

Optimasi Sifat Antifouling Membran Selulosa Asetat/Kitosan dalam Penghilangan PAH dalam Badan Air

Muhammad Syahrir¹, Muhammad Nur Alam^{2*}, Andi Eka Kartika³, Nita Maghfira Ilyas⁴

Universitas Negeri Makassar^{1,2,3,4}

m.syahrir7406@unm.ac.id¹, m.nur.alam@unm.ac.id², a.eka.kartika@unm.ac.id³,
nita.maghfira.ilyas@unm.ac.id⁴

Corresponding Author: Muhammad Nur Alam, Email: m.nur.alam@unm.ac.id

ABSTRACT

Water pollution caused by persistent organic compounds such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) has become a serious environmental issue due to their toxicity, recalcitrance, and potential carcinogenic effects. Membrane technology offers an effective solution; however, its performance is often limited by fouling. This study aims to optimize the antifouling properties of cellulose acetate (CA) membranes through chitosan coating (CA/CS) and to evaluate their mechanical, physical, filtration, and antifouling performance. CA membranes were fabricated via the phase inversion method and subsequently coated with chitosan at concentrations of 2%, 5%, and 7%. Characterization included mechanical testing (tensile strength and elastic modulus), physical properties (water contact angle, swelling index, and water permeability), filtration performance (pure water flux and PAH rejection), and antifouling properties (Fouling Deposition Ratio/FDR and Flux Recovery Ratio/FRR). The results showed that chitosan coating enhanced the hydrophilicity, mechanical strength, water permeability, and PAH rejection compared to pristine CA membranes. The optimum performance was achieved at CA/CS 5%, which exhibited the highest tensile strength and elastic modulus, lowest water contact angle, maximum swelling index and permeability, highest flux, PAH rejection up to 88%, and the best antifouling properties (FDR 20% and FRR 82%). In conclusion, chitosan-coated cellulose acetate membranes significantly improved filtration efficiency and fouling resistance. The CA/CS 5% membrane demonstrates strong potential for practical application in the treatment of PAH-contaminated water in an effective and sustainable manner.

KEYWORDS

Pollutant, Membrane, Cellulose Acetate, Chitosan, Polycyclic Aromatic Hydrocarbon

ARTICLE DOI:

A. Pendahuluan

Pencemaran air merupakan salah satu masalah lingkungan yang semakin mendapat perhatian, terutama akibat meningkatnya aktivitas industri, transportasi, dan urbanisasi. Salah satu kelompok polutan yang berbahaya adalah Polisiklik Aromatik Hidrokarbon (PAH) (Anyanwu et al., 2020; Syahrir et al., 2016). Senyawa ini bersifat persisten, sulit terurai, bersifat toksik, dan dalam jangka panjang dapat menimbulkan efek karsinogenik. Kehadiran PAH dalam badan air menimbulkan risiko serius baik terhadap kesehatan manusia maupun ekosistem perairan (Conder et al., 2021). Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengolahan yang efektif untuk menurunkan konsentrasi PAH dalam air. Metode konvensional seperti koagulasi, adsorpsi, dan biodegradasi sering digunakan, namun efisiensinya terbatas dalam menghilangkan senyawa organik mikropolutan seperti PAH (El-Alfy, 2024; Jordan et al., 2021; Kohan et al., 2022). Dalam konteks ini, teknologi membran menjadi salah satu alternatif yang menjanjikan karena kemampuannya dalam memisahkan polutan dengan ukuran molekul kecil sekaligus mempertahankan kualitas air. Akan tetapi, salah satu tantangan utama pada

penggunaan membran adalah terjadinya fouling atau penyumbatan pori, yang dapat menurunkan fluks air, memperpendek umur pakai membran, dan meningkatkan biaya operasional.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan modifikasi material membran dengan tujuan meningkatkan sifat antifouling. Salah satu pendekatan yang banyak dikaji adalah penggunaan membran berbasis selulosa asetat (CA) yang dikenal ramah lingkungan, mudah diproses, serta memiliki permeabilitas yang baik. Namun, membran CA murni masih rentan terhadap *fouling* (Shalaby et al., 2018; Vatanpour et al., 2023). Oleh karena itu, dilakukan kombinasi dengan kitosan, sebuah biopolimer alami dengan sifat antibakteri, hidrofilik, dan mampu meningkatkan ketahanan membran terhadap fouling.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membuktikan efektivitas pendekatan ini. (Guo et al., (2020) melaporkan bahwa pelapisan membran selulosa asetat dengan kitosan mampu menurunkan sudut kontak air secara signifikan, yang berimplikasi pada peningkatan sifat hidrofilik dan resistensi fouling. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa modifikasi permukaan membran dengan polimer hidrofilik dapat meningkatkan ketahanan terhadap fouling protein tanpa menurunkan fluks secara signifikan (Ounifi et al., 2021). Selain itu, Liang et al., (2024) juga menegaskan bahwa membran berbasis biopolimer, termasuk selulosa dan kitosan, memiliki prospek besar dalam pengolahan air karena bersifat biodegradable, kompatibel dengan modifikasi kimia, serta mampu menghasilkan sifat mekanik dan selektivitas yang lebih baik.

Penggabungan selulosa asetat dengan kitosan diharapkan dapat menghasilkan membran komposit dengan sifat mekanik, hidrofobisitas, serta resistensi fouling yang lebih baik. Optimasi sifat antifouling membran ini sangat penting untuk meningkatkan efisiensi pemisahan PAH dalam air, sehingga dapat menjadi solusi yang efektif, berkelanjutan, dan ekonomis dalam penanganan pencemaran lingkungan perairan.

