

Membran Polieugenol Tersulfonasi (PET) sebagai Potensi Sel Bahan Bakar Metanol Langsung

Eka Cahya Muliawati* dan Yustia Wulandari Mirzayanti

Teknik Kimia, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Surabaya, Indonesia

*ekacahya@itats.ac.id

OPEN ACCESS

Citation: Eka Cahya Muliawati dan Yustia Wulandari Mirzayanti. 2021. Membran Polieugenol Tersulfonasi (PET) sebagai Potensi Sel Bahan Bakar Metanol Langsung. *Journal of Research and Technology* Vol. 7 No. 2 Desember 2021: Page 247–256.

Abstract

Nafion is a type of perfluorosulfonic acid membranes, are widely used in fuel cell technology and exhibit several disadvantages such as expensive, have a limited working temperature range and high methanol crossover. This study aims to produce an electrolyte new polymer membrane from polyeugenol sulfonated (PET) and a review of the membrane properties was carried out on the basis of Water Contact Angle ($^{\circ}$), Water Uptake (%), Methanol Uptake (%), Swelling ratio (%), IEC (ion exchange capacity). Analysis of DMFC membrane performance has an optimal proton conductivity of 0.0009 S.cm^{-1} and methanol permeability of $23.5.10^{-7} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ with a PET composition of 27% (w/w).

Keywords: Polieugenol Sulfonated (PET), Direct Methanol Fuel Cell (DMFC), Proton Conductivity, Methanol Permeability, Proton Exchange Membrane (PEM).

Abstrak

Membran asam perfluorosulfonat seperti Nafion, sebagian besar dipergunakan dalam teknologi sel bahan bakar dan menunjukkan beberapa kelemahan seperti biaya tinggi, kisaran suhu operasi terbatas dan tingginya crossover metanol. Kerugian tersebut menginspirasi kegiatan penelitian untuk mengembangkan bahan PEM baru berdasarkan polimer non-perfluorinated sebagai alternatif Nafion untuk DMFC. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan membran polimer elektrolit dari polieugenol sulfonat (PET) dan tinjauan sifat membran dilakukan atas dasar Sudut Kontak Air ($^{\circ}$), Serapan Air(%), Serapan Metanol (%), Peggembangan (%), KPI (kapasitas penukar ion). Karakterisasi membran yang dihasilkan meliputi analisa morfologi, analisa termal dan kinerja membran. Analisis kinerja membran yang terbentuk memiliki konduktifitas proton optimal sebesar 0.0009 S.cm^{-1} dan permeabilitas metanol sebesar $23,5.10^{-7} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ dengan komposisi PET 27% (b/b).

Kata Kunci: Polieugenol Tersulfonasi (PET), Sel Bahan Bakar Methanol Langsung (DMFC),

1. Pendahuluan

Pencemaran lingkungan dan kerusakan atmosfer yang disebabkan oleh bahan bakar fosil sebagai akibat dari krisis energi menjadi ancaman bagi kelestarian alam. Sumber energi yang ramah lingkungan dan dalam jumlah yang lebih besar dari sebelumnya menjadi kebutuhan dimasa yang akan datang. sekitar 80% dari energi dunia dipenuhi dengan menggunakan cadangan bahan bakar fosil. Konsumsi energi akan meningkat sebesar 71% selama periode tersebut dari tahun 2003 hingga 2030 (Raj, 2020). Sel bahan bakar (*fuel cell*) adalah salah satu energi bersih yang menjanjikan dan layak mendapat perhatian untuk lebih dikembangkan secara luas. Sel bahan bakar atau *fuel cell* adalah seperangkat elektrokimia yang secara langsung dapat mengubah energi kimia dari reaksi redoks menjadi energi listrik (Chen et al., 2017). Sel bahan bakar telah mendapatkan perhatian dalam beberapa dekade terakhir karena spesialisasinya dalam menyediakan energi sumber untuk banyak aplikasi menawarkan prospek masa depan yang lebih ramah lingkungan untuk memajukan sumber daya energi global dengan manfaat lingkungan dan ekonomi (Prapainainar et al., 2018). Ada enam jenis sel bahan bakar yang umum digunakan oleh para peneliti: *alkaline fuel Cell* (AFC), *phosphoric acid fuel cell* (PAFC), *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC), sel bahan bakar oksida padat (SOFC), Sel Bahan Bakar Membran Pertukaran Proton (PEMFC), dan Sel Bahan Bakar Metanol Langsung (DMFC)(Junoh et al., 2020).

