk meningkatkan sifat hidrofilik sekaligus

mengendalikan karakteristik struktur membran. Selulosa merupakan biopolimer hidrofilik yang kaya akan gugus -OH dan berasal dari sumber terbarukan, sehingga menarik untuk digunakan sebagai aditif dalam fabrikasi membran. Beberapa studi telah melaporkan penggunaan selulosa atau turunannya sebagai aditif membran dengan peningkatan hidrofilisitas dan kinerja filtrasi, namun umumnya masih menggunakan sistem material yang berbeda. Nazri et al. (2021) menggunakan microcrystalline cellulose (MCC) pada membran PES dan melaporkan peningkatan hidrofilisitas serta fluks, sedangkan Trisnawati et al. (2023) menggunakan selulosa asetat dari *Pandanus tectorius* pada membran PVDF untuk meningkatkan permeabilitas dan ketahanan fouling. Pada penelitian ini dilakukan kombinasi PVA dan selulosa dari pandan laut dalam matriks PES. Kombinasi kedua aditif tersebut diperkirakan dapat memberikan efek komplementer, yaitu PVA terutama meningkatkan afinitas membran terhadap air, sedangkan selulosa berkontribusi terhadap peningkatan hidrofilisitas dan perubahan struktur pori selama proses inversi fasa.

Salah satu sumber selulosa alami yang melimpah di Indonesia adalah daun pandan laut (*pandanus tectorius*), dengan kandungan selulosa sekitar 54,37% (Diyana et al., 2021). Pemanfaatan biomassa lokal ini menawarkan pendekatan ramah lingkungan dan berbiaya rendah untuk meningkatkan sifat fisikokimia membran. Wilayah pesisir Aceh, tempat penelitian ini dilakukan, memiliki kelimpahan pandan laut yang hingga kini masih kurang dimanfaatkan, menjadikannya sumber selulosa terbarukan yang potensial. Penelitian ini difokuskan pada pembuatan membran komposit berbasis PES yang dimodifikasi dengan PVA dan selulosa pandan laut menggunakan metode *Non-solvent Induced Phase Separation* (NIPS). Kombinasi PVA dan selulosa pandan laut untuk modifikasi membran PES belum banyak dilaporkan oleh peneliti sebelumnya. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi baru terhadap pengembangan material membran berkelanjutan untuk aplikasi pengolahan air yang efisien dan ramah lingkungan (Trisnawati et al., 2023).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh konsentrasi selulosa yang diekstraksi dari daun pandan laut (*Pandanus tectorius*) pada membran PES yang mengandung 1% PVA terhadap morfologi, porositas, hidrofilisitas, fluks air murni, rejeksi asam humat, dan karakteristik antifouling membran yang difabrikasi melalui metode *Non-solvent Induced Phase Separation* (NIPS). Hipotesis penelitian adalah bahwa peningkatan konsentrasi selulosa akan meningkatkan hidrofilisitas dan porositas membran sehingga meningkatkan fluks air dan pemulihan fluks setelah fouling. Namun, pembentukan struktur pori yang lebih terbuka diperkirakan dapat menurunkan rejeksi asam humat, sehingga terjadi *trade-off* antara

peningkatan permeabilitas dan selektivitas membran.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Material

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas *polyethersulfone* (PES) (Ultrason E6020, BASF Co., Mw 65,000, Ludwigshafen, Germany) sebagai polimer utama, *dimethyl sulfoxide* (DMSO) (Merck, Hohenbrun, Germany) sebagai pelarut, dan akuades sebagai non-pelarut. Aditif yang digunakan meliputi *polyvinyl alcohol* (PVA) (Sigma Aldrich, Germany) sebanyak 1% dan selulosa yang diekstraksi dari daun pandan laut, dengan variasi konsentrasi 1%, 1,5%, dan 2%. Proses ekstraksi selulosa dilakukan dengan bantuan bahan kimia berupa *sodium hydroxide* (NaOH) (Sigma Aldrich, Germany), *hydrogen peroxide* (H₂O₂) (Merck, Hohenbrun, Germany), *sodium hypochlorite* (NaOCl) (Merck, Hohenbrun, Germany), dan *sulfuric acid* (H₂SO₄) (Merck, Hohenbrun, Germany). Untuk pengujian rejeksi, digunakan larutan *humic acid* 50 mg/L (Sigma Aldrich, Germany) sebagai model polutan organik alami.

2.2. Ekstraksi Selulosa dari Daun Pandan Laut

Daun pandan laut dibersihkan, dikeringkan di bawah sinar matahari, dipotong kecil, dihaluskan, dan diayak menggunakan saringan 40 mesh. Ekstraksi selulosa dilakukan melalui tiga tahap utama yaitu, delignifikasi, pemutihan dan hidrolisis asam (Gambar 1). Pada tahap delignifikasi, 50 g serbuk daun pandan laut dipanaskan dalam larutan NaOH 10% (1:16) pada suhu 100 °C selama 2 jam, kemudian disaring dan dicuci hingga bersih. Tahap pemutihan dilakukan dengan memanaskan hasil delignifikasi dalam campuran H₂O₂ 2% (1 L) dan NaOCl 5% (125 mL) pada 60 °C selama 2 jam, lalu dicuci hingga pH netral dan dikeringkan. Tahap terakhir, hidrolisis asam, dilakukan dengan merendam residu dalam larutan H₂SO₄ 2% (1:12) pada 100 °C selama 30 menit (Casanova et al., 2023). Hasilnya dicuci hingga pH netral dan dikeringkan. Selulosa yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi utama dan memastikan kemurnian selulosa.



