

SINTESIS MEMBRAN AKRILONITRIL BUTADIENA STIRENA TERMODIFIKASI FILLER SULFONASI GRAFENA OKSIDA TEREDUKSI DAN CERIUM OKSIDA

Riska Listiarini Iskandar¹, Sarah Dampang^{2*}, Muhammad Fahmi Hakim³, Meka Saima Perdani⁴, Firgi Siswantito⁵, Eri Widiyanto⁶, Najmudin Fauji⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Study Program of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Singaperbangsa Karawang, 41361
Email: sarah.dampang@staff.unsika.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan polimer *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) sebagai membran alternatif untuk aplikasi *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) telah diteliti. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh suhu sulfonasi terhadap kinerja membran ABS termodifikasi grafena oksida tereduksi/cerium oksida (s-rGO/CeO₂). Membran disintesis melalui proses sulfonasi pada suhu 65°C, 75°C, dan 85°C dengan komposisi pengisi 3% v/v. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan filler meningkatkan nilai Kapasitas Penukar Ion (KPI) secara signifikan, dengan nilai tertinggi sebesar 0,375 meq/g pada suhu 85°C, serta menurunkan permeabilitas metanol secara optimal pada suhu 65°C ($1,26684 \times 10^{-7}$ cm²/s). Analisis FTIR mengonfirmasi keberhasilan sulfonasi melalui munculnya puncak gugus sulfonat (S=O) pada 1054 cm⁻¹ dan gugus karbonil (C=O) pada 1734 cm⁻¹, yang mengindikasikan adanya interaksi antara filler dan matriks ABS. Peningkatan polaritas dan hidrofilisitas membran akibat penambahan filler menunjukkan bahwa membran ABS termodifikasi filler memiliki prospek sebagai alternatif membran untuk aplikasi DMFC.

Kata kunci: Membran, filler, *Direct Methanol Fuel Cell*

Abstract

The utilization of *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) polymer as an alternative membrane for *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) applications has been investigated. This study aims to evaluate the effect of sulfonation temperature on the performance of ABS membranes modified with reduced graphene oxide/cerium oxide (s-rGO/CeO₂). The membranes were synthesized via sulfonation at 65 °C, 75 °C, and 85 °C, with a filler composition of 3% v/v. The results indicate that the addition of filler significantly increases the Ion Exchange Capacity (IEC), with the highest value of 0.375 meq/g obtained at a sulfonation temperature of 85 °C, while methanol permeability was optimally reduced at 65 °C (1.26684×10^{-7} cm²/s). FTIR analysis confirms successful sulfonation, as evidenced by the appearance of sulfonate (S=O) absorption peaks at 1054 cm⁻¹ and carbonyl (C=O) peaks at 1734 cm⁻¹, indicating interactions between the filler and the ABS matrix. The increased polarity and hydrophilicity of the membrane resulting from filler incorporation demonstrate that filler-modified ABS membranes have strong potential as alternative membranes for DMFC applications.

Keywords: Membrane, filler, *Direct Methanol Fuel Cell*

1. Pendahuluan

Ketergantungan terhadap energi fosil masih mendominasi penggunaan energi di Indonesia. Hal ini menyebabkan penurunan cadangan energi fosil dan mendorong perlunya peralihan ke sumber energi alternatif yang lebih ramah lingkungan. Teknologi yang mampu menghasilkan listrik melalui reaksi elektrokimia tanpa proses pembakaran adalah *fuel cell*. Kelebihan utama dari sel bahan bakar (*fuel cell*) adalah kemampuannya untuk beroperasi dengan efisiensi tinggi, yakni antara 50-70%, dan tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca (Fan et al., 2021).

Teknologi sel bahan bakar (*Fuel Cell*) yang paling menjanjikan adalah *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC). Teknologi ini menggunakan metanol cair sebagai sumber energinya. Metanol mengalami reaksi menghasilkan proton pada anoda dan bergerak melalui membran konduktif menuju katoda. Peran dari membran penukar proton dalam sistem ini adalah untuk pemisahan elektroda dan memastikan transfer proton yang efisien (Basso Peressut et al., 2021).

Membran polimer perfluorosulfonik, seperti Nafion, telah lama digunakan sebagai standar dalam DMFC karena kemampuannya dalam menghantarkan proton dengan baik.