B. Metodologi

1. Asetilasi Selulosa Menjadi Selulosa Asetat

Sebanyak 20 g tepung selulosa dimasukkan ke dalam gelas kimia berkapasitas 500 mL, kemudian ditambahkan 200 mL asam asetat glasial dan diaduk pada suhu 50 °C selama 3 jam. Setelah itu, ke dalam campuran ditambahkan 30 mL asam asetat anhidrat serta 6 tetes asam sulfat pekat, lalu pengadukan dilanjutkan pada suhu 60 °C selama 3 jam. Selanjutnya, 4,5 mL akuades dan 10 mL asam asetat glasial dimasukkan sambil diaduk selama 30 menit. Campuran yang terbentuk kemudian dicuci dengan akuades hingga mencapai kondisi netral, sehingga dihasilkan endapan berwarna putih. Endapan tersebut dipisahkan dengan penyaringan dan dikeringkan dalam oven pada suhu 50 °C, kemudian digerus hingga berbentuk serbuk halus. Tahapan berikutnya adalah analisis kadar air, kadar asetil, serta identifikasi gugus fungsi menggunakan spektrometer FTIR (Analda Souhoka & Latupeirissa, 2018).

2. Fabrikasi Membran Selulosa Asetat

Fabrikasi membran selulosa asetat dilakukan melalui metode *phase inversion* menggunakan teknik *casting solution*. Proses ini diawali dengan melarutkan 1.3 g serbuk selulosa asetat ke dalam pelarut organik seperti aseton dengan rasio (1 : 15) dan diaduk pada suhu kamar selama 15 jam. Larutan ini selanjutnya dibiarkan mengalami proses *degassing* untuk menghilangkan gelembung udara yang dapat mengganggu struktur membran. Setelah itu, larutan dituang ke atas kaca datar atau pelat stainless steel dan diratakan menggunakan *casting knife* dengan ketebalan tertentu. Lapisan tipis larutan kemudian didiamkan sebentar untuk proses evaporasi parsial pelarut, lalu dicelupkan ke dalam

bak koagulasi yang berisi air suling atau non-pelarut lainnya. Membran yang dihasilkan kemudian dicuci berulang kali untuk menghilangkan sisa pelarut (Vatanpour et al., 2022).

3. *Pelapisan Membran Selulosa Asetat dengan Kitosan*

Pelapisan membran selulosa asetat dengan kitosan dilakukan dengan menggunakan metode *dip-coating*. Sebanyak 100 mL larutan kitosan dengan konsentrasi berbeda (2%, 5%, 7%) dibuat dan dimasukkan ke dalam gelas kima berbeda. Selanjutnya, 4 lembar membran masing-masing berukuran 10 x 5 cm² disiapkan dan direndam dalam air deionisasi selama 10 menit. Film membran dicelupkan dalam larutan kitosan selama 1 jam. Selanjutnya, membran diangkat dan dibilas dengan air deionisasi lalu dicelupkan kembali ke dalam larutan kitosan selama 10 menit. Selanjutnya, membran diangkat dan dikeringkan pada suhu kamar selama 4 hari. Membran kering disimpan dalam wadah tertutup dan bersih untuk penggunaan lebih lanjut (Junker et al., 2023).

4. *Karakterisasi Membran CA/CS*

Karakterisasi membran CA/CS meliputi water contact angle, swelling index, kuat tarik, modulus elastisitas, dan permeabilitas. Analisis water contact angle dilakukan dengan menggunakan metode sessile drop dan hasil tangkapan tetesan air diolah dengan program ImageJ untuk memperoleh nilai sudut kontak air. Analisis swelling index menggunakan metode gravimetri, permeabilitas dengan metode filtrasi dead-end, sedangkan kuat tarik dan modulus elastisitas menggunakan instrument ASTM 300 (Gebbru & Das, 2017).

5. *Uji Kinerja Membran CA/CS pada penghilangan polutan PAH dalam badan air*

Uji kinerja membran meliputi uji fluks permeat, rejeksi PAH, dan uji anti-fouling. 4 buah membran CA/CS dengan konsentrasi kitosan berbeda disiapkan dalam bentuk lingkaran dengan diameter 4,8 cm. Alat filtrasi vakum disiapkan yang dilengkapi dengan pompa vakum. Selanjutnya larutan umpan (*feed*) simulasi PAH (polisiklik aromatic hidrokarbon) jenis pirena dalam medium air disiapkan dengan konsentrasi 1000 ppm. Selanjutnya, proses filtrasi dilakukan dengan menggunakan 4 buah membran secara bergantian dengan kondisi operasi filtrasi pada tekanan 1,5 bar, suhu kamar, dan waktu operasi selama 2 jam dengan interval waktu 20 menit. Setiap 20 menit permeat diambil dan dihitung volumenya. Setelah 2 jam, masing-masing membran dicuci dengan air deionisasi dan digunakan kembali untuk filtrasi selama 1 jam pada kondisi operasi yang sama. Setelah 1 jam, permeat ditampung dan dihitung volumenya (Koyuncu et al., 2023; Saffarimiandoab et al., 2021). Selanjutnya, nilai fluks permeat, rejeksi PAH, dan nilai FDR serta FRR dihitung dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} J &= \frac{L}{A.t} \\ R &= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% \\ \text{FRR (\%)} &= \frac{J_{wc}}{J_{wo}} \times 100\% \\ &= \left(J_{wo} - \frac{J_{wt}}{J_{wo}} \right) \times 100\% \end{aligned}$$

dimana, J adalah fluks permeat (LMH), R adalah rejeksi PAH (%), FRR adalah rasio pemulihan fluks (%), FDR adalah rasio penolakan fluks (%), L adalah volume permeat (L), Q1 adalah konsentrasi garam *feed*, Q2 adalah konsentrasi garam *permeate*, Jwc adalah fluks setelah pencucian, Jwo adalah fluks awal, Jwt adalah fluks pada waktu tertentu.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Asetilasi selulosa menjadi selulosa asetat