Gambar 1. Tahapan Proses Ekstraksi Selulosa dari Daun Pandan Laut

2.3. Pembuatan dan Modifikasi Membran

Proses pembuatan membran diawali dengan melarutkan PES, DMSO, dan aditif sesuai komposisi yang ditetapkan, kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* hingga terbentuk larutan dope homogen. Larutan tersebut dicetak di atas pelat kaca menggunakan *casting knife* dengan ketebalan 300 µm, lalu dimasukkan ke dalam bak koagulasi berisi akuades sebagai non-pelarut untuk memulai proses inversi fasa. Proses ini akan menghasilkan struktur membran yang diinginkan, dengan variasi PVA dan selulosa seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Larutan Dope yang Digunakan dalam Pembuatan Membran

Kode Membran	PES (%b/b)	PVA (%b/b)	Selulosa (%b/b)	Pelarut (%b/b)
M0		0	0	82
MPS1	18	1	1	80
MPS1,5		1	1,5	79,5
MPS2		1	2	79

2.4. Karakterisasi Membran

Untuk menganalisis pengaruh kombinasi PVA dan selulosa pada membran PES, dilakukan karakterisasi meliputi: analisis FTIR untuk komposisi kimia, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk morfologi, WCA (*Water Contact Angle*) untuk hidrofilisitas, serta perhitungan porositas membran menggunakan Persamaan (1):

$$\varepsilon = \frac{w_1 - w_2}{p \cdot A \cdot l} \times 100 \quad (1)$$

dimana w_1 dan w_2 menunjukkan massa membran (gram) sebelum dan sesudah pengeringan, ρ adalah densitas air (1 g/cm³), sedangkan A dan l masing-masing mewakili luas (cm²) dan ketebalan (cm) membran. Seluruh pengukuran dilakukan dengan tiga kali pengulangan.

2.5. Evaluasi Kinerja Membran

2.5.1. Uji Fluks Air Murni

Kinerja filtrasi dievaluasi melalui pengukuran fluks air murni menggunakan modul tipe *dead-end* pada tekanan 1 bar. Sebelum pengujian, membran dikondisikan hingga fluks stabil, kemudian air dialirkan dan permeat ditimbang menggunakan timbangan digital. Perhitungan fluks air murni (J) dilakukan menggunakan Persamaan (2):

$$J = \frac{V}{A \cdot t} \quad (2)$$

dimana V merupakan volume air yang difiltrasi (mL), A adalah luas permukaan efektif membran dalam modul filtrasi (m²), dan t adalah waktu proses permeasi (jam). Seluruh pengukuran dilakukan dengan tiga kali pengulangan.

2.5.2. Uji Rejeksi

Rejeksi membran ditentukan berdasarkan kemampuannya memisahkan asam humus 50 ppm sebagai larutan umpan model. Nilai persen rejeksi dihitung dari perbandingan konsentrasi asam humus sebelum dan sesudah filtrasi, dengan pengukuran menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 254 nm. Koefisien rejeksi dihitung dengan menggunakan Persamaan (3):

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \times 100\% \quad (3)$$

dimana R adalah koefisien rejeksi (%), C_f merupakan konsentrasi asam humus pada larutan umpan (ppm), dan C_p merupakan konsentrasi asam humus pada larutan permeat (ppm). Seluruh pengukuran dilakukan dengan tiga kali pengulangan.

2.5.3. Uji Antifouling

Prosedur pengujian antifouling mengacu pada Muchtar et al (2019). Uji antifouling dilakukan menggunakan modul tipe *dead-end* pada tekanan 1 bar. Tahap pertama, air murni dialirkan selama 60 menit untuk mengukur fluks awal (J_{w1}). Tahap kedua, larutan asam humus 50 ppm dialirkan selama 60 menit untuk mensimulasikan fouling (J_{Ha}). Setelah itu dilakukan backwash selama 10 menit, kemudian air murni kembali dialirkan selama 60 menit untuk memperoleh fluks setelah pencucian (J_{w2}). Nilai *Flux Recovery Ratio* (FRR) dihitung sesuai Persamaan (4). Selain FRR, perilaku fouling dianalisis melalui total fouling (R_t), yang terdiri atas *reversible fouling* (R_r) fluks yang dapat dipulihkan setelah pencucian dan *irreversible fouling* (R_{ir}) fluks yang hilang permanen meskipun telah dilakukan pencucian. Ketiga parameter fouling ini dapat dinyatakan secara matematis melalui Persamaan (5)-(7).

$$FRR = \frac{J_{w2}}{J_{w1}} \times 100\% \quad (4)$$

$$R_t = \left(\frac{J_{w1} - J_{Ha}}{J_{w1}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

$$R_r = \left(\frac{J_{w2} - J_{Ha}}{J_{w1}} \right) \times 100\% \quad (6)$$

$$R_{ir} = \left(\frac{J_{w1} - J_{w2}}{J_{w1}} \right) \times 100\% \quad (7)$$

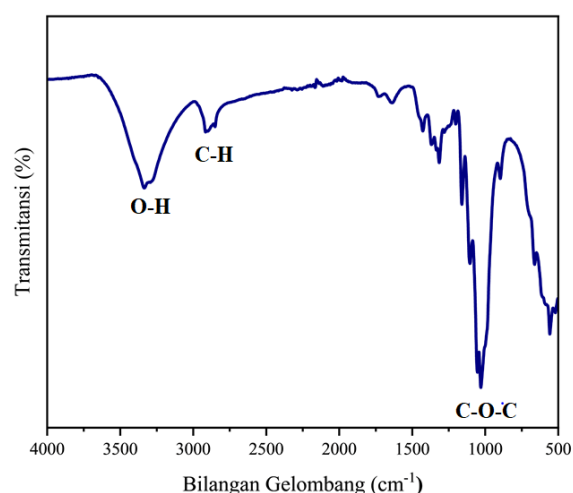
dimana J_{w1} merupakan fluks air murni sebelum backwash ($L/m^2.jam$) dan J_{w2} merupakan fluks air murni setelah backwash ($L/m^2.jam$), sedangkan J_{Ha} menyatakan fluks saat filtrasi larutan asam humus ($L/m^2.jam$). Seluruh pengukuran dilakukan dengan tiga kali pengulangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakterisasi Selulosa