Namun, kekurangan dari Nafion adalah harganya masih relatif mahal dan tingginya tingkat permeabilitas terhadap metanol (Arbizzani et al., 2010). Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menemukan membran alternatif yang mampu mencegah perpindahan metanol dan memiliki kemampuan dalam pertukaran ion dan proton.

Membran hidrokarbon telah banyak dikembangkan untuk meningkatkan performa sel bahan bakar sekaligus mengurangi biaya produksi. Material yang dianggap memiliki potensi besar adalah *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) yang merupakan suatu campuran ko-polimer yang kuat dan tahan lama dengan stabilitas termal dan mekanik yang baik. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Raza et al., 2020)) menyebutkan bahwa membran berbasis ABS menawarkan stabilitas mekanik yang baik dan ketahanan terhadap deformasi, sehingga sulit berubah bentuk pada suhu tinggi.

Penambahan nanomaterial seperti *graphene oxide reduced* (rGO) yang dimodifikasi dengan proses sulfonasi berbasis membran mampu secara efektif menekan permeabilitas metanol dengan tetap mempertahankan stabilitas termal yang tinggi (Mandanipour, 2021). Selain itu, bahan tambahan seperti Cerium Oksida (CeO_2) menjadi alternatif yang menarik untuk dikaji karena dapat memperpanjang umur membran dengan melindunginya dari kerusakan oksidatif (Sharma et al., 2021)(Lord et al., 2021).

Penggunaan membran ABS yang dimodifikasi dengan grafena oksida tersulfonasi dan cerium oksida telah banyak dilaporkan dalam penelitian DMFC. Namun, pembahasan mengenai pengaruh suhu sulfonasi Grafena Oksida tereduksi terhadap Kapasitas Penukar Ion (KPI) dan permeabilitas metanol masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini menghadirkan keterbaruan melalui penerapan variasi sulfonasi Grafena Oksida tereduksi pada suhu 65°C, 75°C, dan 85°C untuk mengidentifikasi kondisi sulfonasi yang paling optimal terhadap kinerja membran ABS pada aplikasi DMFC. Peningkatan suhu sulfonasi ini bertujuan untuk meningkatkan jumlah gugus sulfonat ($-\text{SO}_3\text{H}$) yang terikat pada struktur membran. Gugus $-\text{SO}_3\text{H}$ ini berperan sebagai situs aktif penukaran proton, sehingga peningkatan densitasnya akan berpotensi meningkatkan KPI melalui mekanisme transfer proton (Seo et al., 2020).

Berdasarkan tujuan tersebut, hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah bahwa sulfonasi pada suhu 85 °C menghasilkan peningkatan Kapasitas Penukar Ion (KPI) lebih tinggi dibandingkan suhu 65 °C dan 75 °C, sedangkan nilai permeabilitas metanol minimum pada suhu sulfonasi menengah (65 °C dan 75 °C) sehingga terdapat kompromi kinerja antara konduktivitas ion dan ketahanan metanol.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Bahan

Grafena Oksida Tereeduksi (rGO); *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) dari Polylac®; Cerium Oksida (CeO_2); Dimetilformamida (DMF) dari ACS; Asam Sulfat (98%), Isopropil Alkohol, Metanol, NaOH, dan NaCl dari Merck.

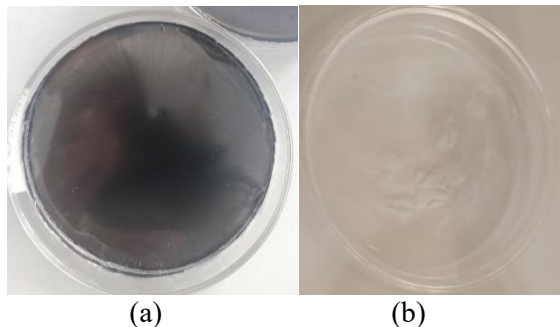
2.2 Preparasi Larutan ABS

Polimer ABS dikeringkan dalam oven pada suhu 50°C selama 30 menit untuk menghilangkan kontaminan dan mengurangi kadar air. Setelah itu, sebanyak 1,5-gram polimer ABS dilarutkan dalam 50 mL *dimetilformamida* (DMF) dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 2 jam pada suhu ruang.