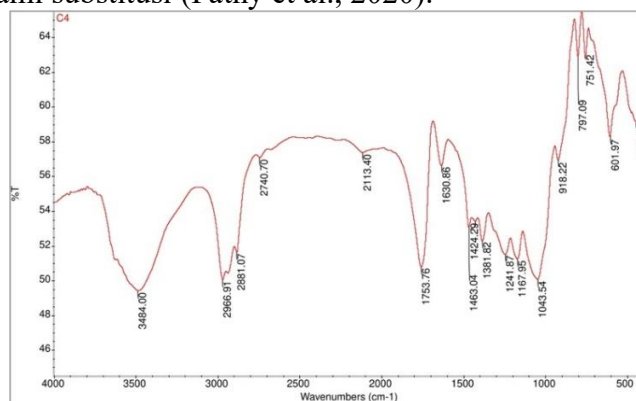
Proses asetilasi selulosa merupakan salah satu metode kimia yang bertujuan untuk memodifikasi gugus hidroksil ($-OH$) pada rantai polimer selulosa menjadi gugus asetil ($-OCOCH_3$). Reaksi ini menghasilkan turunan selulosa berupa selulosa asetat, yang memiliki sifat fisik dan kimia berbeda dibandingkan selulosa asalnya (Rana, Goindi, Kaur, Krishna, et al., 2022). Selama reaksi asetilasi, penggunaan asam asetat glasial sebagai pelarut, asam asetat anhidrat sebagai sumber gugus asetil, serta asam sulfat pekat sebagai katalis memungkinkan terjadinya substitusi secara efektif pada gugus hidroksil selulosa. Hasil yang diperoleh berupa endapan putih (Gambar. 1) menunjukkan bahwa proses asetilasi berjalan dengan baik, di mana terbentuk polimer baru dengan tingkat substitusi tertentu. Semakin tinggi derajat asetilasi, semakin rendah kelarutan polimer dalam air, tetapi meningkat kelarutannya dalam pelarut organik. Hal ini sesuai dengan karakteristik selulosa asetat yang bersifat lebih hidrofobik dibandingkan selulosa murni, sehingga sangat potensial digunakan dalam pembuatan membran untuk aplikasi pemisahan (Figueiredo et al., 2025; Shami et al., 2023). Hasil pengukuran kadar asetil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa selulosa asetat memiliki kadar asetil sebesar 41,5% yang mengindikasikan bahwa selulosa asetat termasuk dalam kategori selulosa diasetat. Selulosa asetat yang dihasilkan terdeteksi tidak larut dalam air namun sangat mudah larut dalam aseton dan dimetil-formamida (DMF), sedangkan selulosa tanpa asetilasi tidak mudah larut baik dalam air maupun pelarut organik. Hal ini mengindikasikan bahwa asetilasi selulosa memang telah berhasil.

Tabel 1. Hasil Analisis Kadar Asetil dan Kelarutan Selulosa asetat

Sampel	Kadar asetil (%)	Kelarutan		
		Air	Aseton	DMF
Selulosa	0	Tidak larut	Tidak larut	Tidak larut
Selulosa asetat	41.5	Tidak larut	Mudah larut	Mudah larut

2. Karakterisasi FTIR Selulosa asetat

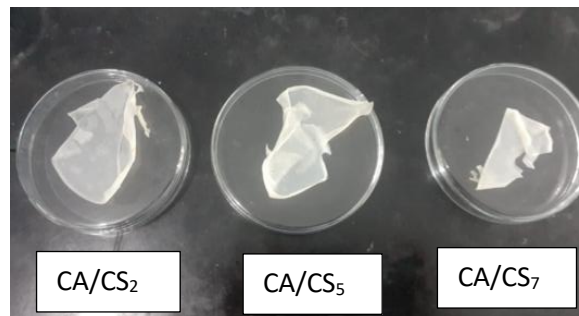
Gambar 2 menunjukkan hasil analisis gugus fungsi menggunakan FTIR yang memperkuat bukti keberhasilan proses asetilasi. Pita serapan khas pada bilangan gelombang sekitar 1730 cm^{-1} menunjukkan adanya regangan gugus karbonil ($C=O$) dari asetil, sedangkan pita di sekitar 1235 cm^{-1} mengindikasikan regangan ikatan ($C-O$) ester. Kehadiran kedua pita ini merupakan indikasi khas terbentuknya selulosa asetat (Ahmad et al., 2016). Sementara itu, intensitas pita serapan ($O-H$) pada 3400 cm^{-1} cenderung berkurang dibandingkan selulosa awal, menandakan sebagian besar gugus hidroksil telah mengalami substitusi (Fathy et al., 2020).



Gambar 2. Spektrum FTIR selulosa asetat

3. Hasil Fabrikasi Selulosa Asetat-Kitosan (CA/CS)

Hasil fabrikasi membran selulosa asetat (CA) yang dilapisi kitosan pada berbagai konsentrasi menunjukkan adanya perubahan sifat permukaan yang signifikan dibandingkan dengan membran CA murni. Secara visual, membran komposit ini cenderung lebih homogen dengan permukaan yang halus, menandakan lapisan kitosan berhasil melekat pada substrat selulosa asetat sebagaimana terlihat pada Gambar 3. Proses pelapisan melalui metode perendaman dalam larutan kitosan kemudian dilanjutkan dengan pengeringan, serta dapat diperkuat melalui proses *crosslinking* dengan glutaraldehida, terbukti mampu menghasilkan lapisan tipis kitosan yang stabil (Shang & Shi, 2018; Vatanpour et al., 2022). Pada Gambar 3 menunjukkan bahwa secara fisik membran CA/CS10 memiliki permukaan yang lebih baik daripada CA/CS5 dan CA/CS15. Tabel 2 menunjukkan hasil analisis kuat tarik dan modulus elastisitas dari membran CA/CS.