DMFC memiliki keunggulan tersendiri karena banyaknya ketersediaan sumber metanol (terutama dalam sistem berkelanjutan dengan ekonomi metanol) dan kepadatan energi yang tinggi untuk metanol, terletak pada penyimpanannya yang aman dan mudah bersama dengan tinggi kerapatan energi, karena kesederhanaan sistem tanpa kerumitan tidak seperti Sel bahan bakar membran pertukaran Hidrogen (Yogarathinam et al., 2021; Shukla dan Bhat 2020). DMFC diklasifikasikan sebagai sel bahan bakar membran pertukaran proton (PEMFC), dimana teknologi polimer elektrolit untuk Sel Bahan Bakar Metanol Langsung membran digunakan (Chatterjee dan Sengupta, 2020). Polimer Membran Elektrolit (PEM) adalah salah satu komponen penting dalam sel bahan bakar dan berkontribusi lebih dari 38% dari keseluruhan biaya. PEM yang memenuhi syarat harus kedap gas atau bahan bakar cair, serta kestabilan elektron secara termal dan dimensi, dan harus memiliki gaya hambat elektro-osmotik rendah dan tinggi konduktivitas proton dalam kondisi yang ekstrem.

Membran asam perfluorosulfonat (PFSA), seperti Nafion yang diproduksi oleh DuPont, adalah elektrolit polimer standar dan patokan bahan elektrolit yang dipilih dalam PEM untuk sel bahan bakar untuk beberapa tahun terakhir (Aburabie et al., 2021; Nicotera et al., 2020). Mereka memiliki kekuatan mekanik yang cukup baik. Namun membran ini memiliki beberapa kekurangan, diantaranya harganya yang mahal, tingginya pergerakan methanol, bekerja pada suhu yang relatif rendah (<100°C) dan cepat terjadi dehidrasi dengan menurunnya konduktivitas proton pada suhu lebih dari 100°C. Sehingga menghadapi tantangan tersebut, perlu dicari alternatif bahan membran elektrolit yang tahan pada suhu operasi diatas 100°C, nilai

konduktivitas proton yang tinggi untuk menghasilkan energi yang besar serta memiliki permeabilitas metanol yang rendah dengan bahan membran yang lebih ramah lingkungan dan harga yang moderat.

Salah satu sumber daya alam yang ketersediannya melimpah adalah minyak cengkeh. Komponen utama dalam minyak cengkeh yang mencapai 70-96% adalah eugenol (Sudarlin dan Haryadi, 2017). Beberapa penelitian terdahulu telah mensintesis polimer turunan eugenol, salah satunya poli(eugenol sulfonat) (PET). PET dimanfaatkan sebagai katalis asam reaksi siklisasi sitronelal dan aditif anionik lipofilik pada Elektroda Selektif Ion (ESI). Namun, polimer yang mengikat gugus asam sulfonat ($-SO_3H$) ini belum banyak yang diaplikasikan sebagai material membran polimer elektrolit untuk sel bahan bakar metanol langsung.

2. Metode Penelitian

2.1 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan untuk analisis yaitu *Scanning Electron Microscope* (SEM) bruker, *Thermo gravimetric analysis* (TGA) Mettler Toledo 851e, *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) Solartron SI 1260, pengujian permeabilitas membran menggunakan *high performance liquid chromatography* (HPLC) Perkin Elmer. Proses sulfonasi menggunakan labu leher tiga, *oil bath*, kondensor, pengaduk (*stirrer*), filter, neraca elektrik, termometer, gelas beaker, gelas ukur. Pembuatan membran menggunakan pengaduk, *ultrasonic*, *doctor blade*, batang pengaduk, plat kaca, oven vakum, erlenmeyer bertutup.

Bahan dasar atau polimer yang dipergunakan adalah *Eugenol* dari *Sigma Aldrich* E51791 (Berat molekul=164,20) variabel yang berubah adalah polieugenol tersulfonasi sementara variabel tetapnya adalah pelarut dari polimer tersebut. Pada proses sulfonasi digunakan asam sulfat dari *Sigma Aldrich* 339741 (Berat molekul=98,08), es batu, aquades.