Hasil ekstraksi selulosa dari daun pandan laut menunjukkan rendemen sebesar 21,88% dari 50 g bahan baku serbuk daun, dengan kadar air akhir 1,3%. Nilai ini mengindikasikan efisiensi proses delignifikasi, pemutihan, dan hidrolisis asam dalam

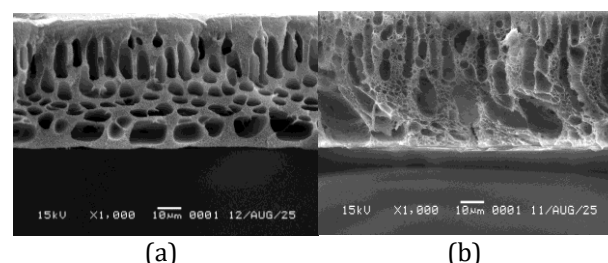
menghilangkan lignin serta hemiselulosa, sehingga diperoleh fraksi selulosa yang relatif murni (Rizkiana et al., 2024). Penelitian sebelumnya melaporkan spektrum FTIR selulosa komersial menunjukkan puncak serapan pada 3306 cm^{-1} yang dikaitkan dengan regangan O-H (hidroksil), puncak 2872 cm^{-1} yang menandakan regangan C-H, serta pita serapan 1016 cm^{-1} yang berkaitan dengan ikatan glikosidik C-O-C (Karn et al., 2022). Selulosa hasil ekstraksi dari daun pandan laut memperlihatkan spektrum yang sebanding (Gambar 2). Tidak ditemukannya puncak pada 1750 cm^{-1} dan 1500 cm^{-1} menegaskan bahwa hemiselulosa dan lignin telah berhasil dihilangkan yang menandakan ekstraksi selulosa yang efektif (Singh et al., 2024). Dengan demikian, selulosa hasil ekstraksi dari daun pandan laut memiliki kemiripan struktur kimia dengan selulosa komersial dan berpotensi besar dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk aplikasi material berbasis serat alami.



Gambar 2. Spektrum FTIR Selulosa Hasil Ekstraksi dari Daun Pandan Laut (*Pandanus tectorius*)

3.2. Karakterisasi Membran

Analisis morfologi membran dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Gambar 3(a) dan 3(b) menampilkan struktur morfologi penampang melintang membran.



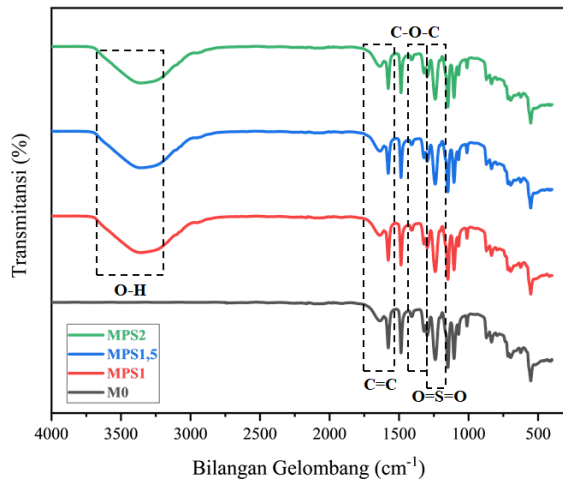
Gambar 3. Morfologi Penampang Melintang dari Membran (a) M0 dan (b) MPS2

Membran PES murni (M0) (Gambar 3a) memperlihatkan morfologi asimetris dengan lapisan padat tipis di bagian atas dan di bagian bawah

terlihat struktur *finger-like voids* yang terbentuk, namun panjangnya terbatas. Kondisi ini menandakan bahwa proses pertukaran pelarut-non-pelarut berlangsung relatif lambat akibat sifat PES yang hidrofobik, sehingga menghasilkan pori-pori berukuran kecil hingga sedang dan distribusi yang kurang merata. Hal ini sesuai dengan kinerja membran PES murni yang umumnya menunjukkan fluks air rendah. Sebaliknya, membran MPS2 (Gambar 3b) dengan konsentrasi PVA 1% dan selulosa 2% menunjukkan perubahan morfologi menjadi *sponge-like* dengan pori yang lebih besar dan terbuka, menciptakan jalur transportasi air yang lebih efisien. Perubahan ini disebabkan oleh penambahan aditif hidrofilik (PVA dan selulosa), yang mempercepat pertukaran fase dan meningkatkan sifat hidrofilik membran. Akibatnya, membran MPS2 menunjukkan fluks air dan kemampuan pemulihan fluks yang lebih tinggi dibandingkan membran PES tanpa modifikasi, meskipun peningkatan keterbukaan struktur pori juga disertai penurunan rejeksi. (Wang et al., 2024).

3.3. Gugus Fungsi Kimia

Karakterisasi gugus fungsi kimia membran dilakukan dengan (FTIR) untuk mengidentifikasi perubahan struktur kimia akibat penambahan aditif. Spektrum FTIR dari membran PES murni (M0) serta membran termodifikasi dengan PVA dan selulosa disajikan pada Gambar 4.



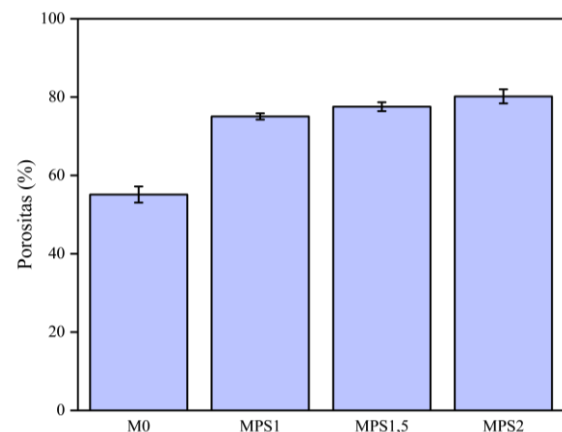
Gambar 4. Spektrum FTIR pada Berbagai Jenis Membran

Pada membran PES murni (M0), spektrum menunjukkan pita khas pada 1580 cm^{-1} dan 1480 cm^{-1} yang berkaitan dengan regangan C=C dari cincin aromatik. Selain itu, pita pada 1240 cm^{-1} menunjukkan ikatan eter (C-O-C), sementara pita pada 1150 cm^{-1} mengindikasikan keberadaan gugus sulfon (O=S=O) yang merupakan ciri khas struktur PES (Fathanah et al., 2024). Pada membran yang dimodifikasi dengan kombinasi PVA dan selulosa (MPS1; MPS1,5 dan MPS2), penambahan kedua aditif ini menunjukkan efek sinergis dalam meningkatkan intensitas pita hidroksil (O-H), yang semakin kuat

seiring dengan peningkatan konsentrasi selulosa. Hal ini mengindikasikan interaksi antara PVA dan selulosa dalam matriks PES, yang secara bersamaan memperkuat sifat hidrofilik membran (Nazri et al., 2021).