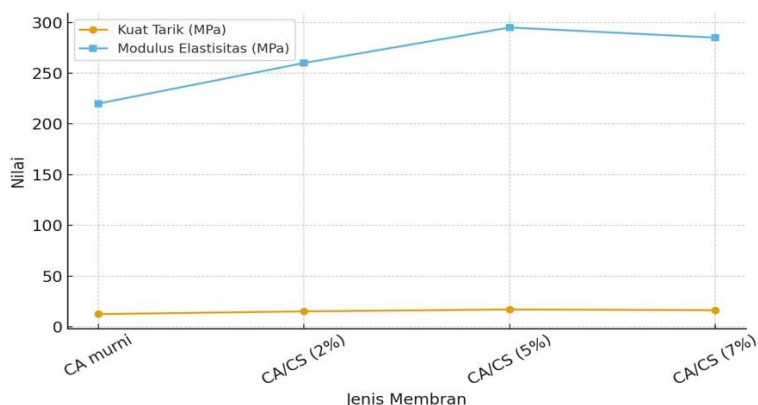
Gambar 3. Visualisasi membran CA/CS berbagai konsentrasi

Gambar 4 menunjukkan pengaruh konsentrasi kitosan terhadap sifat mekanik menunjukkan adanya peningkatan sifat mekanis membran setelah dilakukan modifikasi selulosa asetat (CA) dengan pelapisan kitosan (CA/CS). Membran CA murni memiliki kuat tarik sebesar 12,5 MPa dan modulus elastisitas 220 MPa, yang mencerminkan kekuatan dasar material sebelum modifikasi. Pada penambahan kitosan 2%, terjadi peningkatan kuat tarik menjadi 15,2 MPa dan modulus elastisitas menjadi 260 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa kitosan berhasil memperkuat interaksi antar rantai polimer melalui ikatan hidrogen dan interaksi antarmolekul, sehingga membran menjadi lebih kaku dan tahan terhadap gaya tarik (Bashir et al., 2024; Li et al., 2022).

Tabel 2. Hasil analisis kuat tarik dan modul elastisitas

Jenis Membran	Kuat Tarik (MPa)	Modulus Elastisitas (MPa)
CA murni	12,5	220
CA/CS (2%)	15,2	260
CA/CS (5%)	17,1	295
CA/CS (7%)	16,4	285

Kenaikan lebih signifikan terlihat pada membran CA/CS 5%, dengan kuat tarik mencapai 17,1 MPa dan modulus elastisitas 295 MPa. Kondisi ini mengindikasikan bahwa konsentrasi kitosan yang lebih tinggi mampu memberikan penguatan optimal, baik melalui peningkatan densitas ikatan antarmolekul maupun pembentukan lapisan permukaan yang lebih homogen (Abedini et al., 2011). Namun, pada membran CA/CS 7%, nilai kuat tarik sedikit menurun menjadi 16,4 MPa dan modulus elastisitas menjadi 285 MPa.



Gambar 4. Hubungan antara konsentrasi kitosan dengan kuat tarik dan modulus elastisitas

Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh kelebihan kitosan yang menimbulkan tegangan internal, sehingga lapisan menjadi kurang fleksibel dan cenderung rapuh. Dengan demikian, konsentrasi kitosan optimum berada pada kisaran 5%, yang mampu menghasilkan kombinasi terbaik antara kekuatan tarik dan elastisitas membran. Secara keseluruhan, hasil ini sejalan dengan penelitian Zhou et al. (2014) dan Galiano et al. (2018), yang melaporkan bahwa pelapisan kitosan pada membran berbasis polimer mampu meningkatkan sifat mekanik sekaligus memberikan efek positif terhadap kinerja antifouling. Hal ini menegaskan bahwa membran CA/CS dengan konsentrasi kitosan tertentu lebih potensial digunakan dalam aplikasi pemisahan polutan organik, termasuk polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) dari badan air.

4. Analisis Sudut Kontak Air, Swelling Index, dan Permeabilitas Air dari Membran CA/CS

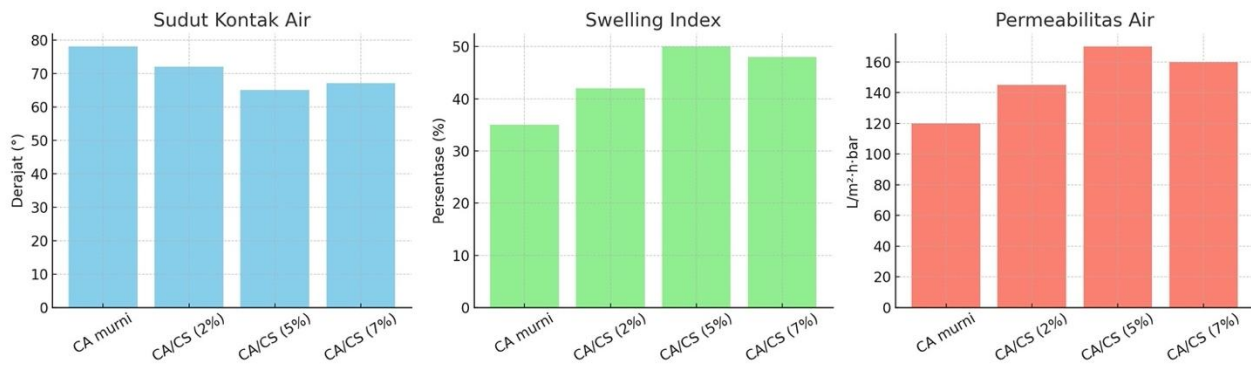
Hasil pengukuran sudut kontak air pada Tabel 3 menunjukkan bahwa pelapisan membran selulosa asetat dengan kitosan mampu meningkatkan sifat hidrofilik permukaan. Membran CA murni memiliki sudut kontak sebesar 78°, menunjukkan sifat yang relatif hidrofobik. Setelah dilapisi kitosan, sudut kontak menurun menjadi 72° (CA/CS 2%) dan 65° (CA/CS 5%), yang berarti membran semakin hidrofilik. Hal ini disebabkan oleh keberadaan gugus hidroksil (–OH) dan amino (–NH₂) dari kitosan yang dapat membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air (Rana, Goindi, Kaur, & Sahu, 2022). Namun, pada CA/CS 7%, sudut kontak sedikit meningkat menjadi 67°, kemungkinan akibat kelebihan kitosan yang menyebabkan lapisan permukaan kurang homogen dan menurunkan interaksi langsung dengan air (Ounifi et al., 2021).