2.3 Pembuatan Filler s-rGO dan CeO_2

Proses sulfonasi dilakukan dengan menggunakan alat refluks. Sebanyak 0,1-gram rGO dicampur dengan 50 mL asam sulfat pekat (98%) dengan variasi suhu 65 °C, 75 °C, 85 °C, sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 2 jam. Setelah reaksi selesai, campuran reaksi dituangkan ke dalam gelas kimia yang telah diisi air es untuk menghentikan proses reaksi. Endapan yang terbentuk disaring menggunakan kertas saring, sementara pH air sisa endapan dinetralkan menggunakan aquades. Endapan s-rGO yang diperoleh kemudian dikeringkan di dalam oven pada suhu 60 °C selama 12 jam. Setelah proses pengeringan selesai, sebanyak 0,05-gram s-rGO disiapkan untuk dicampur dengan CeO_2 dengan perbandingan massa 1:1. Campuran s-rGO dan CeO_2 kemudian dilarutkan dalam 10 mL larutan isopropil alkohol (IPA) dan disonikasi selama 30 menit pada suhu ruang. Penelitian ini difokuskan pada evaluasi pengaruh suhu sulfonasi dengan komposisi filler tetap sebesar 3% v/v. Variasi suhu sulfonasi, yaitu 65 °C, 75 °C, dan 85 °C.

2.4 Pencetakan Membran



Gambar 1. Cetakan membran ABS dimodifikasi *filler* s-rGO/CeO₂, (a), Cetakan membran ABS tanpa *filler* (b)

Larutan ABS disonikasi dengan *filler* s-rGO/CeO₂ untuk setiap variasi selama 2 jam hingga larutan homogen. Setiap larutan akan dicetak menggunakan cawan petri berukuran 90 × 18 mm, masing-masing berisi 25 ml larutan membran. Pengeringan membran dilakukan 60°C selama 48 jam. Hasil membran yang dilakukan pengeringan ditunjukkan pada gambar 1 (a) untuk membran ABS dimodifikasi *filler* s-rGO/CeO₂ dan gambar 1 (b) untuk membran ABS tanpa *filler*.

2.5 Karakterisasi Membran

2.5.1 Kapasitas Penukar Ion (KPI)

Kapasitas penukar ion (KPI) diukur dengan metode titrasi. Membran terlebih dahulu dibersihkan dengan aquades, kemudian dikeringkan dengan kertas tisu. Setelah itu, membran direndam dalam larutan NaCl 1 M sebanyak 50 ml selama 48 jam agar ion H⁺ dalam membran digantikan oleh ion Na⁺. Larutan hasil rendaman ini kemudian dititrasi menggunakan larutan NaOH 0,01 M dengan fenolftalein sebagai indikator. KPI dihitung berdasarkan hasil titrasi menggunakan rumus yang sesuai.

$$KPI = \frac{V_{NaOH} \times C_{NaOH}}{W_d} \quad (1)$$

V_{NaOH} adalah volume NaOH yang dititrasi (mL), C_{NaOH} adalah molaritas NaOH (M), dan W_d adalah berat membran kering (g).

2.5.2 Permeabilitas Metanol

Permeabilitas metanol diukur menggunakan dua gelas yang saling berhubungan yang terletak di kedua sisi membran. Gelas (A) diisi dengan 100 ml metanol 3M dan gelas (B) diisi dengan aquades. Selama pengukuran, larutan setiap gelas diaduk terus menerus. Dengan menggunakan

refraktometer, konsentrasi metanol dalam gelas B diukur sebagai fungsi waktu. Indeks bias yang diamati kemudian dibandingkan dengan nilai kurva kalibrasi (Ajari et al., 2019). Konsentrasi metanol dalam gelas B sebagai fungsi waktu mengikuti hukum pertama Fick dengan asumsi CB << CA; oleh karena itu CA dapat dianggap konstan.

$$CB_{(t)} = \frac{(A \times DK)}{V \times L} CA_{(t-T_0)} \quad (2)$$

CA dan CB adalah konsentrasi metanol dalam gelas A dan B, A dan L adalah luas penampang membran dan ketebalan membran, DK adalah permeabilitas metanol. D diasumsikan konstan di seluruh permukaan membran dan K tidak dipengaruhi oleh konsentrasi, t merupakan waktu akhir dan t₀ adalah waktu awal.

Ketebalan membran tidak diukur secara kuantitatif dalam penelitian ini. Oleh karena itu, parameter panjang lintasan difusi (L) dianggap mengikuti ketebalan membran hasil pencetakan dan analisis permeabilitas metanol difokuskan pada perbandingan relatif antar variasi suhu sulfonasi.

