

Membran Komposit Berbasis Filter Rokok Termodifikasi Kompleks Polielektrolit Kitosan/Alginat untuk Aplikasi DMFC

Muhammad Nur Alam¹, Gusma Harfiana Abbas², Sri Wahyuningsih³, Rieka Nurul Dwi⁴, Zulfiqar Busrah⁵

Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Makassar, Makassar, Indonesia^{1,2,3,4}

Doctor of Philosophy in Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Universiti Sains Islam Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia⁵

m.nur.alam@unm.ac.id¹, gusma.harfiana@unm.ac.id², sri.wahyuningsih@unm.ac.id³, rieka.nurul.dwi@unm.ac.id⁴

Corresponding Author: Muhammad Nur Alam, E-mail: m.nur.alam@unm.ac.id

Article Information

Received : 31 August 2026
Revised : 18 October 2026
Accepted : 19 October 2026
Published : 19 October 2026

ABSTRACT

Cigarette filter waste is a source of cellulose acetate with potential for use as a low-cost membrane material. However, its application as a proton exchange membrane for direct methanol fuel cells (DMFCs) requires enhanced proton conductivity while reducing methanol permeability. Chitosan provides amino groups, whereas alginate–poly (acrylic acid) provides carboxyl groups that can interact to form a polyelectrolyte complex (PEC). This study aimed to develop a cigarette filter (CF)-based composite membrane through sequential modification with chitosan (Cs) and alginate–poly(acrylic acid) (Al-PAA) to form a PEC. The membranes were fabricated using the solution-casting method and characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), contact angle measurements, methanol uptake, swelling index, ion exchange capacity (IEC), proton conductivity, and methanol permeability. Changes in the FTIR spectra supported the formation of ionic interactions between -NH_3^+ and -COO^- groups, while SEM revealed a denser, more homogeneous, and layered morphology following modification. The CF/Cs/Al-PAA membrane exhibited a contact angle of $75 \pm 1.5^\circ$, methanol uptake of $41.7 \pm 2.5\%$, a swelling index of $43.8 \pm 2.5\%$, and an IEC of $1.14 \pm 0.01 \text{ mmol g}^{-1}$. Proton conductivity increased to 0.21 S cm^{-1} , exceeding that of Nafion 117 (0.14 S cm^{-1}), while methanol permeability decreased to $1.94 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, lower than that of Nafion 117 ($5.84 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$). These proton conductivity and methanol permeability results indicate improved membrane selectivity, suggesting that the developed composite membrane has potential for further development as a proton exchange membrane for DMFC applications.

KEYWORDS

Cigarette filter; Chitosan; alginate -PAA; polyelectrolyte complex; DMFC

ARTICLE DOI:

<https://doi.org/10.53696/venn.v5i5.665>

How to Cite: Alam, M. N., Harfiana Abbas, G., Wahyuningsih, S., Dwi Anggraeni, R. N., & Zulfiqar Busrah. (2026). Membran Komposit Berbasis Filter Rokok Termodifikasi Kompleks Polielektrolit Kitosan/Alginat untuk Aplikasi DMFC. Venn: Journal of Sustainable Innovation on Education, Mathematics and Natural Sciences, 5(5), 1233–1249. <https://doi.org/10.53696/venn.v5i5.665>

A. Pendahuluan

Sel bahan bakar metanol langsung (DMFC) merupakan teknologi konversi energi yang menarik karena menggunakan metanol cair yang mudah disimpan, memiliki densitas energi tinggi, dan berpotensi diaplikasikan pada perangkat portabel serta sistem energi skala kecil ([Jiang et al., 2008](#)). Namun, pengembangan DMFC masih terkendala oleh kinerja membran elektrolit, khususnya dalam mempertahankan keseimbangan antara konduktivitas proton dan ketahanan terhadap migrasi metanol ([Regenspurg et al., 2024](#)). Sejumlah tinjauan mutakhir menegaskan bahwa membran berbasis Nafion masih menjadi tolok ukur karena stabilitas kimianya dan konduktivitas proton yang baik, tetapi tetap menghadapi permasalahan *crossover* metanol, selain biaya material yang relatif tinggi ([Asghar & Xu, 2024](#)). Permasalahan ini berdampak langsung terhadap efisiensi bahan bakar, tegangan sel, dan kinerja DMFC secara keseluruhan.

Penelitian terkait DMFC dalam beberapa tahun terakhir sebagian besar diarahkan pada pengembangan membran komposit berbiaya lebih rendah yang mampu menekan permeabilitas metanol tanpa secara drastis menurunkan sifat transport proton. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa modifikasi struktur membran melalui pencampuran polimer (*blending*) ([Xiao et al., 2022](#)), penambahan pengisi anorganik ([Abdelsamad et al., 2026](#)), atau rekayasa antarmuka ([Wibowo et al., 2023](#)) ditujukan untuk mengatasi kompromi klasik antara selektivitas proton dan konduktivitas. Bahkan penelitian terkini masih menempatkan pengendalian *crossover* metanol sebagai isu utama, yang menunjukkan bahwa kebutuhan akan membran alternatif belum sepenuhnya terjawab oleh material komersial maupun membran termodifikasi yang tersedia saat ini. Salah satu kandidat material berbiaya rendah yang relevan untuk dikembangkan adalah selulosa asetat (CA). CA telah lama dikenal sebagai polimer semisintetik yang mudah diproses menjadi membran, memiliki sifat pembentuk film yang baik, dan cukup menjanjikan untuk aplikasi pemisahan ([Vatanpour et al., 2016](#)). Untuk kebutuhan DMFC, kemampuan CA membentuk film saja belum cukup: matriks membran juga perlu memiliki situs penghantar proton yang dapat diakses dan hambatan transport metanol yang memadai. Karena itu, rekayasa kimia dan morfologi CA menjadi langkah penting sebelum material tersebut dinilai sebagai kandidat membran pertukaran proton.

Dalam konteks DMFC, CA dapat dimanfaatkan sebagai matriks pembentuk film, tetapi konduksi proton dan pengendalian permeasi metanol tetap memerlukan strategi modifikasi yang sesuai. Sebagai contoh, membran berbasis selulosa asetat tercampur PVA yang dilaporkan oleh [Shami et al. \(2023\)](#) merupakan kandidat membran pertukaran proton berbiaya rendah untuk DMFC, sedangkan membran campuran PVDF/CA menunjukkan permeabilitas metanol yang lebih rendah dibandingkan Nafion 117 ([Pan et al., 2026](#)). Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa CA berpotensi menjadi komponen membran, sedangkan karakter transportnya sangat bergantung pada komposisi, jumlah gugus aktif, dan pengendalian morfologi; bukti dari sistem CA komersial tidak serta-merta berlaku pada CA hasil pemulihan filter rokok. Di sisi lain, filter rokok merupakan sumber selulosa asetat (CA) yang melimpah sekaligus menjadi permasalahan lingkungan yang serius ([Acarer Arat, 2024](#)). Berbagai penelitian melaporkan bahwa puntung atau filter rokok merupakan limbah yang sangat persisten, dapat melindi kontaminan toksik ke lingkungan, serta berkontribusi terhadap pencemaran berbasis mikrofiber dan mikroplastik. Karena filter rokok terutama tersusun atas CA, aliran limbah ini memiliki potensi besar untuk divalorisasi sebagai bahan baku pembuatan membran bernilai tambah ([Acarer Arat, 2024](#); [Xiao et al., 2022](#); [Elahi et al., 2025](#)). Penelitian sebelumnya oleh [Wibisono et al. \(2024\)](#) telah menunjukkan keberhasilan daur ulang filter rokok menjadi membran untuk pengolahan air, pemurnian, dan pemisahan emulsi minyak–air. Namun, pemanfaatannya hingga saat ini masih terutama diarahkan pada remediasi lingkungan dan aplikasi filtrasi cairan,