3.4. Porositas

Gambar 5 menunjukkan bahwa penambahan PVA dan selulosa meningkatkan porositas membran PES. Membran tanpa aditif (M0) memiliki porositas 55,59%, sedangkan membran termodifikasi menunjukkan peningkatan menjadi 75,06% (MPS1), 77,55% (MPS1,5), dan 80,18% (MPS2). Peningkatan ini disebabkan oleh sinergi antara PVA dan selulosa dalam matriks PES. PVA, yang sangat hidrofilik, mempercepat pertukaran pelarut dan non-pelarut selama proses inversi fasa, membentuk jaringan pori yang lebih terbuka. Sementara itu, selulosa dengan gugus hidroksil (-OH) memperlancar pembentukan pori dan meningkatkan konektivitas antarpori. Kombinasi keduanya menghasilkan struktur membran yang lebih berpori dan mudah dilalui air. Temuan ini konsisten dengan laporan sebelumnya yang menyatakan bahwa aditif hidrofilik mempercepat proses perubahan fase, sehingga meningkatkan porositas dan konektivitas pori membran (Bai et al., 2020).



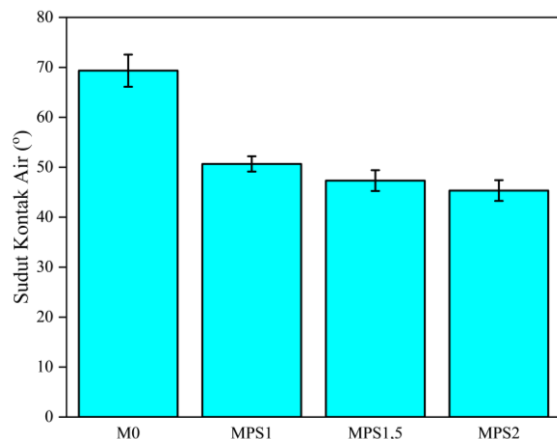
Gambar 5. Porositas pada Berbagai Jenis Membran

3.5. Hidrofilisitas Membran

Gambar 6 menunjukkan hasil pengukuran sudut kontak air (WCA) pada berbagai jenis membran.

Membran PES murni (M0) memiliki sudut kontak tertinggi ($69,33^\circ$), menandakan sifat hidrofobik yang paling kuat. Sebaliknya, membran termodifikasi MPS1, MPS1,5, dan MPS2 menunjukkan penurunan sudut kontak air dibandingkan M0, dengan MPS2 memiliki nilai terendah sebesar $45,31^\circ$, menandakan hidrofilisitas tertinggi. Hasil ini konsisten dengan temuan Bai et al. (2020) yang melaporkan bahwa peningkatan kandungan gugus hidroksil dari selulosa secara efektif meningkatkan interaksi dengan air, menjadikan permukaan membran lebih hidrofilik dan lebih tahan terhadap fouling (Bai et al., 2020). Selain faktor kimia, karakteristik fisik permukaan juga berperan dalam menentukan nilai sudut kontak.

Peningkatan porositas dapat mempermudah penyebaran air yang pada akhirnya akan menurunkan sudut kontak (Fathanah et al., 2024). Hasil SEM dan porositas menunjukkan bahwa MPS2 memiliki pori lebih terbuka dan porositas lebih tinggi, sejalan dengan sudut kontak yang lebih rendah yang menandakan hidrofilisitas lebih baik.

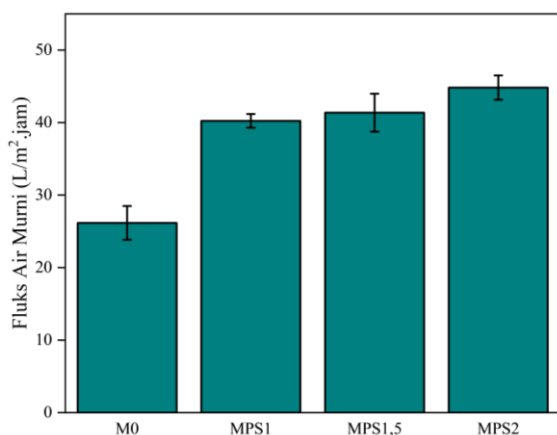


Gambar 6. Nilai Sudut Kontak Air pada Berbagai Jenis Membran

3.6. Kinerja Filtrasi Membran

3.6.1. Fluks Air Murni

Fluks air murni merupakan indikator utama permeabilitas dan efisiensi filtrasi membran. Seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



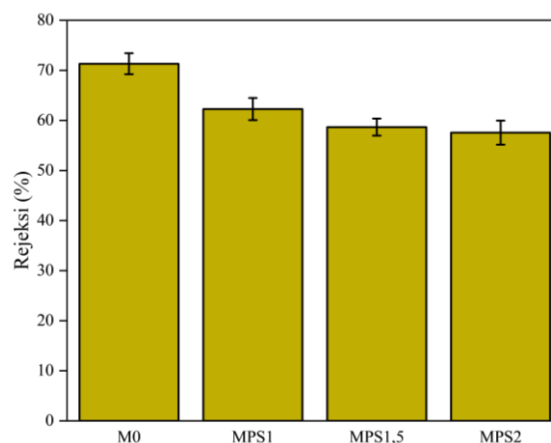
Gambar 7. Nilai Fluks pada Berbagai Jenis Membran