2.2 Fabrikasi PET dan Pembuatan Membran

Proses Polimerisasi dan Sulfonasi Eugenol menghasilkan Polieugenol Tersulfonasi (PET). H_2SO_4 pekat sebanyak 20 mL dituangkan kedalam labu leher tiga 250 mL selanjutnya $PbSO_4$ 0,32 gram dan dilakukan proses pengadukan hingga larut. Eugenol 3 gram ditambahkan dalam campuran tersebut tetes demi tetes dalam proses pengadukan. Campuran dipanaskan dalam penangas uap pada suhu $90^\circ C$ selama 2 jam. Campuran diaduk selama 8 jam dan kemudian ditambahkan H_2SO_4 2M (100mL) dingin, dengan penyaring buchner hasil dari endapan disaring dan dinetralkan dengan aquades. Padatan PET yang telah didapat kemudian dilakukan pembuatan membran dengan membuat larutan *dope* (Muliawati dkk, 2017). Tahapan membuat larutan *dope* yaitu matriks polimer PET hasil sintesis, kemudian dilarutkan dalam pelarut NMP selama 12 jam pada suhu $80^\circ C$ dengan variabel berubahnya (variasi konsentrasi PET (% b/b)) yaitu 11, 16, 27, dan 30%. Setelah homogen kemudian larutan *dope* tersebut (larutan pembuat membran yang berisi larutan polieugenol tersulfonasi) dibiarkan selama 24 jam untuk menghilangkan gelembung saat pengadukan. Campuran polimer yang sudah jadi kemudian dibentuk menjadi membran lembaran tipis menggunakan metode *direct casting* dan

dikeringkan pada suhu 80°C selama 36 jam untuk menghilangkan sisa-sisa pelarut. Setelah kering dilakukan perendaman dengan H₂SO₄ 10M selama 100 jam (Muliawati dkk, 2019).

2.3 Karakterisasi Membran

Pada penelitian ini, karakteristik membran yang dilakukan berupa analisa struktural menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR), *Scanning Electrone Microscopy* (SEM), analisa sifat termal menggunakan *Thermogravimetric Analysis* (TGA), analisa sifat ionik dengan menghitung konduktivitas ionik menggunakan spektroskopi impedansi, Kapasitas Penukar Ion (KPI), analisa sifat penyerapan terhadap pelarut dengan menghitung *swelling* air (*water uptake*) dan permeabilitas metanol, serta mempelajari mekanisme transport proton yang terjadi pada membran tersebut.

2.4 Sifat-Sifat Membran

2.4.1 Sudut Kontak Air (*Water Contact Angle*)

Kecenderungan material suka air pada struktur membran dapat diketahui melalui analisa menggunakan *Water Contact Angle* (WCA, OCA15 Pro, Data Physics). Sampel membran disiapkan pada kondisi datar dan kering dengan ukuran (5 x 40) mm. Membran diletakkan pada penjepit dengan posisi lurus. Proses uji dilakukan dengan teknik tetes air (*sessile drop*) dan dianalisa derajat yang dihasilkan antara tetesan air dan permukaan membran. Keadaan tetesan air yang meresap kedalam struktur membran menganalogikan kecenderungan sifat hidrofilisitas yang dimiliki oleh membran (Junoh et al., 2020; Muliawati dkk, 2017; Hebbar, Isloor, dan Ismail, 2017).

2.4.2 Serapan Air (*Water Uptake*) dan Serapan Metanol (*Methanol Uptake*)

Serapan air (*Water Uptake*) dan Serapan metanol (*Methanol Uptake*) ditentukan melalui proses pengukuran membran dalam keadaan basah dan kering. Mula-mula membran dilakukan proses pengeringan selama 24 jam pada suhu 50°C selanjutnya ditimbang. Perendaman membran dalam air untuk mengetahui serapan air dan direndam dalam metanol untuk mengetahui serapan metanol pada membran selama 24 jam hingga membran terhidrasi maksimal. Membran kemudian diangkat dari air atau metanol rendamannya dan dibersihkan menggunakan tisu untuk menghilangkan kelebihan tetesan air ataupun metanol pada permukaannya. *Water* dan *methanol uptake* selanjutnya dihitung dengan menggunakan Persamaan 1 (Muliawati dkk, 2017; Junoh et al., 2020; Wang dan Fu, 2020):

$$Uptake (\%) = \frac{W_{Wet} - W_{Dry}}{W_{Wet}} \quad (1)$$

dimana W_{Dry} dan W_{Wet} masing-masing adalah massa membran sebelum dan sesudah perendaman (gram).