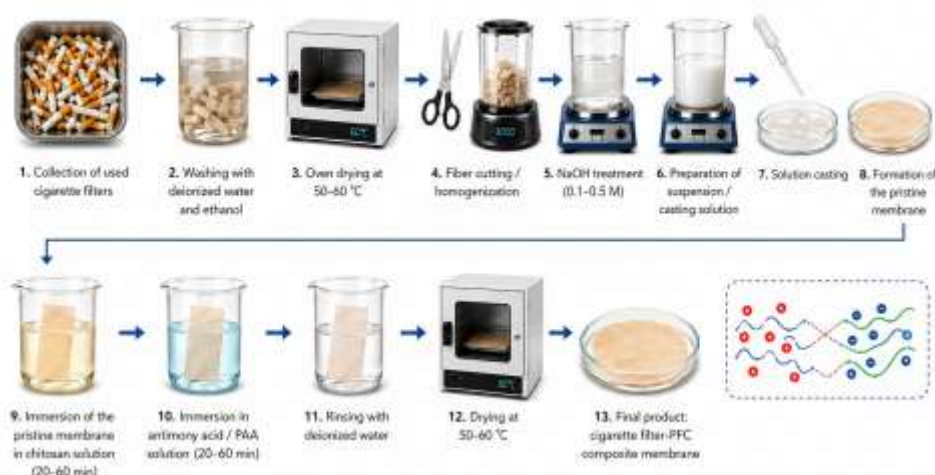
bukan pada pengembangan membran elektrolit untuk sel bahan bakar. Selain pemilihan material dasar, strategi modifikasi membran juga sangat penting (Friuli et al., 2025).

Strategi yang dikaji dalam penelitian ini adalah penggabungan selulosa asetat hasil pemulihan filter rokok dengan kitosan (Cs) dan modifikasi menggunakan alginat–poli(asam akrilat) (Al-PAA). Kitosan menyediakan gugus $-NH_2/-NH_3^+$ yang dapat berinteraksi dengan gugus $-COO^-$ pada alginat/PAA untuk membentuk kompleks polielektrolit (PEC); interaksi tersebut diperkirakan membantu mengatur situs transport proton dan membentuk matriks yang lebih rapat untuk menghambat difusi metanol (Kulig et al., 2016; Jiang et al., 2008). Akan tetapi, kedua sasaran ini perlu dibuktikan melalui pengukuran, sebab pemadatan matriks juga dapat membatasi transport ion. Penelitian yang dirujuk dalam naskah ini telah melaporkan CA sebagai material membran, pemanfaatan filter rokok untuk pemisahan, serta penggunaan PEC pada berbagai membran, tetapi belum memberikan evaluasi langsung yang sebanding terhadap kombinasi CA hasil pemulihan filter rokok–Cs–Al-PAA untuk parameter transport proton dan metanol. Dengan demikian, kesenjangan yang dituju bukan klaim sebagai penggunaan pertama CA atau PEC, melainkan keterbatasan bukti tentang pengaruh modifikasi Cs/Al-PAA pada sistem berbasis filter rokok. Kontribusi penelitian ini adalah membandingkan membran CF, CF/Cs, dan CF/Cs/Al-PAA melalui FTIR, SEM, sifat fisikokimia, kapasitas pertukaran ion, konduktivitas proton, serta permeabilitas metanol, disertai pembandingan Nafion 117 pada parameter transport. Pengujian tersebut dimaksudkan menilai kelayakan awal material sebagai calon membran pertukaran proton; kinerja aktual di dalam sel DMFC belum dievaluasi.

B. Metode Penelitian

1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi sampel filter rokok, aseton yang diperoleh dari Sigma-Aldrich, kitosan (DD = 94%), natrium alginat (Absolut, Merck), poli(asam akrilat) (Merck), dan larutan berair. Membran komersial Nafion-117 (ketebalan $\sim 178 \mu m$) dibeli dari Sigma-Aldrich. Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini meliputi ATR-FTIR, SEM, seperangkat alat ukur permeabilitas metanol, dan Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS).



Gambar 1. Skema sintesis membran dan modifikasinya

2. Preparasi bahan filter rokok

Filter rokok dicuci menggunakan air suling untuk menghilangkan kotoran kasar, kemudian direndam dalam etanol selama beberapa jam untuk menghilangkan tar, nikotin, dan senyawa organik lain yang tersisa. Setelah itu, filter dicuci kembali dengan air suling hingga netral, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 50–60 °C hingga mencapai bobot konstan. Filter rokok yang telah kering selanjutnya dipotong menjadi bagian-bagian kecil dan dihomogenisasi untuk memperoleh serat selulosa asetat yang lebih mudah diproses. Selanjutnya, filter rokok direndam dalam larutan NaOH encer, kemudian dibilas hingga pH netral dan dikeringkan kembali pada suhu 60 °C ([Friuli et al., 2025](#)).

3. Sintesis membran filter rokok

Serat filter rokok yang telah dibersihkan didispersikan dalam aseton dengan perbandingan 1:10 b/v untuk membentuk campuran homogen. Campuran kemudian diaduk secara magnetik pada kecepatan konstan 300 rpm hingga terbentuk larutan atau suspensi membran. Larutan tersebut selanjutnya dicetak menggunakan metode pencetakan larutan (*solution casting*) pada cawan Petri yang bersih. Proses pengeringan dilakukan pada suhu ruang hingga pelarut menguap sempurna dan terbentuk membran padat. Membran yang terbentuk dilepaskan secara hati-hati dari cetakan dan disimpan dalam desikator sebelum digunakan untuk modifikasi dan karakterisasi lebih lanjut. Ketebalan membran diukur pada beberapa titik menggunakan mikrometer digital untuk memperoleh ketebalan rata-rata ([Wibowo et al., 2023](#); [Elahi et al., 2025](#)). Untuk memperoleh membran komposit CF/Cs, larutan yang berasal dari filter rokok dan larutan kitosan disiapkan secara terpisah sebelum tahap pembentukan film membran. Kedua larutan tersebut selanjutnya digunakan dalam pembuatan membran CF/Cs melalui pencetakan larutan. Rincian rasio larutan serta tahapan penggabungannya perlu dicocokkan dengan catatan eksperimen untuk memastikan keterulangan prosedur.

4. Modifikasi membran dengan kompleks polielektrolit (PEC)

Modifikasi membran dilakukan untuk meningkatkan struktur permukaan, hidrofilisitas, dan kemampuan membran dalam menekan permeabilitas metanol. Pembentukan sistem PEC diarahkan melalui interaksi kitosan yang telah menjadi komponen membran CF/Cs dengan polielektrolit anionik pada tahap modifikasi berikutnya; prinsip interaksi antarmuatan tersebut berkaitan dengan pendekatan membran polielektrolit ([Ahmad et al., 2024](#)). Larutan kitosan disiapkan secara terpisah dengan melarutkan kitosan dalam larutan asam asetat encer 2% sambil diaduk hingga homogen, dan digunakan bersama larutan filter rokok pada pembentukan membran CF/Cs. Secara terpisah, larutan polielektrolit anionik natrium alginat 1000 ppm dan poli(asam akrilat) 1000 ppm disiapkan dalam air deionisasi. Membran komposit CF/Cs selanjutnya direndam dalam larutan natrium alginat (Al) selama 1 jam agar gugus polimer aktif dapat teradsorpsi pada permukaan membran. Setelah itu, membran dipindahkan ke dalam polielektrolit anionik (larutan PAA) selama 1 jam. Setelah proses modifikasi selesai, membran dicuci dengan air deionisasi untuk menghilangkan polimer yang tidak terikat, kemudian dikeringkan pada suhu ruang hingga mencapai bobot konstan. Membran hasil modifikasi selanjutnya dinyatakan sebagai CF/Cs/Al-PAA, dengan CF/Cs merujuk pada membran yang telah mengandung kitosan sebelum perlakuan alginat dan PAA. Skema sintesis membran dan modifikasinya ditunjukkan pada Gambar 1.