Membran PES murni (M0) memiliki fluks terendah (26,16 L/m².jam) akibat sifatnya yang hidrofobik. Setelah modifikasi dengan PVA dan selulosa, nilai fluks air meningkat dibandingkan membran PES murni. Membran MPS2 dengan konsentrasi selulosa tertinggi menunjukkan fluks maksimum (44,82 L/m².jam). Peningkatan ini dikaitkan dengan gugus hidroksil (-OH) dari selulosa yang meningkatkan hidrofilisitas permukaan dan mempercepat transportasi air melalui pori membran. Hasil ini konsisten dengan studi sebelumnya yang menyatakan bahwa penambahan aditif hidrofilik pada matriks PES memperkaya gugus polar

permukaan dan meningkatkan permeabilitas air secara signifikan (Acarer et al., 2023). Hasil ini menunjukkan hubungan kuat antara porositas dan fluks, semakin tinggi porositas membran, semakin besar fluks air karena struktur pori mempermudah penyerapan dan aliran air.

3.6.2. Rejeksi Asam Humat

Gambar 8 menunjukkan bahwa membran PES murni (M0) memiliki rejeksi asam humat tertinggi sebesar 71,32%, sedangkan rejeksi membran MPS1, MPS1,5, dan MPS2 masing-masing menurun menjadi 62,27%, 58,66%, dan 57,06%. Dengan demikian, perubahan dari M0 ke MPS2 menghasilkan penurunan rejeksi sebesar 14,26 %. Penurunan tersebut cukup besar sehingga tidak tepat dikategorikan sebagai penurunan yang sedikit. Penurunan rejeksi terjadi bersamaan dengan peningkatan fluks air murni dari 26,16 L/m².jam pada M0 menjadi 44,82 L/m².jam pada MPS2. Hasil tersebut menunjukkan adanya *trade-off* yang jelas antara permeabilitas dan selektivitas membran. Peningkatan porositas dan terbentuknya jalur transportasi air yang lebih terbuka memfasilitasi perpindahan air melalui membran, tetapi pada saat yang sama mengurangi kemampuan *size exclusion* terhadap sebagian fraksi molekul asam humat. Fenomena serupa telah dilaporkan pada membran berbasis PES yang dimodifikasi dengan aditif hidrofilik, di mana perubahan struktur dan ukuran pori dapat meningkatkan permeabilitas dengan konsekuensi tertentu terhadap kemampuan rejeksi (Zhang et al., 2022; Nazri et al., 2021).

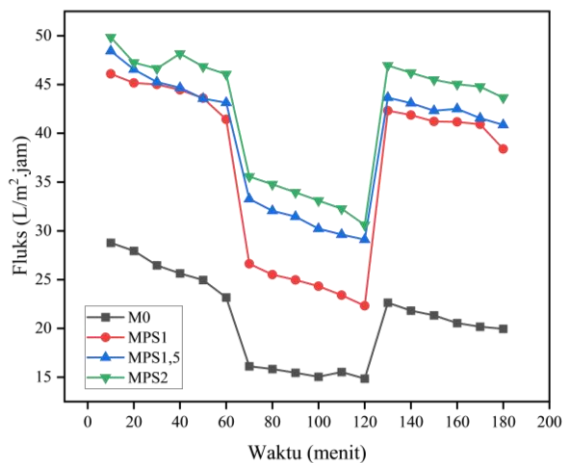


Gambar 8. Koefisien Rejeksi Membran Terhadap Partikel Asam Humat

3.6.3. Antifouling Membran

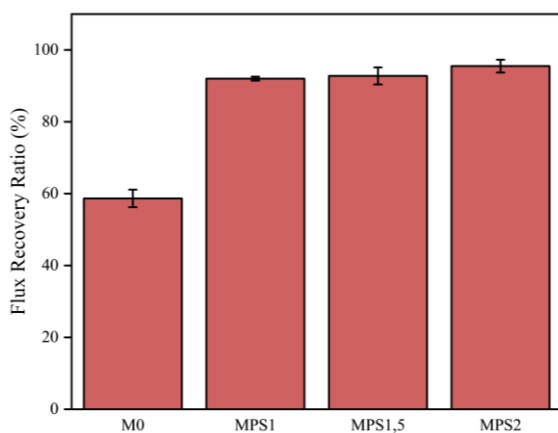
Fouling pada membran terjadi akibat akumulasi polutan organik pada permukaan atau di dalam pori membran. Secara umum, fouling dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu *reversible fouling* dan *irreversible fouling*. *Reversible fouling* merupakan penumpukan polutan yang masih dapat dihilangkan melalui proses pembersihan sederhana seperti *backwashing*, sedangkan *irreversible fouling* terjadi

ketika polutan teradsorpsi atau terperangkap di dalam pori membran sehingga sulit dihilangkan meskipun telah dilakukan pencucian (Muchtar et al., 2019). Tingkat fouling umumnya dapat dievaluasi dari penurunan fluks selama siklus filtrasi. Gambar 9 memperlihatkan profil perubahan fluks membran selama tiga tahap proses filtrasi, yaitu filtrasi air murni (JW1), filtrasi larutan asam humat (JHa), dan filtrasi air murni setelah proses pencucian (backwash) (JW2). Data dari ketiga tahap tersebut digunakan untuk menghitung *Flux Recovery Ratio* (FRR), yang menunjukkan kemampuan membran dalam memulihkan kembali fluks awalnya setelah mengalami fouling.