2.5.3 Fourier Transform InfraRed (FTIR)

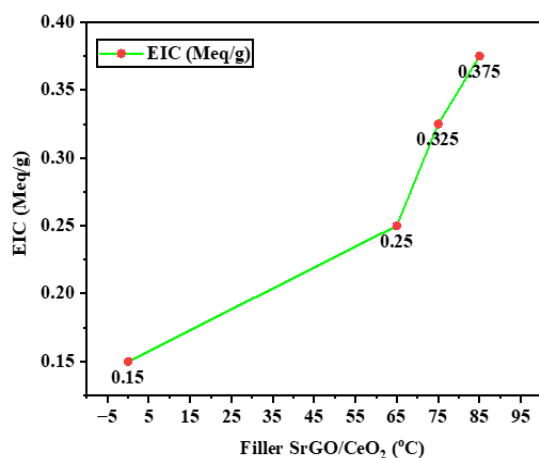
Pengujian *Fourier Transform Infrared* (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi ikatan-ikatan kimia dalam membran polimer. Ikatan-ikatan ini diindikasikan oleh puncak-puncak yang muncul akibat penyerapan spektrum inframerah yang ditembakkan ke sampel membran. Setiap jenis ikatan dalam polimer memiliki daerah penyerapan yang unik. Dengan menganalisis puncak-puncak tersebut dan mencocokkannya dengan referensi, gugus fungsi intramolekul dan interaksi antar molekul dapat diamati. Sampel yang akan diuji dipotong berukuran ukuran 2 × 2 cm dengan variasi membran polimer ABS murni, membran dengan *filler* membran s-rGO/CeO₂ 3% suhu sulfonasi 85 °C. Spektrum diukur pada kisaran bilangan gelombang 400 - 4000 cm⁻¹.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Uji Kapasitas Penukar Ion

Hasil uji Kapasitas Pertukaran Ion (KPI) pada membran berbahan dasar Akrilonitril Butadiena Stirena (ABS) tanpa modifikasi filler dan yang dimodifikasi dengan *filler* sulfonasi grafena oksida tereduksi (s-rGO) dan cerium

oksida (CeO_2) pada variasi suhu sulfonasi 65 °C, 75 °C, dan 85 °C, diperoleh peningkatan kapasitas pertukaran ion seiring dengan kenaikan suhu, dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Hasil uji Kapasitas Pertukaran Ion (KPI) pada membran polimer ABS dengan *filler* s-rGO/CeO₂ dan tanpa *filler* s-rGO/CeO₂.

Nilai KPI sebesar 0,15 meq/g pada membran ABS tanpa modifikasi *filler*, menunjukkan bahwa membran ABS sendiri memiliki kapasitas pertukaran ion yang rendah. Penambahan *filler* s-rGO/CeO₂ yang disulfonasi pada suhu 65 °C meningkatkan nilai KPI membran menjadi 0,25 meq/g, menandakan bahwa adanya *filler* mampu meningkatkan kemampuan pertukaran ion pada membran (Siwal et al., 2019). Peningkatan suhu sulfonasi menjadi 75 °C menghasilkan nilai KPI sebesar 0,325 meq/g, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada suhu 85 °C, yaitu sebesar 0,375 meq/g. Peningkatan ini menunjukkan bahwa membran ABS dengan modifikasi *filler* s-rGO/CeO₂ pada suhu sulfonasi 85 °C memberikan hasil terbaik pada pengujian KPI dibandingkan dengan membran yang dimodifikasi *filler* s-rGO/CeO₂ pada suhu sulfonasi 65 °C.

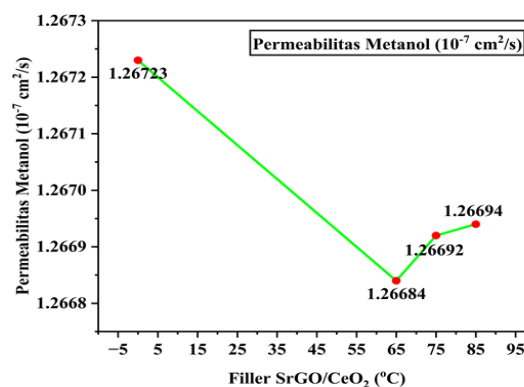
Penelitian (Hidayati et al., 2017) menyatakan bahwa pada suhu yang lebih tinggi jumlah gugus $-\text{SO}_3\text{H}$ meningkat setelah membran di sulfonasi dalam waktu lebih lama. Peningkatan nilai Kapasitas Penukar Ion (KPI) pada membran ABS termodifikasi berkaitan dengan bertambahnya jumlah gugus sulfonat ($-\text{SO}_3\text{H}$) akibat proses sulfonasi dan penambahan *filler* s-rGO/CeO₂. Penelitian sebelumnya juga yang diteliti oleh (Seo et al., 2020), menunjukkan peningkatan konduktivitas proton melalui penambahan gugus sulfonasi grafena oksida pada membran Nafion, di mana gugus