5. Karakterisasi membran komposit

Morfologi permukaan dan penampang melintang membran hasil preparasi diamati menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM, TESCAN). Analisis dilakukan pada tegangan percepatan 3–5

kV dengan ukuran spot 3, yang dioptimalkan berdasarkan perilaku pengisian muatan pada sampel. Sebelum pengamatan, spesimen dilapisi dengan lapisan logam ultratipis sekitar 2 nm untuk meningkatkan konduktivitas permukaan, menekan efek pengisian muatan, dan meningkatkan kejelasan fitur topografi ([Junker et al., 2023](#); [Kiran et al., 2024](#)).

Spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik ikatan kimia dan gugus fungsi yang terdapat pada membran. Analisis dilakukan menggunakan spektrometer FTIR yang dilengkapi aksesori universal *attenuated total reflectance* (UATR). Spektrum dikumpulkan pada rentang bilangan gelombang 4000–400 cm^{-1} ([Moradi et al., 2024](#); [Wang et al., 2022](#)).

6. Sifat fisikokimia membran

Sampel membran dipotong dengan ukuran yang sesuai, kemudian dikeringkan dalam oven vakum pada suhu 60 °C hingga mencapai bobot konstan. Bobot kering dan luas permukaan setiap membran segera diukur dan masing-masing dicatat sebagai W_d dan A_d . Selanjutnya, membran direndam dalam metanol selama 24 jam. Setelah perendaman, kelebihan metanol pada permukaan membran dihilangkan secara hati-hati menggunakan kertas penyerap, kemudian bobot basah dan luas permukaan diukur dan masing-masing dinyatakan sebagai W_w dan A_w ([Priyanga et al., 2020](#)). Serapan metanol dan derajat pengembangan membran kemudian dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Serapan metanol (\%)} = [(W_w - W_d) / W_d] \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Indeks pengembangan (\%)} = [(A_w - A_d) / A_d] \times 100 \quad (2)$$

Kapasitas pertukaran ion (IEC) membran ditentukan menggunakan metode titrasi asam–basa konvensional sesuai prosedur pada ([Permana et al., 2024](#)). Sampel membran yang telah dikeringkan sempurna terlebih dahulu direndam dalam larutan HCl 0,1 M pada suhu 60 °C untuk mengonversi seluruh gugus ionik ke bentuk H^+ . Setelah dicuci secara menyeluruh, sampel kemudian direndam dalam larutan NaCl jenuh selama 24 jam untuk mendorong pelepasan ion H^+ secara lengkap. Larutan yang dihasilkan selanjutnya dititrasi dengan NaOH 0,1 M menggunakan fenolftalein sebagai indikator. Nilai IEC, yang dinyatakan dalam mmol g^{-1} , dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$\text{IEC} = (V_{\text{NaOH}} \times C_{\text{NaOH}}) / W_{\text{dry}} \quad (3)$$

dengan V_{NaOH} menyatakan volume larutan NaOH yang digunakan selama titrasi, C_{NaOH} menyatakan konsentrasi molar larutan NaOH, dan W_{dry} menyatakan bobot kering sampel membran dalam gram.

7. Kinerja membran

Konduktivitas proton membran yang disiapkan dievaluasi pada kondisi terhidrasi penuh menggunakan konfigurasi dua elektroda yang dikombinasikan dengan spektroskopi impedansi AC. Sebelum pengukuran, sampel membran direndam dalam air deionisasi untuk memastikan hidrasi sempurna. Analisis impedansi dilakukan menggunakan workstation elektrokimia (CHI 660E) pada rentang frekuensi 1 Hz hingga 1 MHz dengan amplitudo terapan 0,01 V. Selama pengujian, setiap membran ditempatkan di antara dua gasket karet untuk mencegah kebocoran elektrolit pada bagian tepi, dengan luas efektif membran 1 cm^2 . Rakitan membran direndam dalam larutan H_2SO_4 1,0 M, sedangkan elektroda disusun sejajar pada jarak yang sama dari kedua sisi membran untuk

memfasilitasi transport proton yang seragam ([Bilal et al., 2026](#)). Impedansi membran diukur pada suhu terpilih, dan konduktivitas proton arah tembus-bidang (*through-plane*), σ , dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\sigma = L / (A \cdot R) \quad (4)$$

dengan σ menyatakan konduktivitas proton ($S \text{ cm}^{-1}$), L menyatakan jarak antar-elektroda (cm), A merupakan luas penampang film membran (cm^2), dan R menyatakan resistansi membran (Ω).

Permeabilitas metanol (P) membran ditentukan menggunakan perangkat sel difusi yang dirancang khusus. Membran dipotong menjadi spesimen berbentuk lingkaran dengan jari-jari 1 cm dan dipasang di antara dua kompartemen difusi. Sel A diisi dengan 150 mL larutan metanol 2 M, sedangkan sel B berisi air deionisasi dengan volume yang sama. Kedua kompartemen diaduk terus-menerus selama percobaan untuk mempertahankan kondisi larutan yang seragam. Pada interval waktu tetap 30 menit, sebanyak 1 mL larutan diambil dan dianalisis menggunakan kromatografi gas untuk menentukan konsentrasi metanol ([Javed et al., 2026](#)). Pengukuran diulang sebanyak empat kali, dan konsentrasi metanol diplot sebagai fungsi waktu. Permeabilitas metanol kemudian dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$P = (S \cdot L \cdot V_b) / (A \cdot C_a) \quad (5)$$

dengan S menyatakan kemiringan yang diperoleh dari hasil regresi linear konsentrasi metanol sebagai fungsi waktu, sedangkan V_b menyatakan volume larutan pada kompartemen B, yaitu 150 mL. Selanjutnya, L menyatakan ketebalan membran (cm), A menunjukkan luas efektif membran (cm^2), dan C_a merupakan konsentrasi awal metanol pada kompartemen A.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Hasil sintesis membran

Hasil sintesis menunjukkan bahwa bahan filter rokok berhasil dikonversi menjadi membran berbasis selulosa asetat dengan film yang kontinu, tipis, dan stabil secara fisik. Membran CF murni memiliki ketebalan $18,2 \pm 0,3 \text{ } \mu\text{m}$, sedangkan membran termodifikasi CF/CS dan CF/CS/Al-PAA masing-masing menunjukkan ketebalan $19,1 \pm 0,2 \text{ } \mu\text{m}$ dan $19,8 \pm 0,5 \text{ } \mu\text{m}$ (lihat Tabel 1). Peningkatan ketebalan yang relatif kecil pada seri sampel ini mengindikasikan bahwa penggabungan kitosan dan modifikasi lanjutan tidak menghasilkan perubahan ketebalan yang besar, tetapi data ketebalan saja belum cukup untuk memastikan mekanisme pembentukan PEC ([Asghar & Xu, 2024](#); [Yu et al., 2024](#)).

TABEL 1. Ketebalan setiap membran

Jenis membran	Ketebalan (μm)
CF	$18,2 \pm 0,3$
CF/CS	$19,1 \pm 0,2$
CF/CS/Al-PAA	$19,8 \pm 0,5$

Seperti ditunjukkan pada Gambar 2, membran CF murni berwarna putih krem dengan permukaan yang agak heterogen, sedangkan membran termodifikasi memiliki permukaan yang lebih halus, lebih kompak, dan seragam. Hasil ini menunjukkan bahwa selulosa asetat yang berasal dari filter rokok tetap memiliki sifat pembentuk film yang efektif. Sebagaimana dilaporkan oleh [Friuli et al. \(2025\)](#), filter rokok, baik yang berasal dari puntung bekas maupun filter yang belum digunakan,

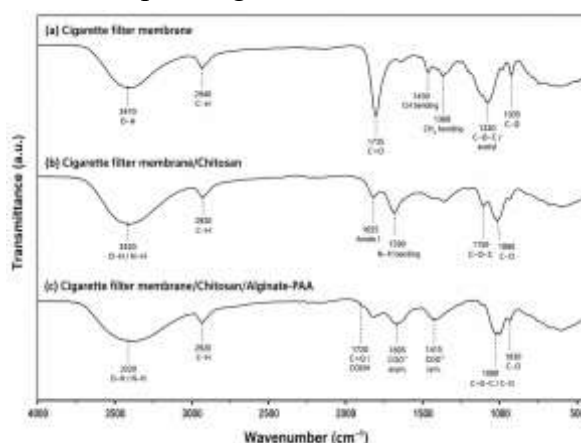
dapat direkonstitusi menjadi membran selulosa asetat melalui teknik inversi fase sehingga menghasilkan permukaan yang relatif halus dan arsitektur membran yang terdefinisi dengan baik ([Eltahan et al., 2025](#)).