Tabel 3. Hasil pengukuran sudut kontak air, *swelling index*, dan permeabilitas air

Jenis Membran	Sudut Kontak Air (°)	Swelling Index (%)	Permeabilitas Air (L/m ² ·h·bar)
CA murni	78	35	120
CA/CS (2%)	72	42	145
CA/CS (5%)	65	50	170
CA/CS (7%)	67	48	160

Pola yang sama terlihat pada swelling index, yaitu kemampuan membran untuk menyerap air. Membran CA murni hanya menyerap sekitar 35%, sedangkan membran berlapis kitosan meningkat hingga 42% (CA/CS 2%) dan mencapai maksimum 50% (CA/CS 5%). Pada konsentrasi kitosan lebih tinggi (7%), swelling index menurun sedikit menjadi 48%, yang dapat disebabkan oleh struktur

lapisan yang lebih rapat akibat penumpukan kitosan, sehingga menghambat penyerapan air. Permeabilitas air juga mengalami peningkatan dengan adanya lapisan kitosan. Fluks air naik dari 120 L/m²·h·bar pada CA murni menjadi 145 L/m²·h·bar (CA/CS 2%) dan maksimum 170 L/m²·h·bar (CA/CS 5%). Peningkatan ini berhubungan langsung dengan meningkatnya hidrofilisitas dan kemampuan membran menyerap air. Pada CA/CS 7%, permeabilitas sedikit menurun menjadi 160 L/m²·h·bar, yang konsisten dengan fenomena terjadinya lapisan kitosan berlebih yang dapat memperkecil ukuran pori efektif membran (Kim et al., 2019).



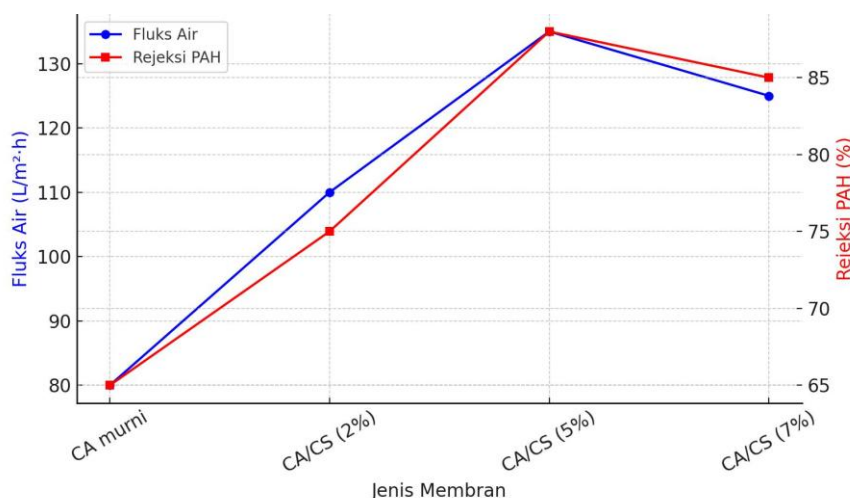
Gambar 5. Grafik pengaruh konsentrasi kitosan terhadap sudut kontak air, *swelling index*, dan permeabilitas air

Gambar 5 menunjukkan hasil analisis sifat fisik membran menunjukkan bahwa pelapisan selulosa asetat dengan kitosan berpengaruh nyata terhadap hidrofilisitas, kemampuan menyerap air, dan permeabilitas membran. Nilai sudut kontak air yang awalnya sebesar 78° pada membran CA murni mengalami penurunan setelah dilapisi kitosan, yaitu menjadi 72° pada CA/CS 2% dan mencapai nilai terendah 65° pada CA/CS 5%. Penurunan sudut kontak ini menunjukkan bahwa permukaan membran menjadi lebih hidrofilik akibat keberadaan gugus hidroksil (–OH) dan amino (–NH₂) dari kitosan. Akan tetapi, pada CA/CS 7% terjadi sedikit kenaikan sudut kontak menjadi 67°, yang mengindikasikan bahwa konsentrasi kitosan yang terlalu tinggi dapat membentuk lapisan kurang homogen sehingga sebagian gugus hidrofilik tertutupi (Chen et al., 2015; Lee et al., 2024). Peningkatan sifat hidrofilik juga tercermin pada nilai *swelling index*. Membran CA murni hanya memiliki kemampuan menyerap air sebesar 35%, namun setelah pelapisan kitosan meningkat menjadi 42% pada CA/CS 2% dan mencapai puncak 50% pada CA/CS 5%. Kondisi ini memperlihatkan bahwa membran dengan kandungan kitosan moderat lebih mampu mengikat molekul air. Namun, pada CA/CS 7%, nilai *swelling index* menurun sedikit menjadi 48%, yang kemungkinan disebabkan oleh terbentuknya lapisan kitosan berlebih sehingga mengurangi ruang pori untuk penyerapan air. Tren serupa juga terlihat pada permeabilitas air. Fluks air yang relatif rendah pada membran CA murni, yaitu 120 L/m²·h·bar, meningkat menjadi 145 L/m²·h·bar pada CA/CS 2% dan mencapai maksimum 170 L/m²·h·bar pada CA/CS 5%. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan hidrofilisitas dan daya serap air berbanding lurus dengan kenaikan permeabilitas membran (Seyfollahi et al., 2019). Namun, pada CA/CS 7%, nilai permeabilitas kembali menurun menjadi 160 L/m²·h·bar akibat terbentuknya lapisan kitosan yang terlalu tebal, yang dapat memperkecil pori-pori efektif membran (Kim et al., 2019). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pelapisan membran selulosa asetat dengan kitosan meningkatkan sifat hidrofilik, *swelling index*, dan permeabilitas, dengan kondisi optimum pada konsentrasi kitosan sekitar 5%. Hal ini