Gambar 9. Profil Perubahan Fluks pada Membran

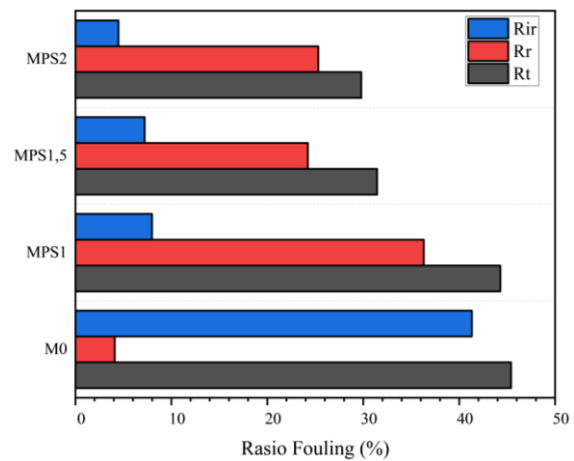
Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10, membran PES murni (M0) memiliki nilai FRR terendah sebesar 54,35%, menandakan terjadinya fouling yang dominan bersifat irreversibel. Sebaliknya, membran termodifikasi dengan kombinasi 1% PVA dan 2% selulosa (MPS2) menunjukkan nilai FRR meningkat seiring modifikasi membran dengan PVA dan selulosa, dengan MPS2 menunjukkan nilai tertinggi sebesar 95,51%.



Gambar 10. Flux Recovery Ratio (FRR) pada Berbagai Jenis Membran

Analisis resistensi fouling pada Gambar 11 menunjukkan bahwa membran termodifikasi

memiliki nilai *reversible fouling* (Rr) yang lebih tinggi dibandingkan *irreversible fouling* (Rir), sedangkan kecenderungan sebaliknya terlihat pada membran PES murni. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi pengujian yang digunakan, proporsi fouling yang dapat dipulihkan melalui proses pencucian meningkat setelah modifikasi membran dengan PVA dan selulosa. Keberadaan gugus hidroksil pada komponen hidrofilik dapat meningkatkan interaksi permukaan dengan air dan membantu mengurangi interaksi langsung antara asam humat dan permukaan membran (Alsohaimi et al., 2023). Namun, hasil dari satu rangkaian pengujian filtrasi dan pencucian belum cukup untuk menyimpulkan stabilitas antifouling dalam penggunaan jangka panjang. Evaluasi melalui beberapa siklus filtrasi-pencucian diperlukan untuk menentukan kestabilan pemulihan fluks dan kecenderungan fouling selama operasi berulang.



Gambar 11. Persentase *Reversible Fouling* (Rr) dan *Irreversible Fouling* (Rir) dan *Total Fouling* (Rt) pada Membran

Tabel 2. Persentase *Total Fouling* (Rt), *Reversible Fouling* (Rr), dan *Irreversible Fouling* (Rir) pada Membran

Kode Membran	Rt (%)	Rr (%)	Rir (%)
M0	45,41	4,09	41,31
MPS1	44,29	36,31	7,98
MPS1,5	31,45	24,23	7,21
MPS2	29,79	25,31	4,48

Data pada Tabel 2 menunjukkan perubahan karakter fouling setelah penambahan PVA dan selulosa. Membran PES murni (M0) memiliki Rt (total fouling) sebesar 45,41% dengan dominasi *irreversible fouling* (Rir) sebesar 41,31% dan *reversible fouling* (Rr) sebesar 4,09%, bahwa interaksi antara asam humat dan permukaan membran PES yang bersifat hidrofobik cukup kuat, sehingga sebagian besar fouling sulit dipulihkan dan menyebabkan rendahnya pemulihan fluks. Setelah modifikasi, terjadi penurunan nilai Rir pada seluruh membran yang dimodifikasi, yaitu menjadi 7,98% (MPS1), 7,21% (MPS1,5), dan 4,48% (MPS2). Penurunan ini menunjukkan bahwa penambahan aditif hidrofilik mampu mengurangi pembentukan

Khairani, S., Fathanah, U., Fauzi, Muchtar, S., Rosnelly, C. M., Lubis, M. R., Abubakar, Zuhra, dan Marsudi, S. (2026). Modifikasi Membran *Polyethersulfone* (PES) dengan PVA dan Selulosa untuk Peningkatan Hidrofilisitas dan Kinerja Antifouling. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(4), 900-909, doi:10.14710/jil.24.4.900-909

fouling yang bersifat permanen. Pada membran MPS2, nilai R_r meningkat menjadi 25,31% dengan R_r yang rendah sebesar 4,48%, yang sejalan dengan nilai *Flux Recovery Ratio* (FRR) sebesar 95,51%, mengindikasikan pemulihan fluks yang sangat baik setelah proses pembersihan. Perubahan ini dikaitkan dengan peningkatan hidrofilisitas akibat gugus -OH dari PVA dan selulosa yang membentuk lapisan hidrasi, sehingga mengurangi adsorpsi kuat asam humat, yang juga didukung oleh penurunan sudut kontak dan peningkatan porositas. Secara keseluruhan, modifikasi PVA dan selulosa terutama meningkatkan ketahanan antifouling dengan menekan *irreversible fouling*, meskipun evaluasi lebih lanjut masih diperlukan pada kondisi operasi jangka panjang dan siklus fouling *cleaning* berulang.