Gambar 2. Visualisasi fisik membran: (a) membran CF, (b) membran CF/CS, dan (c) membran CF/Cs/Al-PAA

2. Analisis struktural membran

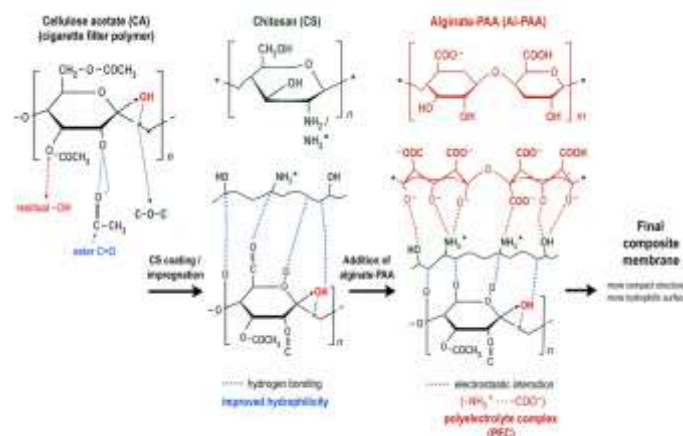
Analisis FTIR sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa pembentukan membran CF/CS/Al-PAA konsisten dengan perubahan interaksi antarmolekul setelah pembentukan membran CF/Cs dan modifikasi Al-PAA, tanpa bukti spektral yang cukup untuk menyimpulkan terbentuknya ikatan kovalen baru. Pada membran CF murni, pita khas selulosa asetat masih mendominasi, terutama serapan O–H, C–H alifatik, ester C=O, serta C–O–C/C–O, yang menegaskan bahwa kerangka dasar membran masih dikendalikan oleh matriks selulosa asetat dari filter rokok ([Vatanpour et al., 2022](#)). Karakter ini konsisten dengan laporan sebelumnya oleh [Maryudi et al. \(2024\)](#) bahwa selulosa asetat merupakan polimer membran yang mudah diproses, kaya akan gugus ester dan oksigen eter, serta sangat responsif terhadap modifikasi antarmuka melalui interaksi antarmolekul tanpa harus melibatkan pencangkakan kovalen.



Gambar 3. Spektrum FTIR membran: (a) membran CF, (b) membran CF/CS, dan (c) membran CF/Cs/Al-PAA

Setelah pembentukan membran komposit CF/Cs, pelebaran pita serapan pada daerah regangan O–H/N–H, disertai munculnya pita yang berkaitan dengan vibrasi tekuk amida dan N–H, mendukung keberadaan kitosan dalam sistem membran CF/Cs ([Hren et al., 2023](#); [Jasim et al., 2025](#)). Tidak adanya pita serapan baru yang jelas dan dapat dikaitkan dengan ikatan kovalen antara selulosa asetat dan

kitosan menunjukkan bahwa interaksi pada tahap CF/CS terutama bersifat nonkovalen. Oleh karena itu, interaksi dalam membran CF/CS diperkirakan melibatkan ikatan hidrogen antara gugus —OH , C=O , dan C—O—C pada selulosa asetat dengan gugus —OH serta $\text{—NH}_2/\text{—NH}_3^+$ pada kitosan, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4. Interpretasi ini sejalan dengan tinjauan ([Strnad & Zemljic, 2023](#)) mengenai biokomposit selulosa–kitosan, yang melaporkan bahwa kompatibilitas antarmuka antara kedua polisakarida tersebut umumnya didominasi oleh jaringan ikatan hidrogen dan interaksi antarmolekul lainnya, khususnya pada sistem yang disiapkan tanpa agen pengikat silang kovalen spesifik.



Gambar 4. Mekanisme pembentukan membran CF/CS/Al-PAA

Pada tahap modifikasi berikutnya, setelah inkorporasi Al-PAA, munculnya atau meningkatnya intensitas pita serapan yang berkaitan dengan gugus karboksilat terionisasi mengonfirmasi keberhasilan introduksi fase anionik ke dalam sistem membran. Temuan ini sangat penting karena fungsi —COO^- merupakan indikator spektral utama keberadaan alginat/PAA dalam bentuk ionik aktif yang mampu berinteraksi dengan kitosan ([Taaca et al., 2023](#)). Sebagaimana dilaporkan oleh [Kulig et al. \(2016\)](#) untuk kompleks polielektrolit kitosan–alginat (PEC), interaksi utama pada sistem tersebut berasal dari gaya tarik elektrostatis antara gugus —NH_3^+ pada kitosan terprotonasi dan gugus —COO^- pada alginat/PAA. Interaksi ionik ini dapat diperkuat lebih lanjut oleh ikatan hidrogen tambahan yang melibatkan gugus hidroksil dan karboksil ([Moghadamfar et al., 2025](#)). Oleh karena itu, perubahan yang diamati pada spektrum FTIR membran CF/CS/Al-PAA tidak hanya memverifikasi inkorporasi komponen anionik, tetapi juga mendukung terbentuknya jaringan PEC yang lebih stabil dan lebih terorganisasi secara struktural.

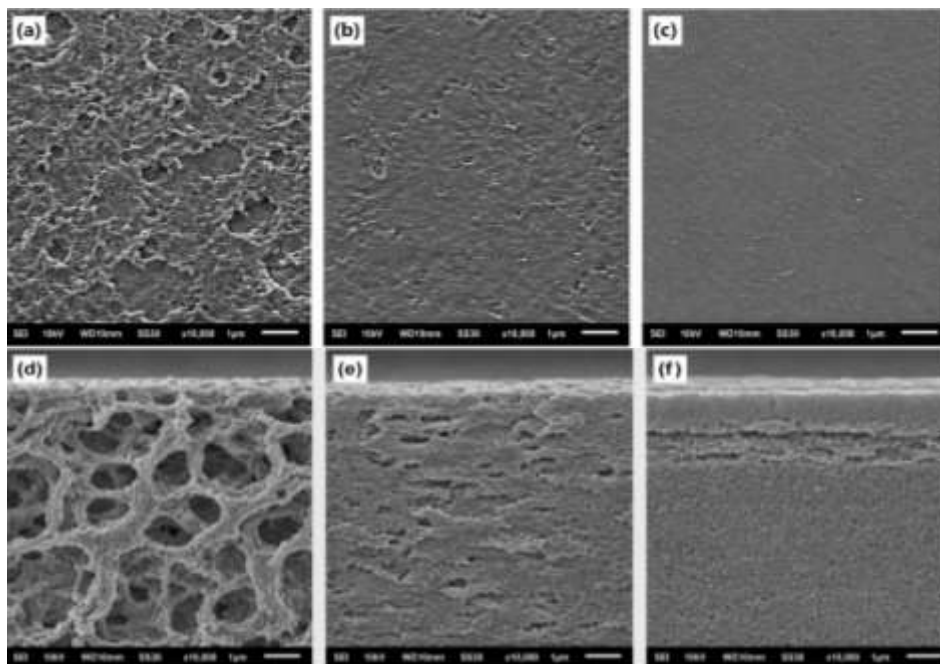
3. Morfologi permukaan membran

Mikrograf SEM pada Gambar 5 secara jelas memperlihatkan evolusi morfologi membran setelah modifikasi berurutan. Membran CF murni menunjukkan permukaan yang kasar dan heterogen dengan rongga serta pori terbuka yang terlihat, yang mengindikasikan bahwa matriks selulosa asetat daur ulang masih memiliki struktur yang relatif longgar. Morfologi semacam ini umum dijumpai pada selulosa asetat daur ulang atau membran yang berasal dari filter rokok sebelum modifikasi permukaan lebih lanjut, sebagaimana dilaporkan oleh [Fathy et al. \(2020\)](#). Setelah inkorporasi kitosan, membran CF/CS menunjukkan permukaan yang lebih seragam dan kompak dengan pori yang terlihat lebih sedikit dibandingkan membran CF murni. Hal ini menunjukkan bahwa kitosan berperan sebagai fase pelapis dan/atau pengisi yang secara parsial menutupi cacat permukaan serta meningkatkan

kontinuitas membran (Wang et al., 2012). Perilaku tersebut konsisten dengan sifat pembentuk film kitosan dan kemampuannya menghasilkan struktur yang lebih rapat melalui interaksi antarmolekul di antara rantai polimer.