2.4.3 Derajat Penggembungan (*Swelling Ratio*)

Derajat penggembungan (*swelling ratio*) ditentukan melalui proses pengukuran panjang membran dalam keadaan basah dan kering. Pada suhu 50°C pengeringan membran dilakukan

selama 24 jam selanjutnya diukur panjangnya. Kemudian dilanjutkan dengan perendaman membran dalam air deionisasi selama 24 jam hingga membran terhidrasi maksimal. Membran kemudian diangkat dari air rendamannya dan dibersihkan menggunakan tisu untuk menghilangkan kelebihan tetesan air pada permukaannya. Derajat pengembangan selanjutnya dihitung dengan menggunakan Persamaan 2 (Muliawati dkk, 2017; Junoh et al., 2020; Junoh et al., 2020; Prapainainar et al., 2018).

$$\text{Swelling Ratio} = \frac{L_{wet} - L_{Dry}}{L_{Dry}} \times 100\% \quad (2)$$

2.4.4 Kapasitas Penukar Ion (KPI)

Kapasitas pertukaran ion (KPI) pada membran dianalisa dengan menggunakan metode titrasi. Membran terlebih dahulu dilakukan proses pengeringan selama 24 jam dengan menggunakan oven pada suhu 50°C dan ditimbang massanya. Selanjutnya membran direndam kedalam 50 mL larutan NaCl 1M agar terjadi pertukaran ion H⁺ dari membran dengan Na⁺. Larutan hasil perendaman tersebut, selanjutnya ditetesi dengan indikator phenolphthalein dan dilakukan titrasi menggunakan NaOH 0,01M hingga dicapai titik ekuivalen. KPI dihitung dengan menggunakan Persamaan 3 (Junoh et al., 2020; Junoh et al., 2020; Yogarathinam et al., 2021; Muliawati dkk, 2017).

$$\text{KPI} = \frac{V M}{W_{Dry}} \quad (3)$$

dimana MNaOH (mol.L⁻¹) dan VNaOH (L) adalah konsentrasi dan volume NaOH yang digunakan untuk titrasi dan *W_{dry}* adalah massa membran kering (gram).

2.5 Penentuan Kinerja Membran

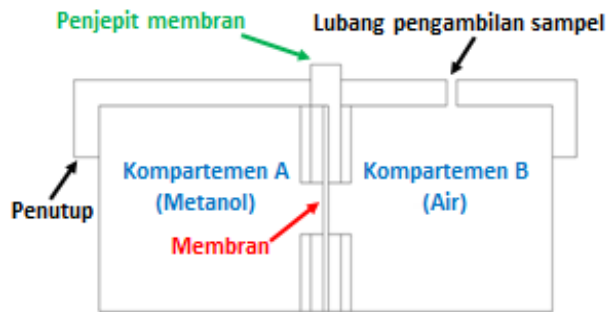
2.3.1 Permeabilitas Metanol

Permeabilitas metanol diukur menggunakan dua kompartemen sel difusi yang diilustrasikan pada Gambar 1 Skema ilustrasi *diffusion cell* serangkaian peralatan uji permeabilitas metanol, dimana larutan metanol 1M dituangkan pada kompartemen A dan air deionisasi dituangkan pada kompartemen B. Selanjutnya, membran yang telah disiapkan dengan keadaan dan permukaan yang datar, diletakkan antara dua kompartemen, A dan B. Sampel yang berada pada kompartemen B diambil dengan pipet setiap 30 menit, selama 3 jam. Kemudian semua larutan sampel yang telah diperoleh dimasukkan dalam wadah tertutup. Berikutnya larutan tersebut dianalisa menggunakan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC). Nilai permeabilitas metanol dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4 (Muliawati dkk, 2017; Junoh et al., 2020; Junoh et al., 2020).

$$P = \left(\frac{\Delta C_B}{\Delta t} \right) \left(\frac{L V_B}{A C_A} \right) \quad (4)$$

P adalah permeabilitas metanol dari membran (cm².det⁻¹), $\frac{\Delta C_B}{\Delta t}$ adalah slope variasi konsentrasi metanol pada kompartemen B dengan fungsi terhadap waktu (mol.L⁻¹.det⁻¹), L

merupakan ketebalan membran (cm), V_B adalah volume air pada kompartemen B (cm³), A adalah luas permukaan membran (cm²), dan C_A adalah konsentrasi metanol pada kompartemen A (mol.L⁻¹).