4. KESIMPULAN

Peningkatan konsentrasi selulosa pada membran PES yang mengandung 1% PVA meningkatkan porositas, hidrofilisitas, fluks air murni, dan kemampuan pemulihan fluks. Dalam rentang komposisi yang diuji, MPS2 dengan 2% selulosa menunjukkan porositas tertinggi sebesar 80,18%, sudut kontak air terendah sebesar 45,31°, fluks air murni tertinggi sebesar 44,82 L/m²·jam, dan FRR sebesar 95,51%. Namun, peningkatan kinerja tersebut disertai penurunan rejeksi asam humat dari 71,32% pada M0, menjadi 57,06% pada MPS2, yang menunjukkan adanya *trade-off* antara permeabilitas dan selektivitas. Penelitian ini masih terbatas pada penggunaan larutan model asam humat, sistem filtrasi *dead-end*, dan pengujian dalam durasi terbatas. Kajian lanjutan masih diperlukan untuk memperkuat aspek stabilitas jangka panjang, umur pakai, keamanan material, serta dampak lingkungan membran. Pengujian menggunakan air limbah nyata dan evaluasi kinerja dalam operasi jangka panjang juga penting untuk menilai konsistensi performa membran pada kondisi aplikasi yang lebih representatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Acarer, S., Pir, İ., Tüfekci, M., Erkoç, T., Öztekin, V., Güneş Durak, S., Özçoban, M. Ş., Türkoğlu Demirkol, G., Alhammod, M., Çavuş, S., and Tüfekci, N., 2023. Characterisation and modelling the mechanics of cellulose nanofibril added polyethersulfone ultrafiltration membranes. *Heliyon* 9(2), e13086. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13086>.
- Alam, Md. N.-E., Deowan, S. A., Efty, S. S., Chowdhury, F., Haque Milon, A., and Nurnabi, M., 2024. Fabrication and performance evaluation of polyethersulfone membranes with varying compositions of polyvinylpyrrolidone and polyethylene glycol for textile wastewater treatment using MBR. *Heliyon* 10(16), e36215. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36215>.
- Alhussaini, M. A., Souza-Chaves, B. M., Felix, V., and Achilli, A., 2024. Comparative analysis of reverse osmosis and nanofiltration for the removal of dissolved contaminants in water reuse applications. *Desalination* 586, 117822. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117822>.
- Alsohaimi, I. H., Alrashidi, A. N., Hassan, H. M. A., and Chen, Q., 2023. Highly efficient ultrafiltration membrane performance of PES@microcrystalline cellulose extracted from waste fruits for the removal of BrO₃⁻ from drinking water samples. *Colloid and Interface Science Communications* 54, 100718. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2023.100718>.
- Arahman, N., Rosnelly, C. M., Windana, D. S., Fahrina, A., Silmina, S., Maimun, T., Mulyati, S., Fathanah, U., Aprilia, S., Bilad, M. R., Gunawan, P., Dzulhijjah, W. A., and Halimah, N., 2021. Antimicrobial hydrophilic membrane formed by incorporation of polymeric surfactant and patchouli oil. *Polymers* 13(22), 3872. <https://doi.org/10.3390/polym13223872>.
- Bai, L., Wu, H., Ding, J., Ding, A., Zhang, X., Ren, N., Li, G., and Liang, H., 2020. Cellulose nanocrystal-blended polyethersulfone membranes for enhanced removal of natural organic matter and alleviation of membrane fouling. *Chemical Engineering Journal* 382, 122919. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122919>.
- Behroozi, A. H., Al-Shaeli, M., and Vatanpour, V., 2023. Fabrication and modification of nanofiltration membranes by solution electrospinning technique: A review of influential factors and applications in water treatment. *Desalination* 558, 116638. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116638>.
- Casanova, F., Freixo, R., Pereira, C. F., Ribeiro, A. B., Costa, E. M., Pintado, M. E., and Ramos, Ó. L., 2023. Comparative study of green and traditional routes for cellulose extraction from a sugarcane by-product. *Polymers* 15(5), 1251. <https://doi.org/10.3390/polym15051251>.
- Diyana, Z. N., Jumaidin, R., Selamat, M. Z., Alamjuri, R. H., and Md Yusof, F. A., 2021. Extraction and characterization of natural cellulosic fiber from *Pandanus amaryllifolius* leaves. *Polymers* 13(23), 4171. <https://doi.org/10.3390/polym13234171>.
- Du, X., Shi, Y., Jegatheesan, V., and Haq, I. U., 2020. A review on the mechanism, impacts and control methods of membrane fouling in MBR system. *Membranes* 10(2), 24. <https://doi.org/10.3390/membranes10020024>.
- Fathanah, U., Machdar, I., Riza, M., Arahman, N., Lubis, M. R., and Yusuf, M., 2020. The improvement of hydrophilic property of polyethersulfone membrane with chitosan as additive. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan* 15(1), 53–61. <https://doi.org/10.23955/rkl.v15i1.15916>.
- Fathanah, U., Muchtar, S., Aprilia, S., Lubis, M. R., Mulyati, S., and Yusuf, M., 2024. Unlocking synergies of Mg(OH)₂ and rice husk silica as dual additives for tailored pore properties, selectivity, and antifouling performances of PES membrane. *South African Journal of Chemical Engineering* 48, 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.01.004>.
- Fathanah, U., Rosnelly, C. M., Zuhra, Z., Muchtar, S., Rinaldi, W., Abubakar, A., Rahmah, F., Ambarita, A. C., Yusuf, M., and Ramadhani, D. S., 2025. Synthesis and characterization of hydrophobic polyethersulfone membranes modified by hydrophilic additives by NIPS method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1510(1), 012073.