Peningkatan lebih lanjut diamati pada membran CF/CS/Al-PAA, dengan permukaan yang menjadi lebih halus, lebih rapat, dan lebih homogen. Transformasi ini konsisten dengan kemungkinan pembentukan jaringan kompleks polielektrolit melalui interaksi elektrostatik antara gugus amina terprotonasi pada kitosan dan gugus karboksilat pada alginat/PAA, yang didukung oleh ikatan hidrogen tambahan (Livazovic et al., 2015). Kecenderungan serupa dilaporkan oleh Kulig et al. (2016) pada membran berbasis PEC kitosan–alginat dan sistem terkait, di mana kompleksasi menghasilkan matriks membran yang lebih kompak dan stabil secara struktural.

Citra penampang melintang menunjukkan kecenderungan yang sama. Membran CF murni memperlihatkan struktur internal yang berpori dan tidak beraturan, sedangkan membran CF/CS menjadi lebih rapat tetapi masih mengandung beberapa rongga. Sebaliknya, membran CF/CS/Al-PAA menunjukkan penampang paling kompak dengan daerah berlapis yang lebih mudah dibedakan. Lapisan-lapisan tersebut kemungkinan berkaitan dengan deposisi bertahap dan perakitan antarmuka selama pembentukan PEC (Jonkers et al., 2024). Secara keseluruhan, hasil SEM menegaskan bahwa modifikasi berurutan mengubah membran CF dari struktur kasar dan berpori menjadi membran yang lebih rapat, lebih homogen, dan lebih terorganisasi. Morfologi kompak ini menguntungkan untuk aplikasi DMFC karena dapat meningkatkan tortuositas jalur difusi metanol dan berpotensi mengurangi *crossover* metanol.



Gambar 5. Mikrograf SEM permukaan atas membran: (a) CF, (b) CF/CS, (c) CF/CS/Al-PAA; dan penampang melintang: (d) CF, (e) CF/CS, (f) CF/CS/Al-PAA

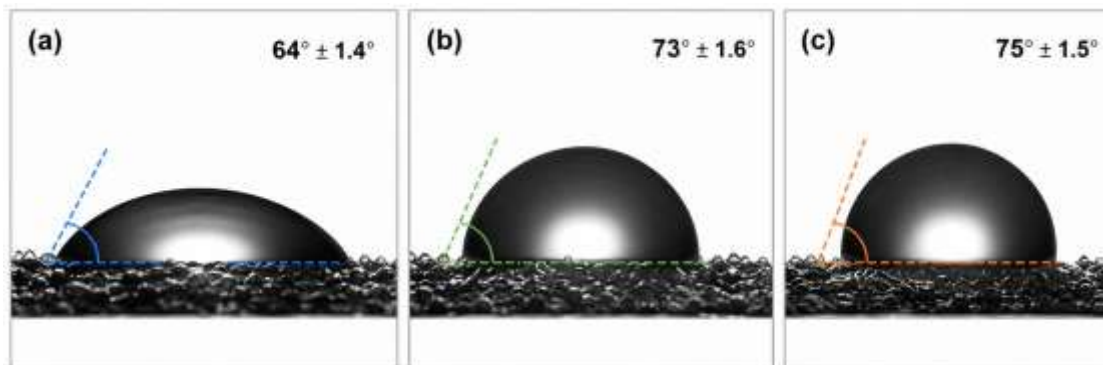
4. Wettability, serapan metanol, dan indeks pengembangan membran

Tabel 2 merangkum nilai serapan metanol, indeks pengembangan, dan sudut kontak yang menunjukkan perubahan sifat fisikokimia membran yang sangat konsisten sebelum dan sesudah

modifikasi. Penurunan serapan metanol dari $62,3 \pm 1,8\%$ pada CF menjadi $57,9 \pm 2,1\%$ pada CF/CS, kemudian menjadi $41,7 \pm 2,5\%$ pada CF/CS/Al-PAA, yang diikuti penurunan indeks pengembangan masing-masing dari $71,3 \pm 1,8$ menjadi $59,6 \pm 1,3$ dan $43,8 \pm 2,5$, menunjukkan bahwa modifikasi bertahap berhasil menekan kemampuan membran menyerap metanol sekaligus membatasi ekspansi dimensional jaringan (Kim et al., 2016). Dalam sistem DMFC, kedua parameter tersebut sangat penting karena *crossover* metanol pada dasarnya dikendalikan oleh kombinasi sorpsi metanol dan transport metanol di dalam matriks; oleh karena itu, membran dengan serapan dan pengembangan yang lebih rendah umumnya memiliki peluang lebih besar untuk menunjukkan *crossover* yang lebih kecil (Lang et al., 2025). Kecenderungan ini didukung oleh hasil SEM yang menunjukkan transformasi morfologi dari struktur CF yang lebih kasar, berpori, dan heterogen menjadi membran CF/CS yang lebih homogen, kemudian menjadi CF/CS/Al-PAA yang lebih kompak dan berlapis. Pemadatan morfologi ini secara langsung mengurangi volume bebas, menutup pori terbuka, serta meningkatkan tortuositas jalur difusi sehingga semakin membatasi penetrasi metanol ke dalam membran (Niu et al., 2018).

TABEL 2. Sifat fisikokimia setiap membran

Jenis membran	Serapan metanol (%)	Indeks pengembangan (%)	Sudut kontak ($^{\circ}$)	IEC (mmol g ⁻¹)
CF	$62,3 \pm 1,8$	$71,3 \pm 1,8$	$64 \pm 1,4$	$1,04 \pm 0,02$
CF/CS	$57,9 \pm 2,1$	$59,6 \pm 1,3$	$73 \pm 1,6$	$1,07 \pm 0,01$
CF/CS/Al-PAA	$41,7 \pm 2,5$	$43,8 \pm 2,5$	$75 \pm 1,5$	$1,14 \pm 0,01$



Gambar 6. Sudut kontak air membran: (a) CF, (b) CF/CS, dan (c) CF/CS/Al-PAA

Menariknya, sudut kontak membran (lihat Gambar 6) menunjukkan kecenderungan meningkat setelah modifikasi dengan kitosan dan Al-PAA, yang secara struktural menambahkan gugus hidrofilik. Namun, hasil FTIR menunjukkan bahwa setelah penambahan Al-PAA terjadi peningkatan intensitas pita serapan karboksilat, yang mendukung pembentukan kompleks polielektrolit (PEC) melalui interaksi $-\text{NH}_3^+ \cdots -\text{COO}^-$ antara kitosan dan alginat/PAA. Kompleksasi ini diperkirakan menurunkan mobilitas rantai, meningkatkan kohesi jaringan, dan menstabilkan film (Han et al., 2026). Dalam kondisi tersebut, sebagian gugus polar tidak lagi sepenuhnya bebas pada permukaan karena terlibat dalam pasangan ion dan jaringan ikatan hidrogen, sedangkan topografi yang lebih rapat juga mengurangi pembasahan kapiler (Koyuncu et al., 2023). Kondisi ini menyebabkan peningkatan sudut kontak sekaligus penurunan pengembangan dan serapan metanol. Secara fisikokimia, kombinasi ini lebih relevan bagi DMFC dibandingkan membran yang terlalu mudah terbasahi, karena membran yang terlalu hidrofilik sering kali juga lebih mudah tersolvasi oleh metanol. Dengan kata lain, data ini menunjukkan bahwa CF/CS/Al-PAA tidak hanya lebih rapat,