sulfonat bertindak sebagai situs penukar ion tambahan. Selain itu, keberadaan CeO₂ pada penelitian ini juga berperan sebagai *scavenger* radikal yang membantu menjaga stabilitas struktur membran selama proses sulfonasi. Stabilitas struktur ini mendukung peningkatan KPI.

Meskipun demikian, nilai KPI membran ABS termodifikasi s-rGO/CeO₂ pada suhu sulfonasi 85°C yang diperoleh dalam penelitian ini masih lebih rendah dibandingkan dengan nilai KPI terhadap membran Nafion 117 yang dilaporkan memiliki nilai KPI sekitar 0,90 Meq/g ((Mandanipour, 2021) et al.). Penurunan ini diduga disebabkan oleh pembentukan komposit s-rGO dengan CeO₂ yang dapat mengurangi jumlah gugus fungsi penukar ion pada matriks membran. (Ranjani et al., 2019).

3.2 Uji Permeabilitas Metanol

Perubahan nilai permeabilitas metanol pada membran berbahan dasar ABS dengan modifikasi *filler* s-rGO/CeO₂ dan tanpa modifikasi *filler* ditunjukkan pada gambar 2. Berdasarkan grafik, nilai permeabilitas metanol pada membran ABS tanpa modifikasi *filler*, yaitu sekitar $1,26730 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$. Tingkat kebocoran metanol yang rendah dari anoda ke katoda dapat mengurangi risiko penurunan tegangan sirkuit terbuka serta mencegah terjadinya peracunan katalis di sisi katoda (Purnama et al., 2019).



Gambar 2. Uji Permeabilitas Metanol pada membran polimer ABS dengan *filler* s-rGO/CeO₂ dan tanpa *filler* s-rGO/CeO₂.

Nilai permeabilitas metanol menurun secara signifikan pada suhu sulfonasi 65°C menjadi $1,26684 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$. Penurunan ini menunjukkan pembentukan struktur membran yang lebih rapat dan disertai dengan adanya

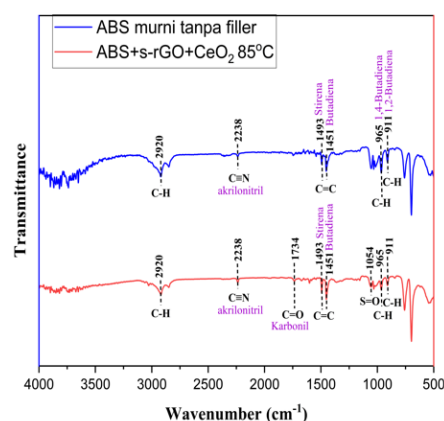
gugus sulfonat ($-\text{SO}_3\text{H}$) dari s-rGO yang mampu menghambat pergerakan metanol (Yin et al., 2021), (Beydaghi et al., 2014). Ketika suhu sulfonasi dinaikan menjadi 75°C , nilai permeabilitas metanol mengalami sedikit peningkatan dibandingkan suhu sulfonasi 65°C yaitu sebesar $1,26692 \times 10^{-7}$. Hal ini berkaitan dengan meningkatnya mobilitas rantai polimer akibat pemanasan yang mulai membuka jalur difusi metanol meskipun gugus sulfonat masih berperan sebagai penghambat perpindahan metanol.

Nilai permeabilitas metanol pada suhu sulfonasi 85°C kembali meningkat mencapai $1,26694 \times 10^{-7}$. Nilai ini masih lebih rendah dibandingkan dengan membran tanpa modifikasi *filler*. Hasil terbaik diperoleh pada suhu sulfonasi 65°C dalam menurunkan permeabilitas metanol, sementara suhu sulfonasi 85°C masih memberikan ketahanannya terhadap degradasi termal meskipun terjadi sedikit peningkatan permeabilitas akibat kenaikan suhu. (Hidayati et al., 2017).