- <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1510/1/012073>.
- Filimon, A., Dobos, A. M., Onofrei, M. D., and Serbezeanu, D., 2025. Polyvinyl alcohol-based membranes: A review of research progress on design and predictive modeling of properties for targeted application. *Polymers* 17(8), 1016. <https://doi.org/10.3390/polym17081016>.
- Gao, W., Wang, Z., Duan, F., Li, Y., Shi, S., Sun, Z., Zhou, B., and Lv, L., 2025. Comprehensive assessment of membrane technology for typical water treatment processes: A critical review. *Desalination* 614, 119171. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119171>.
- Geleta, T. A., Maggay, I. V., Chang, Y., and Venault, A., 2023. Recent advances on the fabrication of antifouling phase-inversion membranes by physical blending modification method. *Membranes* 13(1), 58. <https://doi.org/10.3390/membranes13010058>.
- Ghobadi Moghadam, A., and Hemmati, A., 2023. Improved water purification by PVDF ultrafiltration membrane modified with GO-PVA-NaAlg hydrogel. *Scientific Reports* 13(1), 8076. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35027-5>.
- Karn, A., Thakur, S., and Shrestha, B., 2022. Extraction and characterization of cellulose from agricultural residues: wheat straw and sugarcane bagasse. *Journal of Nepal Chemical Society* 43(1), 93–98. <https://doi.org/10.3126/jncs.v43i1.47034>.
- Kim, A., Hak Kim, J., and Patel, R., 2022. Modification strategies of membranes with enhanced anti-biofouling properties for wastewater treatment: A review. *Bioresour. Technology* 345, 126501. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126501>.
- Muchtar, S., Wahab, M. Y., Mulyati, S., Arahman, N., and Riza, M., 2019. Superior fouling resistant PVDF membrane with enhanced filtration performance fabricated by combined blending and the self-polymerization approach of dopamine. *Journal of Water Process Engineering* 28, 293–299. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.012>.
- Muchtar, S., Yusuf, M., Mulyati, S., Syamsuddin, Y., Fathanah, U., and Takagi, R., 2023. Membrane modification with polydopamine to improve performances—a mini review. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan* 18(1), 53–68. <https://doi.org/10.23955/rkl.v18i1.24918>.
- Mukramah, Syawaliah, Mulyati, S., and Arahman, N., 2017. Influence of Brij58 on the characteristic and performance of PES membrane for water treatment process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 180, 012130. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/180/1/012130>.
- Mulyati, S., Muchtar, S., Yusuf, M., Arahman, N., Sofyana, S., Rosnelly, C. M., Fathanah, U., Takagi, R., Matsuyama, H., Shamsuddin, N., and Bilad, M. R., 2020. Production of high flux poly(ether sulfone) membrane using silica additive extracted from natural resource. *Membranes* 10(1), 17. <https://doi.org/10.3390/membranes10010017>.
- Mulyati, S., Riza, M., Muchtar, S., Ambarita, A. C., Amilia, Putri, E. F. A., and Luthfiana, A., 2024. A high performance of polyvinylidene fluoride membrane modified with vanillin for humic acid removal. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100654. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100654>.
- Nazri, A. I., Ahmad, A. L., and Hussin, M. H., 2021. Microcrystalline cellulose-blended polyethersulfone membranes for enhanced water permeability and humic acid removal. *Membranes* 11(9), 660. <https://doi.org/10.3390/membranes11090660>.
- Otitoju, T. A., Ahmad, A. L., and Ooi, B. S., 2018. Recent advances in hydrophilic modification and performance of polyethersulfone (PES) membrane via additive blending. *RSC Advances* 8(40), 22710–22728. <https://doi.org/10.1039/C8RA03296C>.
- Rana, R., Ahmad, W., Mishra, A., Kumar, S., and Ahmad, A., 2025. Nanocellulose/nanocellulose-based membranes in wastewater treatment: a sustainable path forward for environmental protection. *Food Chemistry: X* 29, 102654. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102654>.
- Rizkiana, M. F., Amrullah, A. M. K., Elisah, N., Amini, H. W., Palupi, B., Rahmawati, I., and Fachri, B. A., 2024. Preparation and characterization of cellulose acetate from *Pandanus tectorius* via microwave irradiation. *Indonesian Journal of Chemical Research* 12(1), 46–54. <https://doi.org/10.30598/ijcr.2024.12-riz>.
- Shoshaa, R., Ashfaq, M. Y., and Al-Ghouti, M. A., 2023. Recent developments in ultrafiltration membrane technology for the removal of potentially toxic elements, and enhanced antifouling performance: a review. *Environmental Technology & Innovation* 31, 103162. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103162>.
- Singh, H., Kumar Verma, A., Kumar Trivedi, A., and Gupta, M. K., 2024. Characterization of nanocellulose isolated from bamboo fibers. *Materials Today: Proceedings* 106, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.300>.
- Muchtar, S., Arahman, N., Mukramah, and Mulyati, S., 2017. Effects of PEG molecular weights on PVDF membrane for humic acid-fed ultrafiltration process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 180, 012129. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/180/1/012129>.
- Trisnawati, E. W., Suryanti, V., Pramono, E., Cahyani, I. S., and Safriyani, D., 2023. Synthesis of Cellulose Acetate from Screw Pine (*Pandanus tectorius*) Leaves for Enhancing Water Permeability and Fouling Resistance of PVDF Membrane. *Indonesian Journal of Chemistry* 23(5), 1436–1444. <https://doi.org/10.22146/ijc.85726>.
- Vishwakarma, V., Kandasamy, J., and Vigneswaran, S., 2023. Surface treatment of polymer membranes for effective biofouling control. *Membranes* 13(8), 736. <https://doi.org/10.3390/membranes13080736>.
- Wang, J., Abbas, S. C., Li, L., Walker, C. C., Ni, Y., and Cai, Z., 2024. Cellulose membranes: synthesis and applications for water and gas separation and purification. *Membranes* 14(7), 148. <https://doi.org/10.3390/membranes14070148>.
- Wasyłeczko, M., Wojciechowski, C., and Chwojnowski, A., 2024. Polyethersulfone polymer for biomedical applications and biotechnology. *International Journal of Molecular Sciences* 25(8), 4233. <https://doi.org/10.3390/ijms25084233>.
- Yin, J., and Zhang, H., 2021. A combined physical blending and surface grafting strategy for hydrophilic

- Khairani, S., Fathanah, U., Fauzi, Muchtar, S., Rosnelly, C. M., Lubis, M. R., Abubakar, Zuhra, dan Marsudi, S. (2026). Modifikasi Membran *Polyethersulfone* (PES) dengan PVA dan Selulosa untuk Peningkatan Hidrofilisitas dan Kinerja Antifouling. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(4), 900-909, doi:10.14710/jil.24.4.900-909
- modification of polyethersulfone membrane toward oil/water separation. *Polymer* 233, 124177. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.124177>
- Zhang, Y., Zhou, S., Li, Z., Zhang, H., Zhang, M., Wang, J., Chen, L., and Zhang, H., 2022. Effect of pore-forming/hydrophilic additive anchorage on the mesoporous structure and sieving performance of a blended ultrafiltration (UF) membrane. *Journal of Membrane Science* 641, 119904. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119904>.