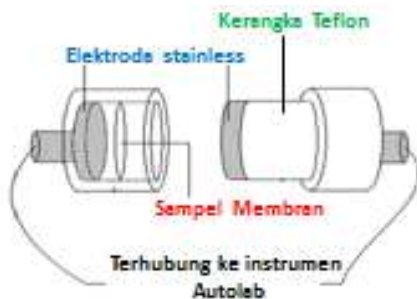
Gambar 1. Skema Ilustrasi *Diffusion Cell* Serangkaian Peralatan Uji Permeabilitas Metanol

2.3.2 Konduktivitas Proton

Konduktivitas proton dari masing-masing variasi membran dianalisa menggunakan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS, instrumen Autolab), seperti pada Gambar 2. Skema ilustrasi analisa konduktivitas proton. Membran disiapkan dengan kondisi terhidrasi yaitu merendam membran dalam H₂SO₄ 10 M selama 24 jam. Kemudian membran dimasukkan dalam *chip* penjepit membran dan dipanaskan pada suhu 80- 90⁰C. Proses analisa dilakukan dengan metode *two probe*, pada rentang frekuensi 1-10⁶ Hz. Konduktivitas proton membran dihitung dengan menggunakan Persamaan 5 (Muliawati dkk, 2017; Junoh et al., 2020; Junoh et al., 2020; Madaswamy et al., 2021)

$$\sigma = \frac{L}{R \times A} \quad (5)$$

σ merupakan konduktivitas proton membran (S.cm⁻¹), L adalah ketebalan membran (cm), R nilai resistansi membran (Ω) dan A adalah luas permukaan membran (cm²)



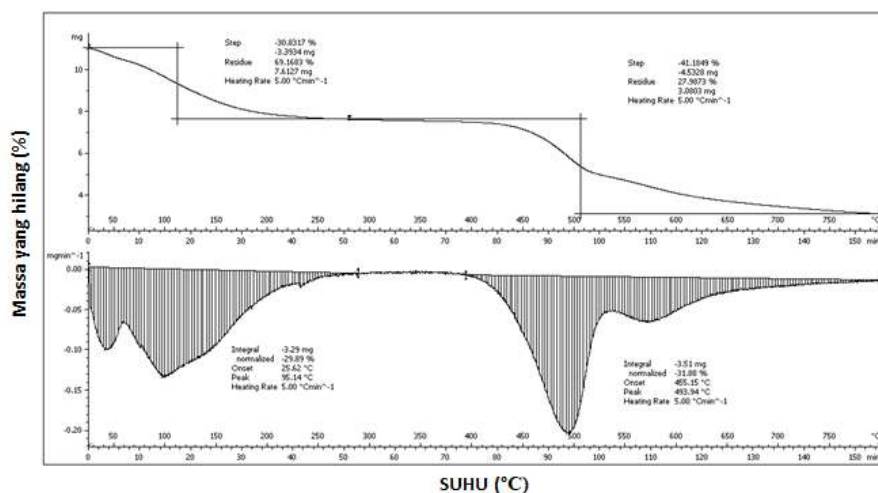
Gambar 2. Skema Ilustrasi Analisa Konduktivitas Proton

3. Hasil dan Pembahasan

Pembuatan PET didasarkan pada metode pembuatan yang dilaporkan oleh Handayani dkk (2004). Pembuatan PET diawali dengan polimerisasi eugenol dengan menggunakan metode Ngadiwiyana (2005). Mula-mula eugenol dimasukkan ke dalam gelas piala, kemudian

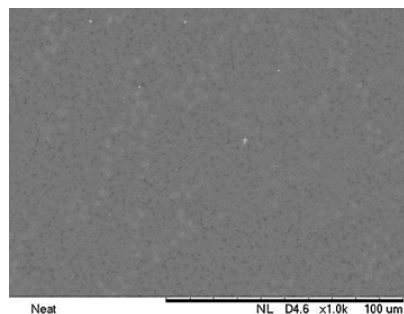
ditambah asam sulfat pekat (98%) tetes demi tetes sampai terbentuk gel. Reaksi bersifat eksotermis dan mengeluarkan bau menyengat. Gel yang telah terbentuk kemudian didinginkan hingga suhu ruang dan berubah menjadi padatan. Residu yang didapatkan dicuci dengan air sampai netral, kemudian dikeringkan dan ditimbang. Bentuk fisik yang berubah dari yang berupa cairan eugenol berwarna kuning pucat menjadi padatan ungu kehitaman menandakan bahwa eugenol telah berhasil dipolimerisasi dan disulfonasi.