menegaskan bahwa kitosan mampu memperbaiki performa membran dalam pemisahan air dan berpotensi meningkatkan ketahanannya terhadap fouling dalam aplikasi pengolahan air.

5. Uji Fluks Permeat dan Rejeksi PAH

Gambar 6 menunjukkan hasil uji performa membran menunjukkan bahwa pelapisan selulosa asetat dengan kitosan memberikan pengaruh signifikan terhadap fluks air dan kemampuan rejeksi PAH. Membran CA murni memiliki fluks relatif rendah yaitu sekitar $80 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ dan rejeksi PAH sebesar 65%. Setelah ditambahkan kitosan, terjadi peningkatan fluks dan rejeksi yang cukup nyata. Pada CA/CS 2%, fluks meningkat menjadi $110 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ dan rejeksi PAH mencapai 75%, menunjukkan bahwa sifat hidrofilik yang lebih tinggi memperlancar aliran air sekaligus meningkatkan pemisahan polutan organik (Lee et al., 2024).



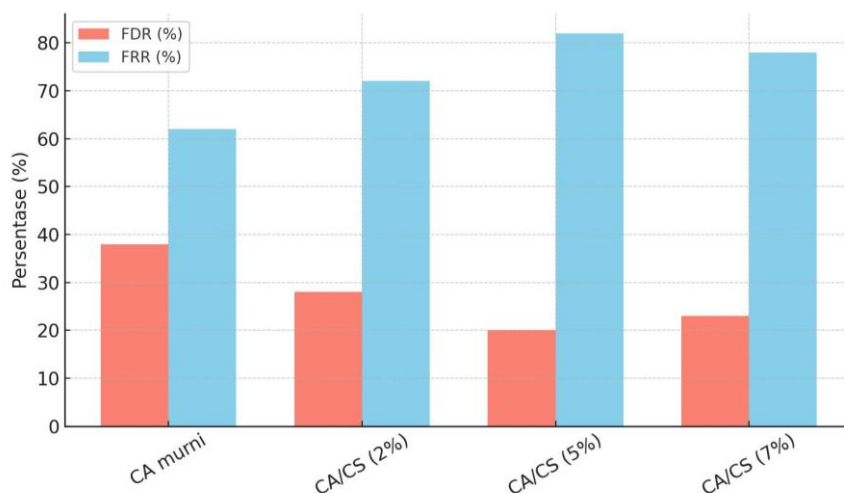
Gambar 6. Hasil uji fluks dan rejeksi PAH

Kondisi optimum diperoleh pada CA/CS 5%, dengan fluks maksimum sebesar $135 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ dan rejeksi PAH tertinggi yaitu 88%. Hal ini menegaskan bahwa konsentrasi kitosan 5% mampu menghasilkan membran dengan kombinasi terbaik antara permeabilitas dan selektivitas, di mana peningkatan hidrofilisitas dan struktur permukaan yang lebih rapat mendukung kinerja pemisahan. Namun, pada CA/CS 7%, nilai fluks menurun menjadi $125 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ dan rejeksi PAH sedikit berkurang menjadi 85%. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh lapisan kitosan yang terlalu tebal, sehingga mengurangi ukuran pori efektif dan meningkatkan hambatan difusi (Panda et al., 2015). Meski demikian, kinerja membran CA/CS 7% masih lebih baik dibandingkan CA murni maupun CA/CS 2%. Secara keseluruhan, hasil ini memperlihatkan bahwa pelapisan kitosan efektif dalam meningkatkan performa membran selulosa asetat. Konsentrasi optimum berada pada 5% kitosan, yang menghasilkan keseimbangan ideal antara fluks air yang tinggi dan rejeksi PAH yang maksimal, sehingga sangat potensial untuk aplikasi pengolahan air tercemar senyawa organik persisten (Cao et al., 2023).

6. Uji sifat anti-fouling

Uji sifat antifouling memperlihatkan bahwa modifikasi membran selulosa asetat dengan kitosan mampu meningkatkan ketahanan membran terhadap fouling. Pada membran CA murni, nilai FDR (Fouling Deposition Ratio) relatif tinggi yaitu 38%, sementara FRR (Flux Recovery Ratio) hanya mencapai 62%. Hal ini menunjukkan bahwa membran murni rentan terhadap penumpukan fouling sehingga sulit untuk memulihkan fluks awal setelah proses pembersihan. Setelah dilakukan pelapisan

kitosan, terjadi penurunan nilai FDR dan peningkatan FRR. Pada CA/CS 2%, FDR menurun menjadi 28% dan FRR meningkat menjadi 72%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan kitosan mulai memberikan efek positif terhadap ketahanan membran terhadap fouling, dengan sifat hidrofilik yang lebih baik. Kinerja optimum terlihat pada CA/CS 5%, dengan nilai FDR terendah 20% dan FRR tertinggi 82%. Kondisi ini menegaskan bahwa konsentrasi kitosan 5% mampu menghasilkan membran dengan sifat antifouling terbaik, di mana lapisan kitosan berfungsi sebagai penghalang fouling sekaligus mempermudah proses pembersihan membran (Sun et al., 2023).