Perbandingan membran ABS yang dimodifikasi *filler* s-rGO/ CeO_2 dengan membran Nafion 115 menunjukkan bahwa membran Nafion 115 masih lebih tinggi sekitar $2,42 \times 10^{-6}$ dalam uji menggunakan larutan metanol 3M (Wang & Wang, 2014). Hasil ini menunjukkan bahwa potensi membran ABS termodifikasi sebagai membran DMFC dengan permeabilitas metanol yang lebih rendah.

3.3 Analisis FTIR

Karakterisasi membran menggunakan FTIR bertujuan mengidentifikasi gugus fungsi berdasarkan vibrasi molekul akibat interaksi dengan sinar inframerah. Spektrum FTIR ditampilkan sebagai kurva transmitansi (%) terhadap bilangan gelombang (cm^{-1}) dalam rentang $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$. Hasil uji FTIR terlihat pada gambar 3 yang mengidentifikasi spektrum biru sebagai membran polimer ABS murni dan spektrum merah sebagai membran yang dimodifikasi dengan *filler* s-rGO/ CeO_2 pada suhu 85°C .



Gambar 3. Hasil Uji FTIR pada membran polimer ABS tanpa *filler* dan membran polimer ABS dengan *filler* s-rGO/ CeO_2 .

Puncak serapan kuat pada 2920 cm^{-1} yang disebut sebagai ikatan vibrasi C H alifatik, sedangkan puncak serapan 3029 cm^{-1} menunjukkan ikatan vibrasi (C-H) yang lemah sebagai ikatan aromatik (Qiu et al., 2017). Adanya ikatan rangkap ($\text{C}\equiv\text{N}$) yang teridentifikasi pada puncak serapan 2238 cm^{-1} yang terkait dengan gugus akrilonitril pada ABS (Amooghin et al., 2010). Hasil indentifikasi menunjukkan adanya gugus ($\text{C}=\text{C}$) yang berkaitan dengan ikatan rangkap blok stirena pada puncak serapan 1493 cm^{-1} dan ikatan rangkap blok butadiena pada puncak serapan 1451 cm^{-1} . Puncak serapan 965 cm^{-1} teridentifikasi sebagai ikatan C-H atom hidrogen yang terikat pada karbon alkena untuk 1,4 butadiena dan puncak serapan 911 cm^{-1} yang terkonfirmasi sebagai 1,2 butadiena (Etemadi et al., 2021).

Sulfonasi umumnya terjadi pada gugus hidroksil ($-\text{OH}$) dan gugus epoksi ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$) di permukaan grafena oksida tereduksi (rGO), tetapi gugus tersebut tidak terdeteksi setelah sulfonasi karena telah terjadi substitusi oleh gugus sulfonat (SO_3H). Derajat sulfonasi dalam penelitiann ini dievaluasi secara kualitatif melalui kemunculan puncak ($\text{S}=\text{O}$) pada puncak serapan 1054 cm^{-1} yang terbentuk dari modifikasi GO tereduksi melalui sulfonasi, meningkatkan sifat polaritas dan hidrofilisitas (Qiu et al., 2017). Puncak serapan pada 1734 cm^{-1} yang berkaitan dengan gugus karbonil ($\text{C}=\text{O}$) terlihat akibat adanya interaksi kimia *filler* s-rGO yang telah dimodifikasi dengan matriks polimer ABS (Zhang et al., 2013). Keberadaan CeO_2 tidak terlihat secara signifikan

pada spektrum FTIR, yang disebabkan rendahnya kandungan CeO_2 dalam matriks komposit membran (Zhao et al., 2017).

Hasil penambahan *filler* s-rGO/ CeO_2 meningkatkan kemampuan membran dalam menyerap air, yang dapat membantu dalam konduktivitas proton. Tidak adanya puncak baru yang signifikan di luar gugus s-rGO dan CeO_2 menunjukkan bahwa polimer ABS tetap stabil dalam strukturnya dan tidak mengalami degradasi kimia akibat penambahan *filler*.