Stabilitas termal pada membran dapat dilihat dari hasil analisa *Thermogravimetric analysis* (TGA) seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Hasil analisa menunjukkan bahwa semua data membran menunjukkan tiga tahap penurunan. Tahap penurunan yang pertama terjadi disekitar suhu 100°C karena penguapan molekul air dari polimer. Tahap kedua terjadi pada sekitar interval 200°C karena terjadi penguapan pelarut NMP dan hilangnya gugus sulfonat yang terikat pada polimer (Abbasi et al., 2015). Tahap terakhir terjadi dikisaran sebelum 500°C. Hal ini menunjukkan membran PET mampu beroperasi pada aplikasi dengan suhu tinggi karena suhu degradasi PET sekitar 500°C.



Gambar 3. Analisis Termogram Membran PET

Pada Gambar 4 menunjukkan hasil dari SEM membran polieugenol tersulfonasi. Dari Gambar 4, terlihat struktur morfologi bagian permukaan membran yang halus dan ini menandakan polimer PET tercampur dengan sempurna (homogen) pada saat pembuatan larutan dope.



Gambar 4. SEM Membran Polieugenol Tersulfonasi

Berdasarkan hasil pada Tabel 1 tentang analisa kemampuan membran dan Tabel 2 yang menyajikan tentang permeabilitas metanol dan konduktivitas proton membran, membran PET dengan 27 % (b/b). adalah komposisi terbaik yang menjanjikan sebagai PEM untuk aplikasi DMFC. Serapan air (*water uptake*), serapan metanol (*methanol uptake*), rasio pembengkakan membran (*swelling ratio*), kapasitas penukar ion (KPI), sudut kontak (*water contact angle*), konduktivitas proton dan permeabilitas metanol merupakan karakterisasi utama membran yang perlu dihitung untuk aplikasi DMFC. Serapan air dan serapan metanol adalah parameter untuk membran dalam mendifusikan ion dan metanol. Rasio pembengkakan adalah stabilitas membran dalam larutan berair. Kapasitas pertukaran Ion (KPI) didefinisikan sebagai miliuener tetap kelompok pertukaran per gram polimer, biasanya sesuai dengan jumlah situs untuk transfer proton. Sudut kontak adalah derajat untuk bahan hidrofilik atau hidrofobik. Konduktivitas proton adalah salah satu faktor terpenting untuk membran proton yang digunakan dalam sel bahan bakar. Secara umum, transport proton dalam matriks polimer terhidrasi dijelaskan berdasarkan dua mekanisme utama: "proton hopping" atau "mekanisme Grotthus" menggunakan dan "mekanisme difusi" yang menggunakan air (gugus -OH) sebagai transport proton atau "mekanisme vehicular". Permeabilitas metanol mengukur kemampuan membran untuk mencegah *metanol crossover* atau laju metanol melalui struktur membran. Mereka semua parameter saling terkait untuk kinerja yang baik dalam aplikasi DMFC.

Tabel 1. Analisa Kemampuan Membran

| Data Ke- | Komposisi Membran PET (% b/b) | Water Uptake (%b/b) | Methanol Uptake (%b/b) | Swelling Ratio (%) | KPI (mmol/g) | Contact Angle (°) |
|----------|-------------------------------|---------------------|------------------------|--------------------|--------------|-------------------|
| 1 | 11 | 27 | 33 | 30 | 0.9 | 61 |
| 2 | 16 | 20.5 | 34 | 34 | 1.4 | 60 |
| 3 | 27 | 33.7 | 37 | 35 | 1.78 | 59 |
| 4 | 30 | 34 | 38 | 35.5 | 1.8 | 58 |
| 5 | Nafion 117 | 19 | 40 | 16 | 0.9 | 8 |

Tabel 2. Permeabilitas Metanol dan Konduktivitas Proton

| Data ke- | Komposisi Membran PET (%) | Permeabilitas Metanol ($\times 10^{-7} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) | Konduktivitas Proton ($\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) |
|----------|---------------------------|--|--|
| 1 | 11 | 21.5 | 0.00067 |
| 2 | 16 | 22.5 | 0.00078 |
| 3 | 27 | 24 | 0.0009 |
| 4 | 30 | 24.5 | 0.0009 |
| 5 | Nafion 117 | 25.5 | 0.09 |