Gambar 7. Pengaruh konsentrasi kitosan terhadap nilai FDR dan FRR dari membran CA/CS

Namun, pada CA/CS 7%, nilai FDR sedikit meningkat menjadi 23% dan FRR menurun menjadi 78%. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh lapisan kitosan yang terlalu tebal sehingga menimbulkan heterogenitas permukaan dan mengurangi efektivitas interaksi dengan air (Cao et al., 2023). Meski demikian, performa antifouling membran CA/CS 7% tetap lebih baik dibandingkan CA murni maupun CA/CS 2%. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa pelapisan kitosan memberikan dampak positif terhadap sifat antifouling membran selulosa asetat, dengan kondisi optimum pada konsentrasi kitosan 5%. Temuan ini penting karena sifat antifouling yang baik berperan dalam memperpanjang umur pakai membran, menurunkan frekuensi pencucian, dan meningkatkan efisiensi operasional dalam pengolahan air tercemar polutan organik.

D. Kesimpulan

Pelapisan membran selulosa asetat dengan kitosan terbukti meningkatkan sifat mekanik, hidrofilisitas, permeabilitas, rejeksi PAH, serta ketahanan fouling dibandingkan membran CA murni. Konsentrasi kitosan 5% memberikan hasil optimum, ditandai dengan kuat tarik dan modulus elastisitas tertinggi, sudut kontak air terendah, swelling index dan permeabilitas maksimum, rejeksi PAH hingga 88%, serta sifat antifouling terbaik (FDR rendah dan FRR tinggi). Dengan demikian, membran CA/CS 5% berpotensi besar untuk diaplikasikan dalam pengolahan air tercemar PAH secara efektif dan berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- Abedini, R., Mousavi, S. M., & Aminzadeh, R. (2011). A novel cellulose acetate (CA) membrane using TiO₂ nanoparticles: Preparation, characterization and permeation study. *Desalination*, 277(1–3), 40–45. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2011.03.089>
- Ahmad, A., Jamshed, F., Riaz, T., Sabad-E-Gul, Waheed, S., Sabir, A., Alanezi, A. A., Adrees, M., & Jamil, T. (2016). Self-sterilized composite membranes of cellulose acetate/polyethylene glycol for water desalination. *Carbohydrate Polymers*, 149, 207–216. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2016.04.104>
- Analda Souhoka, F., & Latupeirissa, J. (2018). Synthesis and Characterization of Cellulose Acetate (CA). In *J. Chem. Res* (Vol. 5, Issue 2).
- Anyanwu, I. N., Sikoki, F. D., & Semple, K. T. (2020). Risk assessment of PAHs and N-PAH analogues in sediment cores from the Niger Delta. *Marine Pollution Bulletin*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111684>
- Bashir, Z., Lock, S. S. M., Hira, N. e., Ilyas, S. U., Lim, L. G., Lock, I. S. M., Yiin, C. L., & Darban, M. A. (2024). A review on recent advances of cellulose acetate membranes for gas separation. *RSC Advances*, 14(27), 19560–19580. <https://doi.org/10.1039/D4RA01315H>
- Cao, S., Wang, Y., Zhang, Y., Wang, G., & Su, T. (2023). Inhibition of membrane fouling by frequency agility electric field in desalination. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110740>
- Chen, G. Q., Kanehashi, S., Doherty, C. M., Hill, A. J., & Kentish, S. E. (2015). Water vapor permeation through cellulose acetate membranes and its impact upon membrane separation performance for natural gas purification. *Journal of Membrane Science*, 487, 249–255. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2015.03.074>
- Conder, J., Jalalizadeh, M., Luo, H., Bess, A., Sande, S., Healey, M., & Unger, M. A. (2021). Evaluation of a rapid biosensor tool for measuring PAH availability in petroleum-impacted sediment. *Environmental Advances*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100032>
- El-Alfy, M. A. (2024). Modeling environmental sensitivity and risk assessment of PAHs in sediments along two marine coastal areas in Egypt. *Petroleum Research*, 9(1), 125–142. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2023.05.012>
- Fathy, M., Ali, H. R., Moustafa, Y. M., & El Shahawy, A. (2020). Removal of suspended matter and salts on ultrafiltration cellulose acetate/expanded polystyrene waste grafted PEG composite membrane. *Desalination and Water Treatment*, 197, 30–40. <https://doi.org/10.5004/DWT.2020.25960>
- Figueiredo, A. S., Sánchez-Loredo, M. G., de Pinho, M. N., & Minhalma, M. (2025). Surface-Charge Characterization of Nanocomposite Cellulose Acetate/Silver Membranes and BSA Permeation Performance. *Membranes*, 15(2), 61. <https://doi.org/10.3390/membranes15020061>