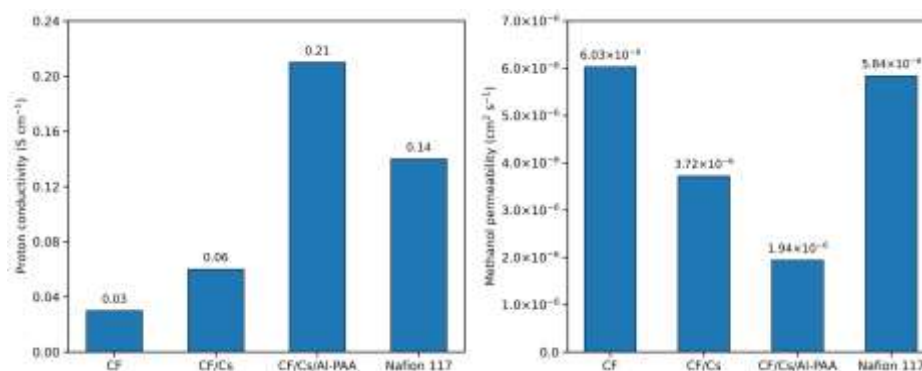
tetapi juga lebih selektif secara struktural dan kimiawi, sehingga paling prospektif untuk menghasilkan *crossover* metanol yang lebih rendah ([Saffarimiandoab et al., 2021](#)).

5. Kapasitas pertukaran ion

Kapasitas pertukaran ion (IEC) merupakan parameter penting yang menunjukkan konsentrasi gugus fungsi yang dapat dipertukarkan dan kemampuan awal membran dalam memfasilitasi transport proton. Pada membran elektrolit polimer untuk DMFC, IEC ditentukan oleh jumlah, distribusi, dan aksesibilitas gugus polar atau ionik, seperti hidroksil, amina, karboksil, dan gugus asam, yang mendorong disosiasi proton serta membentuk domain penghantar ion terhidrasi. Dalam penelitian ini, IEC meningkat dari $1,04 \pm 0,02 \text{ mmol g}^{-1}$ pada CF murni menjadi $1,07 \pm 0,01 \text{ mmol g}^{-1}$ pada CF/CS dan $1,14 \pm 0,01 \text{ mmol g}^{-1}$ pada CF/CS/Al-PAA. Nilai terakhir sedikit lebih tinggi daripada Nafion 117 komersial ($1,12 \pm 0,02 \text{ mmol g}^{-1}$) ([Bilal et al., 2026](#)), yang menunjukkan bahwa modifikasi berurutan meningkatkan kerapatan situs ionik aktif ([Wibisono et al., 2024](#)). Peningkatan setelah penambahan kitosan berkaitan dengan kontribusi gugus amina, sedangkan peningkatan yang lebih nyata setelah penambahan Al-PAA menegaskan peran komponen anionik kaya karboksilat. Interaksi antara gugus $-\text{NH}_3^+$ pada kitosan dan $-\text{COO}^-$ pada alginat/PAA, bersama matriks CF terhidrasi, membentuk pasangan asam-basa yang menyediakan situs aktif proton tambahan dan memfasilitasi migrasi proton melalui mekanisme lompatan ([Abd-El-Khalek et al., 2019](#)). Dengan demikian, kenaikan IEC mencerminkan terbentuknya struktur polielektrolit yang lebih kaya ion dan lebih terhubung, sehingga CF/CS/Al-PAA berpotensi lebih baik dalam mendukung transport proton dibandingkan CF murni.

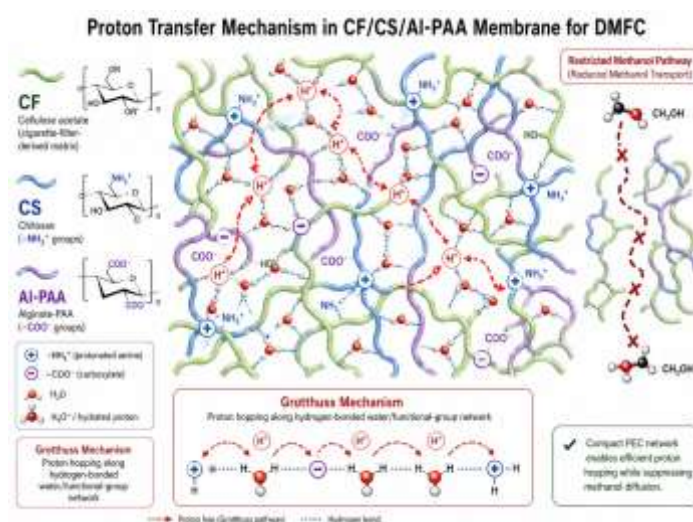
6. Konduktivitas proton dan permeabilitas metanol

Konduktivitas proton merupakan parameter utama membran DMFC karena secara langsung menentukan efisiensi transport proton melalui elektrolit dan memengaruhi kinerja sel. Seperti ditunjukkan pada Gambar 7, konduktivitas proton meningkat dari $0,03 \text{ S cm}^{-1}$ pada CF murni menjadi $0,06 \text{ S cm}^{-1}$ pada CF/Cs dan $0,21 \text{ S cm}^{-1}$ pada CF/Cs/Al-PAA, melampaui Nafion 117 ($0,14 \text{ S cm}^{-1}$). Kecenderungan ini menegaskan bahwa peningkatan IEC dari $1,04 \pm 0,02$ menjadi $1,07 \pm 0,01$ dan $1,14 \pm 0,01 \text{ mmol g}^{-1}$ bermakna secara fungsional karena IEC merepresentasikan kerapatan situs pertukaran ion yang mendukung konduksi proton ([Doobi & Mir, 2024](#)). Peningkatan tersebut berkaitan dengan introduksi gugus $-\text{NH}_2/-\text{NH}_3^+$ dari kitosan dan $-\text{COO}^-$ dari alginat/PAA, yang memperkaya situs donor-akseptor proton dan membentuk domain ionik/hidrofilik saling terhubung ([Vatanpour et al., 2016](#)). Penjelasan ini konsisten dengan hasil FTIR yang menunjukkan penguatan daerah O-H/N-H serta kemunculan atau peningkatan pita karboksilat setelah modifikasi.



Gambar 7. Konduktivitas proton dan permeabilitas metanol setiap membran

Yang lebih penting, transport proton pada CF/Cs/Al-PAA paling mungkin difasilitasi melalui mekanisme lompatan tipe *Grotthuss* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8, yaitu proton bermigrasi sepanjang jaringan ikatan hidrogen yang dibentuk oleh gugus fungsi polar dan air terikat, bukan hanya bergantung pada difusi vehikular spesies hidronium ([Bilal et al., 2026](#)). Interpretasi ini konsisten dengan literatur PEM yang lebih luas, di mana konduksi proton yang efisien terjadi ketika situs ionik yang berdekatan dan jaringan ikatan hidrogen membentuk jalur lompatan kontinu dengan hambatan transfer yang lebih rendah. Pada sistem ini, keberadaan bersama gugus $-OH$, $-NH_3^+$, dan $-COO^-$, disertai morfologi yang lebih homogen sebagaimana diamati melalui SEM, menunjukkan bahwa jaringan kompleks polielektrolit (PEC) tidak mengganggu transport; sebaliknya, jaringan tersebut tampaknya menata domain penghantar proton secara lebih efektif. Perilaku serupa juga telah dilaporkan pada PEM berbasis selulosa dan kitosan, di mana konduktivitas proton meningkat hanya ketika gugus ionik, hidrasi lokal, dan arsitektur domain hidrofilik tersusun secara koheren ([Javed et al., 2026](#)). Mekanisme *Grotthuss* pada Gambar 8 merupakan penjelasan konseptual yang konsisten dengan kecenderungan data, bukan mekanisme yang telah dibuktikan secara langsung oleh pengukuran pada penelitian ini.