4. Kesimpulan

Variasi suhu sulfonasi berpengaruh terhadap kinerja membran ABS. Peningkatan suhu sulfonasi 85°C menghasilkan nilai Kapasitas Penukar Ion (KPI) tertinggi, yaitu sebesar 0,375 meq/g. Hasil ini menunjukkan peningkatan kemampuan pertukaran ion akibat meningkatnya derajat sulfonasi. Sementara itu, nilai permeabilitas metanol terendah diperoleh pada suhu sulfonasi 65°C sebesar $1,26684 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, menunjukkan kondisi optimum dalam menekan perpindahan metanol.

Meskipun demikian, membran hasil sulfonasi pada suhu 85°C tetap menunjukkan permeabilitas metanol yang stabil secara termal, sehingga memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan kapasitas penukar ion dan ketahanan terhadap permeabilitas metanol. Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan keberhasilan proses sulfonasi melalui kemunculan gugus fungsi sulfonat ($\text{S}=\text{O}$) dan karbonil ($\text{C}=\text{O}$) yang mengindikasikan adanya interaksi antara *filler* dan matriks ABS.

Jika dibandingkan dengan membran komersial Nafion, membran ABS termodifikasi ini memang belum menunjukkan performa yang lebih unggul secara keseluruhan, tetapi telah mengalami peningkatan signifikan dibandingkan dengan membran ABS tanpa modifikasi *filler* s-rGO/ CeO_2 . Berdasarkan hasil tersebut, suhu sulfonasi 85°C ditetapkan sebagai kondisi terbaik dalam penelitian ini untuk formulasi membran ABS termodifikasi *filler* s-rGO/ CeO_2 pada aplikasi *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC).

5. Keterbatasan dan Rekomendasi Penelitian

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan. Analisis kuantitatif terhadap derajat sulfonasi membran belum dilakukan. Selain itu, pengujian KPI dan permeabilitas metanol dilakukan tanpa ulangan statistik dan analisis signifikansi, sehingga hasil yang

diperoleh masih bersifat perbandingan relatif antar variasi suhu sulfonasi. Penelitian ini juga belum mencakup pengujian kinerja sel DMFC secara langsung, seperti pengukuran tegangan rangkaian terbuka (OCV), kurva polarisasi, dan densitas daya. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melibatkan analisis lanjutan seperti X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), ulangan pengujian dengan analisis statistik, serta pengujian performa DMFC nyata guna memperkuat keterkaitan antara sifat membran dan kinerja sel bahan bakar.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajari, H., et al. "Preparation and Characterization of Hydrophobic Flat Sheet Membranes Based on a Recycled Polymer." *International Polymer Processing*, vol. 34, no. 3, 2019, pp. 376–82, doi:10.3139/217.3717.
- Amooghin, Abtin Ebadi, et al. "Modification of Abs Membrane by Peg for Capturing Carbon Dioxide from CO_2/N_2 Streams." *Separation Science and Technology*, vol. 45, no. 10, 2010, pp. 1385–94, doi:10.1080/01496391003705631.
- Arbizzani, C., et al. "Methanol Permeability and Performance of Nafion-Zirconium Phosphate Composite Membranes in Active and Passive Direct Methanol Fuel Cells." *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 23, Elsevier B.V., 2010, pp. 7751–56, doi:10.1016/j.jpowsour.2009.07.034.
- Basso Peressut, Andrea, et al. "Development of Self-Assembling Sulfonated Graphene Oxide Membranes as a Potential Proton Conductor." *Materials Chemistry and Physics*, vol. 257, no. August 2020, Elsevier B.V., 2021, p. 123768, doi:10.1016/j.matchemphys.2020.123768.
- Beydaghi, Hossein, et al. "Synthesis and Characterization of Poly(Vinyl Alcohol)/Sulfonated Graphene Oxide Nanocomposite Membranes for Use in Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs)." *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 53, no. 43, 2014, pp. 16621–32, doi:10.1021/ie502491d.
- Etemadi, Habib, et al. "Preparation of High Performance Polycarbonate/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Blend Ultrafiltration Membrane for Water Treatment." *Desalination and Water Treatment*, vol. 218, 2021, pp. 146–54,