- Gebru, K. A., & Das, C. (2017). Preparation and characterization of CA–PEG–TiO₂ membranes: Effect of PEG and TiO₂ on morphology, flux and fouling performance. *Journal of Membrane Science and Research*, 3(2), 90–101. <https://doi.org/10.22079/jmsr.2016.22820>
- Guo, H., Peng, Y., Liu, Y., Wang, Z., Hu, J., Liu, J., Ding, Q., & Gu, J. (2020). Development and investigation of novel antifouling cellulose acetate ultrafiltration membrane based on dopamine modification. *International Journal of Biological Macromolecules*, 160, 652–659. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2020.05.223>
- Jordan, R. E., Cejas, M. J., Costa, H. J., Sauer, T. C., & McWilliams, L. S. (2021). PAH source differentiation between historical MGP and significant urban influences for sediments in San Francisco Bay. *Marine Pollution Bulletin*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112248>
- Junker, M. A., te Brinke, E., Vall Compte, C. M., Lammertink, R. G. H., de Grooth, J., & de Vos, W. M. (2023). Asymmetric polyelectrolyte multilayer nanofiltration membranes: Structural characterisation via transport phenomena. *Journal of Membrane Science*, 681. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121718>
- Kim, H. Y., Cho, Y., & Kang, S. W. (2019). Porous cellulose acetate membranes prepared by water pressure-assisted process for water-treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 78, 421–424. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2019.05.027>
- Kohan, D. S., Lanno, R. P., & Weavers, L. K. (2022). Using solid-phase microextraction during ultrasound reveals higher aqueous PAHs release from contaminated sediment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105981>
- Koyuncu, I., Eryildiz, B., Kaya, R., Karakus, Y., Zakeri, F., Khataee, A., & Vatanpour, V. (2023). Modification of reinforced hollow fiber membranes with WO₃ nanosheets for treatment of textile wastewater by membrane bioreactor. *Journal of Environmental Management*, 326. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116758>
- Lee, C., Lee, S., & Kang, S. W. (2024). Enhanced porous membrane fabrication using cellulose acetate and citric acid: Improved structural integrity, thermal stability, and gas permeability. *Carbohydrate Polymers*, 324, 121571. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2023.121571>
- Li, T., Wang, Y., Wang, X., Cheng, C., Zhang, K., Yang, J., Han, G., Wang, Z., Wang, X., & Wang, L. (2022). Desalination Characteristics of Cellulose Acetate FO Membrane Incorporated with ZIF-8 Nanoparticles. *Membranes*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/membranes12020122>
- Liang, S., Zou, J., Meng, L., Fu, K., Li, X., & Wang, Z. (2024). Impacts of high salinity on antifouling performance of hydrophilic polymer-modified reverse osmosis (RO) membrane. *Journal of Membrane Science*, 708, 123042. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2024.123042>
- Ounifi, I., Guesmi, Y., Ursino, C., Santoro, S., Mahfoudhi, S., Figoli, A., Ferjanie, E., & Hafiane, A. (2021). *Antifouling Membranes Based on Cellulose Acetate (CA) Blended with Poly(acrylic acid) for Heavy Metal Remediation*. <https://doi.org/10.3390/app>

- Panda, S. R., Mukherjee, M., & De, S. (2015). Preparation, characterization and humic acid removal capacity of chitosan coated iron-oxide- polyacrylonitrile mixed matrix membrane. *Journal of Water Process Engineering*, 6, 93–104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.03.007>
- Rana, J., Goindi, G., Kaur, N., Krishna, S., & Kakati, A. (2022). Synthesis and application of cellulose acetate-acrylic acid-acrylamide composite for removal of toxic methylene blue dye from aqueous solution. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103102. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2022.103102>
- Rana, J., Goindi, G., Kaur, N., & Sahu, O. (2022). Optimization and synthesis of cellulose acetate based grafted gel and study of swelling characteristics. *Materials Today: Proceedings*, 48, 1614–1619. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.09.500>
- Saffarimiandoab, F., Yavuzturk Gul, B., Tasdemir, R. S., Ilter, S. E., Unal, S., Tunaboyle, B., Menciloglu, Y. Z., & Koyuncu, İ. (2021). A review on membrane fouling: Membrane modification. *Desalination and Water Treatment*, 216, 47–70. <https://doi.org/10.5004/DWT.2021.26815>
- Seyfollahi, M., Etemadi, H., Yegani, R., Rabiee, M., & Shokri, E. (2019). The effect of polyethylene glycol grafted nanodiamond on antifouling properties of cellulose acetate membrane for Removal of BSA from Contaminated Water. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, 4(1), 1–16. <https://doi.org/10.22090/jwent.2019.01.001>
- Shalaby, M. S., Naddeo, V., Borea, L., Abdallah, H., Shaban, A. M., Zarra, T., & Belgiorno, V. (2018). Development of highly flux antifouling ro polyethersulfone membranusing compacted woven support. *Desalination and Water Treatment*, 127, 83–89. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22593>
- Shami, R., Sabir, A., Iqbal, S. S., Gull, N., Zohra, R., & Khan, S. M. (2023). Synergistic effect of GO/ZnO loading on the performance of cellulose acetate/chitosan blended reverse osmosis membranes for NOM rejection. *Heliyon*, 9(3), e13736. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E13736>
- Shang, M., & Shi, B. (2018). Study on preparation and performances of cellulose acetate forward osmosis membrane. *Chemical Papers*, 72(12), 3159–3167. <https://doi.org/10.1007/s11696-018-0554-z>
- Sun, Z., Zhang, S., Zhang, Z., Yang, Y., Zhang, C., Qian, Y., & Ren, X. (2023). A novel antifouling polyamide thin-film composite forward osmosis membrane fabricated by poly(m-phenylene isophthalamide) for seawater desalination. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110739>
- Syahrir,) Muhammad, Nurul,), Aprilita, H., Nuryono,), & Herawati, N. (2016). *PAH CHARACTERISTICS IN SEDIMENT AROUND MAKASSAR COAST USING GC-FID*.

- Vatanpour, V., Kose-Mutlu, B., Mutlu-Salmanli, O., Ilyasoglu, G., Asadzadeh-Khaneghah, S., Habibi-Yangjeh, A., & Koyuncu, I. (2023). Bi₄O₅I₂ nanosheets as a novel nanofiller for fabrication of antifouling polyethersulfone nanocomposite membranes. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 117, 473–489. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2022.10.035>
- Vatanpour, V., Pasaoglu, M. E., Barzegar, H., Teber, O. O., Kaya, R., Bastug, M., Khataee, A., & Koyuncu, I. (2022). Cellulose acetate in fabrication of polymeric membranes: A review. *Chemosphere*, 295, 133914. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.133914>