Membran dengan kinerja yang baik umumnya mempunyai konduktivitas proton yang tinggi dengan serapan air (*water uptake*) yang tinggi, penyerapan metanol dan permeabilitas metanol yang rendah, kapasitas pertukaran ionik tinggi (KPI), rasio pembengkakan membran rendah dan juga derajat pada sudut kontak turun (membran lebih cenderung bersifat hidrofilik) sehingga mampu beroperasi pada suhu tinggi ($>80^\circ\text{C}$). Serapan air lebih banyak berkontribusi memperbaiki pembentukan sifat hidrofilik pada membran yang mampu memudahkan transport proton meski dalam kondisi humiditas yang rendah. Tingkat penyerapan air pada polimer dapat

ditingkatkan dengan meningkatkan kandungan gugus ionik (-OH dan -SO₃H) dalam rantai polimer, namun serapan air yang terlalu banyak menyebabkan peningkatan pembengkakan membran (*swelling*), yang menyebabkan hilangnya kestabilan mekanik pada membran (rapuh) dan permeabilitas metanol menjadi tinggi. Nilai KPI bergantung pada jumlah gugus asam sulfonat dalam struktur kimia membran polimer dan dapat mempengaruhi penyerapan air dan sifat konduksi proton pada membran polimer. Nilai KPI meningkat saat komposisi polimer bertambah. Oleh karena itu, semua parameter harus dioptimalkan agar sukses dalam operasi sel bahan bakar. Membran polieugenol sulfonat dengan komposisi 27% b/b mempunyai parameter secara keseluruhan yang optimal, karena pada komposisi 30% b/b mempunyai permeabilitas metanol yang meningkat dan kenaikan ini dihindari agar tidak terjadi metanol lewat secara berlebih.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa membran polieugenol sulfonat dengan komposisi 27% b/b menjanjikan untuk diaplikasikan pada membran sel bahan bakar metanol langsung karena memiliki permeabilitas metanol yang rendah dibandingkan membran komersial Nafion, memiliki kestabilan suhu yang cukup tinggi yaitu >100°C. Meski konduktivitas proton cukup rendah, namun kebolehterjadi untuk dimodifikasi dengan polimer yang lain sangat memungkinkan untuk memperbaiki sifat-sifatnya. Dengan adanya gugus (-OH dan -SO₃H) pada membran sangat memungkinkan terjadinya transport proton dalam struktur membran PET.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, H., M. Antunes, dan J. I. Velasco. 2015. "Graphene Nanoplatelets-Reinforced Polyetherimide Foams Prepared by Water Vapor-Induced Phase Separation." *Express Polymer Letters* 9 (5): 412–23.
- Aburabie, Jamaliah, Boor Lalia, dan Raed Hashaikeh. 2021. "Proton Conductive, Low Methanol Crossover Cellulose-Based Membranes." *Membranes* 11 (7).
- Chatterjee, Sudipta, dan Kushal Sengupta. 2020. *Carbon-Based Electrodes for Direct Methanol Fuel Cells. Direct Methanol Fuel Cell Technology. INC.*
- Chen, Xueye, Tiechuan Li, Jienan Shen, dan Zengliang Hu. 2017. "From Structures, Packaging to Application: A System-Level Review for Micro Direct Methanol Fuel Cell." *Renewable dan Sustainable Energy Reviews* 80 (May 2016): 669–78.
- Handayani, Desi Suci, Triana Kusumaningsih, Maria Yuli, Jurusan Kimia, FMIPA Universitas, dan Sebelas Maret. 2004. "Sintesis Kopolimer (Eugenol-DVB) Sulfonat dari Eugenol Komponen Utama Minyak Cengkeh (*Syzygium Aromaticum*) Synthesis of Co-Poly (Eugenol Sulfonate) -DVB from Eugenol as a Major Component of *Syzygium Aromaticum* Oils" 2 (2): 53–57.
- Hebbar, R.S., A.M. Isloor, dan A.F. Ismail. 2017. "Contact Angle Measurements." *Membrane Characterization*, January, 219–55.
- Junoh, H., J. Jaafar, N. A.H.M. Nordin, A. F. Ismail, M. H.D. Othman, M. A. Rahman, N. Yusof, dan F. Aziz. 2020. "Inclusion of Zeolitic Imidazolate Framework-8 (ZIF-8) Crystals within Porous Polyether Sulfone (PET) via Filtration Methods as Potential