Gambar 8. Mekanisme transport proton melalui lompatan tipe *Grotthuss*

Secara menarik, peningkatan konduktivitas proton berlangsung bersamaan dengan penurunan permeabilitas metanol yang signifikan, yaitu dari $6,03 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ pada membran CF murni menjadi $3,72 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ pada CF/Cs, dan selanjutnya menjadi $1,94 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ pada CF/Cs/Al-PAA, yang jauh lebih rendah dibandingkan Nafion 117 ($5,84 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$). Hal ini menunjukkan bahwa modifikasi membran tidak menimbulkan kompromi berat yang klasik antara transport proton dan sifat penghalang metanol, tetapi justru meningkatkan selektivitas membran, yang merupakan tujuan utama dalam perancangan membran DMFC ([Mahlangu et al., 2023](#)). Penurunan permeabilitas sepenuhnya konsisten dengan penurunan serapan metanol dan indeks pengembangan yang diamati sebelumnya, disertai peningkatan sudut kontak; keseluruhan hasil tersebut menunjukkan membran yang kurang mudah mengalami sorpsi metanol dan kurang rentan terhadap ekspansi akibat pelarut. Hasil SEM mendukung interpretasi ini dengan menunjukkan morfologi yang secara bertahap menjadi lebih rapat, kurang berpori, dan lebih berlapis, sehingga mengurangi volume bebas serta meningkatkan tortuositas jalur difusi ([Moghadamfar et al., 2025](#)). Pada membran DMFC, permeabilitas metanol yang rendah umumnya berkaitan dengan berkurangnya sorpsi metanol dan

meningkatnya hambatan difusi dalam jaringan polimer yang kompak. Oleh sebab itu, kombinasi konduktivitas proton yang tinggi dan permeabilitas metanol yang rendah pada CF/Cs/Al-PAA sangat menunjukkan bahwa membran telah mencapai keseimbangan yang menguntungkan antara transport ion dan kemampuan menahan bahan bakar, sehingga menjadi dasar untuk menilai material ini lebih lanjut sebagai kandidat membran pertukaran proton bagi DMFC (Alam, 2025). Meskipun demikian, penelitian ini belum melibatkan pengujian membrane electrode assembly (MEA) atau kinerja sel tunggal DMFC, sehingga capaian parameter membran tidak dapat disamakan dengan peningkatan daya atau efisiensi sel yang terverifikasi. Keterbatasan penting lainnya perlu diakui. Konduktivitas proton dan permeabilitas metanol hanya diukur pada suhu 80 °C sehingga ketergantungan transport proton dan difusi metanol terhadap suhu belum dapat dievaluasi secara sistematis. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu mencakup pengukuran pada rentang suhu yang lebih luas untuk menetapkan mekanisme transport secara lebih kuat dan menilai ketahanan praktis membran pada kondisi operasi yang realistis.

D. Kesimpulan

Penelitian ini memperlihatkan bahwa selulosa asetat dari limbah filter rokok dapat diproses menjadi membran dan dimodifikasi menggunakan kitosan serta alginat–poli(asam akrilat). Perubahan FTIR dan morfologi SEM mendukung adanya interaksi antarmolekul dan struktur yang lebih kompak pada CF/Cs/Al-PAA, meskipun karakter tersebut belum secara langsung membuktikan jalur transport proton tertentu. Pada kondisi pengujian dalam penelitian ini, membran CF/Cs/Al-PAA memiliki IEC $1,14 \pm 0,01 \text{ mmol g}^{-1}$, konduktivitas proton $0,21 \text{ S cm}^{-1}$, dan permeabilitas metanol $1,94 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Nilai konduktivitas proton dan permeabilitas metanol tersebut masing-masing lebih tinggi dan lebih rendah daripada hasil pengukuran Nafion 117 yang dilaporkan sebagai pembanding. Temuan ini menunjukkan potensi CF/Cs/Al-PAA untuk dikembangkan sebagai membran pertukaran proton pada aplikasi DMFC, tetapi belum membuktikan peningkatan kinerja DMFC dalam perangkat. Evaluasi pada rentang suhu lebih luas, pengujian stabilitas, serta pengujian MEA atau single-cell masih diperlukan untuk menilai kelayakan operasionalnya.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN ARTIFISIAL (PILIH SALAH SATU)

	<i>Penulis menggunakan ChatGPT (GPT-5.6 Sol) untuk menyunting bahasa, merapikan tata tulis, dan mendesain ilustrasi prosedur. Seluruh keluaran telah diperiksa dan diverifikasi oleh penulis, dan penulis bertanggung jawab penuh atas isi artikel.</i>
--	---

PERNYATAAN KONTRIBUSI PENULIS

Muhammad Nur Alam	<i>Menyusun draft artikel, revisi, konseptualisasi</i>
Gusma Harfiana Abbas	<i>Menyusun artikel, supervisi</i>
Sri Wahyuningsih	<i>Design gambar, editing</i>
Rieka Nurul Dwi	<i>Editing layout</i>
Zulfiqar Busrah	<i>Analisis statistik</i>

PERNYATAAN PENDANAAN

	<i>Penelitian ini didanai oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Universitas Negeri Makassar, Indonesia.</i>
--	--

PERNYATAAN KONFLIK KEPENTINGAN

	<i>Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan terkait penelitian, kepenulisan, maupun penerbitan artikel ini.</i>
--	--

Daftar Pustaka

- Abd-El-Khalek, D. E., Abd-El-Nabey, B. A., Morsy, A., Ebrahim, Sh., & Ramadan, S. R. (2019). Improvement of performance and antifouling properties of reverse osmosis membranes using green additive. *Desalination and Water Treatment*, 142, 65–71. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23481>
- Abdelsamad, A. M. A., et al. (2026). Two-bilayer polyelectrolyte multilayered nanofiltration membranes for highly efficient removal of PFAS from water. *Journal of Membrane Science*, 744, 125180. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2026.125180>
- Acarer Arat, S. (2024). A review on cigarette butts: Environmental abundance, characterization, and toxic pollutants released into water from cigarette butts. *Science of The Total Environment*, 928, 172327. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172327>
- Ahmad, M., Ahmed, M., Ali, A., Wani, T. A., Khalid, K., & Ali, I. (2024). Effect of the polyelectrolyte multilayers' charge on water splitting, fluxes of ions, selectivities and current efficiencies in ion transport through membranes. *Desalination*, 587. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117925>
- Alam, M. N. (2025). A Review: Nanofiller for Chitosan Membrane in DMFC Application. *Hayyan Journal*, 2(2), 52–60.
- Asghar, M. R., & Xu, Q. (2024). A review of advancements in commercial and non-commercial Nafion-based proton exchange membranes for direct methanol fuel cells. *Journal of Polymer Research*, 31(5), 125. <https://doi.org/10.1007/s10965-024-03964-y>
- Bilal, M., He, K., Lu, J., Li, Z., Jasieniak, J., & Wang, H. (2026). Proton exchange membranes with monolayer graphene nanosheet nanofillers for direct methanol fuel cells. *Chemical Engineering Journal*, 536, 175836. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.175836>
- Doobi, F. A., & Mir, F. Q. (2024). Exploring the development of natural biopolymer (chitosan)-based proton exchange membranes for fuel cells: A review. *Results in Surfaces and Interfaces*, 15, 100218. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100218>
- Elahi, S., Pourafshari Chenar, M., Sabzekar, M., & Ulbricht, M. (2025). Fabrication of durable superhydrophobic polypropylene membrane for hypersaline brine desalination using direct contact membrane distillation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(4), 117242. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117242>
- Eltahan, A., et al. (2025). Advanced fabrication and characterization of thin-film composite polyamide membranes for superior performance in reverse osmosis desalination. *Scientific Reports*, 15(1), 15131. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97871-x>
- 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>