- doi:10.5004/dwt.2021.26945.
- Fan, Lixin, et al. "Recent Development of Hydrogen and Fuel Cell Technologies: A Review." *Energy Reports*, vol. 7, Elsevier Ltd, 2021, pp. 8421–46, doi:10.1016/j.egyr.2021.08.003.
- Hidayati, Nur, et al. "Sintesis Dan Karakteristik Membran Komposit Akrilonitril Butadiena Stirena (ABS)-Kitosan Tersulfonasi Untuk Direct Metanol Fuel Cell (DMFC)." *Jurnal Matematika Dan Sains*, vol. 22, no. 1, 2017, pp. 20–23, doi:10.5614/jms.2017.22.1.6.
- Lord, Megan S., et al. "Redox Active Cerium Oxide Nanoparticles: Current Status and Burning Issues." *Small*, vol. 17, no. 51, 2021, pp. 1–43, doi:10.1002/smll.202102342.
- Mandanipour, Valiollah. "Chemical Modification of Proton Exchanger Sulfonated Polystyrene with Sulfonated Graphene Oxide for Application as a New Polymer Electrolyte Membrane in Direct Methanol Fuel Cell." *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, vol. 40, no. 6, 2021, pp. 1973–84, doi:10.30492/ijcce.2020.43344.
- Purnama, H., et al. "Preparation and Characterisation of Composite Sulfonated Polyether Ether Ketone for Direct Methanol Fuel Cells." *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1295, no. 1, 2019, doi:10.1088/1742-6596/1295/1/012048.
- Qiu, Xiang, et al. "Sulfonated Reduced Graphene Oxide as a Conductive Layer in Sulfonated Poly(Ether Ether Ketone) Nanocomposite Membranes." *Journal of Membrane Science*, vol. 524, no. October 2016, Elsevier, 2017, pp. 663–72, doi:10.1016/j.memsci.2016.11.064.
- Ranjani, M., et al. "Chitosan/Sulfonated Graphene Oxide/Silica Nanocomposite Membranes for Direct Methanol Fuel Cells." *Solid State Ionics*, vol. 338, no. March, Elsevier, 2019, pp. 153–60, doi:10.1016/j.ssi.2019.05.010.
- Raza, Mohsin Ali, et al. "Thermally Reduced Graphene Oxide-Reinforced Acrylonitrile Butadiene Styrene Composites Developed by Combined Solution and Melt Mixing Method." *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, no. 11, Springer Berlin Heidelberg, 2020, pp. 9559–68, doi:10.1007/s13369-020-04845-4.
- Seo, Dong Chan, et al. "Mechanical Properties and Chemical Durability of Nafion/Sulfonated Graphene Oxide/Cerium Oxide Composite Membranes for Fuel-Cell Applications." *Polymers*, vol. 12, no. 6, 2020, doi:10.3390/POLYM12061375.
- Sharma, Prem P., et al. "Improved Oxidative Stability by Embedded Cerium into Graphene Oxide Nanosheets for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Application." *Membranes*, vol. 11, no. 4, 2021, doi:10.3390/membranes11040238.
- Siwal, S. S., et al. "Electrocatalysts for Electrooxidation of Direct Alcohol Fuel Cell: Chemistry and Applications." *Materials Today Chemistry*, vol. 14, Elsevier Ltd, 2019, p. 100182, doi:10.1016/j.mtchem.2019.06.004.
- Wang, Jilin, and Lulu Wang. "Preparation and Properties of Organic-Inorganic Alkaline Hybrid Membranes for Direct Methanol Fuel Cell Application." *Solid State Ionics*, vol. 255, Elsevier B.V., 2014, pp. 96–103, doi:10.1016/j.ssi.2013.12.013.
- Yin, Chongshan, et al. "Effect of the Orientation of Sulfonated Graphene Oxide (SG) on the Gas-Barrier Properties and Proton Conductivity of a SG/Nafion Composite Membrane." *Journal of Membrane Science*, vol. 625, no. January, Elsevier B.V., 2021, p. 119146, doi:10.1016/j.memsci.2021.119146.
- Zhang, Liyuan, et al. "Sulfonated Graphene Oxide: The New and Effective Material for Synthesis of Polystyrene-Based Nanocomposites." *Colloid and Polymer Science*, vol. 291, no. 9, 2013, pp. 2061–68, doi:10.1007/s00396-013-2943-8.
- Zhao, Yan, et al. "Sulfonated Reduced Graphene Oxide Modification Layers to Improve Monovalent Anions Selectivity and Controllable Resistance of Anion Exchange Membrane." *Journal of Membrane Science*, vol. 536, no. April, Elsevier B.V., 2017, pp. 167–75, doi:10.1016/j.memsci.2017.05.002.