- Electrolytes for DMFC Applications.” *Materials Today: Proceedings* 46 (xxxx): 1843–47.
- Junoh, Hazlina, Juhana Jaafar, Nik Abdul Hadi Md. Nordin, Ahmad Fauzi Ismail, Mohd Hafiz Dzarfan Othman, Mukhlis A. Rahman, Farhana Aziz, dan Norhaniza Yusof. 2020. *Synthetic Polymer-Based Membranes for Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) Applications. Synthetic Polymeric Membranes for Advanced Water Treatment, Gas Separation, dan Energy Sustainability*. Elsevier Inc.
- Madaswamy, Suba Lakshmi, Asma A. Alothman, Murefah mana AL-Anazy, Ahmad A. Ifseisi, Khadraa N. Alqahtani, Sendhil Kumar Natarajan, Subramania Angaiah, dan Dhanusuraman Ragupathy. 2021. “Polyaniline-Based Nanocomposites for Direct Methanol Fuel Cells (DMFCs) - A Recent Review.” *Journal of Industrial dan Engineering Chemistry* 97 (May): 79–94.
- Muliawati, Eka Cahya, Mardi Santoso, Ahmad Fauzi Ismail, Juhana Jaafar, Mohd Taufiq Salleh, Silvana Dwi Nurherdiana, dan Nurul Widiastuti. 2017. “Membran Campuran Daripada Poli (Eugenol Sulfonat) dan Polieterimida Sulfonat yang Menjanjikan untuk Sel Bahan Api Metanol Langsung.” *Malaysian Journal of Analytical Sciences* 21 (3): 659–68.
- Muliawati, E. C.; Ismail, A. F.; Jaafar, J.; Widiastuti, N.; Santoso, M.; Salleh, M. T.; Nurherdiana, S.D.; Atmaja, L. (2019). Sulfonated PEI membrane with GPTMS- TiO₂ as a filler for potential direct methanol fuel cell (DMFC) applications. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 15(4), 555-560.
- Ngadiwiyana, Kimia FMIPA, dan Universitas Diponegoro. 2005. “POLIMERISASI EUGENOL DENGAN KATALIS ASAM SULFAT PEKAT.” *Ngadiwiyana: Polimerisasi Eugenol dengan Katalis Asam Sulfat Pekat JSKA VIII* (2).
- Nicotera, Isabella, Cataldo Simari, dan Apostolos Enotiadis. 2020. *Nafion-Based Cation-Exchange Membranes for Direct Methanol Fuel Cells. Direct Methanol Fuel Cell Technology*. INC.
- Prapainainar, Paweena, Sumanut Maliwan, Kannikar Sarakham, Zehui Du, Chaiwat Prapainainar, Stuart M. Holmes, dan Paisan Kongkachuichay. 2018. “Homogeneous Polymer/Filler Composite Membrane by Spraying Method for Enhanced Direct Methanol Fuel Cell Performance.” *International Journal of Hydrogen Energy* 43 (31): 14675–90.
- Raj, V. 2020. “Direct Methanol Fuel Cells in Portable Applications: Materials, Designs, Operating Parameters, dan Practical Steps toward Commercialization.” In *Direct Methanol Fuel Cell Technology*, 495–525. INC.
- Shukla, Avanish, dan Santoshkumar D. Bhat. 2020. *Advanced Carbon Nanocomposite Membrane Electrolytes for Direct Methanol Fuel-Cell Applications. Direct Methanol Fuel Cell Technology*. INC.
- Sudarlin, Sudarlin, dan Winarto Haryadi. 2017. “Polimerisasi Eugenol Minyak Daun Cengkeh Hasil Redistilasi, Ekstraksi, dan Fraksinasi Menggunakan Katalis Asam Sulfat Pekat.” *Jurnal Kimia VALENSI* 3 (1): 50–58.
- Wang, Feifan, dan Bing Fu. 2020. *Anion-Exchange Membranes for Direct Methanol Alkaline Fuel Cells. Direct Methanol Fuel Cell Technology*. INC.
- Yogarathinam, Lukka Thuyavan, Juhana Jaafar, Ahmad Fauzi Ismail, Pei Sean Goh, Arthanareeswaran Gangasalam, Mohamad Fahrul Radzi Hanifah, Kar Chun Wong, Mahesan Naidu Subramaniam, dan Jerome Peter. 2021. “Functionalized Boron Nitride Embedded Sulfonated Poly (Ether Ether Ketone) Proton Exchange Membrane for Direct Methanol Fuel Cell Applications.” *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (5): 105876.