- Friuli, M., et al. (2025). Eco-friendly recovery of cellulose acetate from combusted cigarette filters and reuse for membrane fabrication. *Waste Management*, 204, 114915. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114915>
- Han, Y., Xu, F., Huang, K., Wang, H., Ren, X., & Lin, B. (2026). Branched poly(alkyl-fluorene biphenyl) based membranes for high-temperature proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Membrane Science*, 747, 125318. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2026.125318>
- Hren, M., Roschger, M., Hacker, V., Genorio, B., Fakin, D., & Gorgieva, S. (2023). High performance chitosan/nanocellulose-based composite membrane for alkaline direct ethanol fuel cells. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127693. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127693>
- Jasim, S. A., Al Maimuri, N. M. L., Hashim, A., Abbas, M. H., Hadi, A., & Ibrahim, H. (2025). Fabrication and Enhancing the Features of Chitosan/SnO₂-ZnO Nanocomposites Films for Optoelectronics and Biological Applications. *Trends in Sciences*, 22(10), 10534. <https://doi.org/10.48048/tis.2025.10534>
- Javed, O., et al. (2026). Poly (bulky-aryl branched-piperidinium) anion exchange membranes for fuel cell and water electrolyzer applications. *Journal of Membrane Science*, 751, 125558. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2026.125558>
- Jiang, Z., Zheng, X., Wu, H., Wang, J., & Wang, Y. (2008). Proton conducting CS/P(AA-AMPS) membrane with reduced methanol permeability for DMFCs. *Journal of Power Sources*, 180(1), 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.01.049>
- Jonkers, W. A., de Vos, W. M., & te Brinke, E. (2024). Asymmetric polyelectrolyte multilayer membranes: Influence of bottom section polycation on layer growth and retention mechanisms. *Journal of Membrane Science*, 698. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.122577>
- 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, D. W., Choi, J., Kim, D., & Jung, H.-T. (2016). Enhanced water permeation based on nanoporous multilayer graphene membranes: the role of pore size and density. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(45), 17773–17781. <https://doi.org/10.1039/C6TA06381K>
- Kiran, P. S., et al. (2024). Fabrication of nanoporous multilayer graphene nanoplatelets membrane for water desalination. *Desalination*, 575. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117291>
- Koyuncu, I., et al. (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>
- Kulig, D., Zimoch-Korzycka, A., Jarmoluk, A., & Marycz, K. (2016). Study on Alginate–Chitosan Complex Formed with Different Polymers Ratio. *Polymers (Basel)*, 8(5), 167. <https://doi.org/10.3390/polym8050167>
- Lang, M., Luo, J., Wan, Y., Wang, X., Chen, X., & Zeng, G. (2025). Dual-functional reverse osmosis membranes: A novel Approach to Combat biofouling with enhanced antibacterial and

- Antiadhesion properties. *Journal of Membrane Science*, 718, 123699. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2025.123699>
- Livazovic, S., Li, Z., Behzad, A. R., Peinemann, K. V., & Nunes, S. P. (2015). Cellulose multilayer membranes manufacture with ionic liquid. *Journal of Membrane Science*, 490, 282–293. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2015.05.009>
- Mahlangu, O. T., Mamba, G., & Mamba, B. B. (2023). A facile synthesis approach for GO-ZnO/PES ultrafiltration mixed matrix photocatalytic membranes for dye removal in water: Leveraging the synergy between photocatalysis and membrane filtration. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110065>
- Maryudi, M., Hakika, D. C., & Amillia, A. (2024). Morphology and selected properties of cellulose acetate membranes for environmental applications. *Polimery*, 69(5), 292–299. <https://doi.org/10.14314/polimery.2024.5.2>
- Moghadamfar, T., López, J., Cortina, J. L., del Valle, L. J., & Reig, M. (2025). Optimized ion selectivity in nanofiltration membranes via poly(allylamine hydrochloride) (PAH) and poly(styrene sulfonate) (PSS) layer-by-layer self-assembly. *Journal of Water Process Engineering*, 77, 108553. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108553>
- Moradi, M. R., et al. (2024). Polyelectrolyte multilayers modification of nanofiltration membranes to improve selective separation of mono- and multivalent cations in seawater brine. *Journal of Membrane Science*, 691. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.122224>
- Niu, F., Huang, M., Cai, T., & Meng, L. (2018). Effect of Membrane Thickness on Properties of FO Membranes with Nanofibrous Substrate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 170, 052005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/5/052005>
- Pan, J., Wang, Z., Zhang, Z., Liu, J., Chen, J., & Cao, Y. (2026). Multiple reversible hydrogen bonding-mediated self-healing PVA/Nafion/Sulfonated cellulose proton exchange membrane for direct methanol fuel cells. *Polymer*, 343, 129418. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.129418>
- Permana, D., Atmaja, L., Priyanga, A., Kedang, Y. I., & Santoso, M. (2024). Utilization of cellulose-based carbon nanodots in sulfonated polysulfone based membrane for direct methanol fuel cell. *South African Journal of Chemical Engineering*, 48, 265–275. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.02.009>
- Priyanga, A., Pambudi, A. B., Atmaja, L., & Jaafar, J. (2020). Synthesis of nanocellulose composite membrane and its properties for direct methanol fuel cell. In *Materials Today: Proceedings* (pp. 1998–2003). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.602>
- Regenspurg, J. A., Jonkers, W. A., Junker, M. A., Achterhuis, I., te Brinke, E., & de Vos, W. M. (2024). Polyelectrolyte multilayer membranes: An experimental review. *Desalination*, 583. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117693>
- Saffarimiandoab, F., et al. (2021). A review on membrane fouling: Membrane modification. *Desalination and Water Treatment*, 216, 47–70. <https://doi.org/10.5004/DWT.2021.26815>
- 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

- p>membranes for NOM rejection.
- Heliyon*
- , 9(3), e13736.
-
- <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E13736>
- Strnad, S., & Zemljč, L. (2023). Cellulose–Chitosan Functional Biocomposites. *Polymers (Basel)*, 15(2), 425. <https://doi.org/10.3390/polym15020425>
- Taaca, K. L. M., Nakajima, H., Thumanu, K., Prieto, E. I., & Vasquez, M. R. (2023). Network formation and differentiation of chitosan–acrylic acid hydrogels using X-ray absorption spectroscopy and multivariate analysis of Fourier transform infrared spectra. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2023.147372>
- Vatanpour, V., Yekavalangi, M. E., & Safarpour, M. (2016). Preparation and characterization of nanocomposite PVDF ultrafiltration membrane embedded with nanoporous SAPO-34 to improve permeability and antifouling performance. *Separation and Purification Technology*, 163, 300–309. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.03.011>
- Vatanpour, V., et al. (2022). Cellulose acetate in fabrication of polymeric membranes: A review. *Chemosphere*, 295, 133914. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.133914>
- Wang, C., et al. (2012). Click poly(ethylene glycol) multilayers on RO membranes: Fouling reduction and membrane characterization. *Journal of Membrane Science*, 409–410, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.02.049>
- Wang, C., et al. (2022). Inkjet printed polyelectrolyte multilayer membrane using a polyketone support for organic solvent nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, 642, 119943. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2021.119943>
- Wibisono, Y., et al. (2024). Waste cigarette filters-based polymer blends membrane for filtration of high loaded natural organic matter river water. *Cleaner Engineering and Technology*, 22, 100816. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100816>
- Wibowo, D., et al. (2023). CA/PEG/chitosan membrane incorporated with TiO₂ nanoparticles for strengthening and permselectivity membrane for reverse osmosis desalination. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20, 100848. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100848>
- Xiao, M., et al. (2022). Characterizing surface porosity of porous membranes via contact angle measurements. *Journal of Membrane Science Letters*, 2(1), 100022. <https://doi.org/10.1016/j.memlet.2022.100022>
- Yu, M., et al. (2024). Theoretical and experimental research of polyelectrolyte multilayer membrane prepared by layer by layer self-assembly. *Desalination*, 580, 117561. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117561>