

**UJI KINERJA *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* UNTUK *DIRECT*  
*METHANOL FUEL CELL* DENGAN MEMBRAN NAFION 117  
HASIL REGENERASI**

**SKRIPSI**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh  
Gelar Sarjana Sains Bidang Studi Kimia**



**Oleh :**

**Agnes Theresia Sinaga**

**08031282126031**

**JURUSAN KIMIA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

**2025**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**UJI KINERJA MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA) UNTUK  
DIRECT METHANOL FUEL CELL DENGAN MEMBRAN NAFION 117  
HASIL REGENERASI**

**SKRIPSI**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh  
Gelar Sarjana Sains Bidang Studi Kimia**

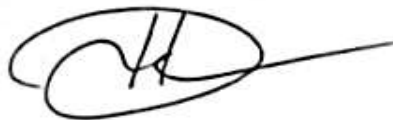
Oleh :

**AGNES THERESIA SINAGA**

**08031282126031**

**Indralaya, 9 Januari 2025**

**Pembimbing**



**Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D**

**NIP. 196704191993031001**

**Mengetahui,**

**Dekan FMIPA**



**Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D**

**NIP. 197111191997021001**

## HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi Agnes Theresia Sinaga (08031282126031) dengan judul "Uji Kinerja *Membrane Electrode Assembly (MEA)* Untuk *Direct Methanol Fuel Cell* Dengan Membran Nafion 117 Hasil Regenerasi" telah dipertahankan dihadapan Tim Penguji Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 8 Januari 2025 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, 9 Januari 2025

Ketua :

1. **Dr. Addy Rachmat, M.Si**

NIP. 197409282000121001

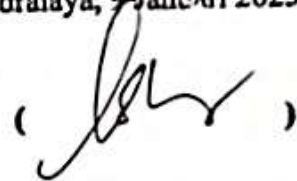
Anggota :

1. **Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D**

NIP. 196704191993031001

2. **Dr. Nurlisa Hidayati, M.Si**

NIP. 197211092000032001

()

()

()

Mengetahui,

Dekan FMIPA



**Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D**

NIP. 197111191997021001

Ketua Jurusan Kimia



**Prof. Dr. Muharni, M.Si**

NIP. 196903041994122001

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Mahasiswa : Agnes Theresia Sinaga

NIM : 08031282126031

Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia

Menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri dan karya ilmiah ini belum pernah diajukan sebagai pemenuhan persyaratan untuk memperoleh gelar kesarjanaan strata (S1) dari Universitas Sriwijaya maupun perguruan tinggi lain. Semua informasi yang dimuat dalam skripsi ini yang berasal dari penulis lain baik yang dipublikasikan atau tidak telah diberikan penghargaan dengan mengutip nama sumber penulis secara benar. Semua isi dari skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya sebagai penulis.

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya,

Indralaya, 9 Januari 2025

Penulis,



Agnes Theresia Sinaga

NIM. 08031282126031



**HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK  
KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademik Universitas Sriwijaya, yang  
bertanda tangan dibawah ini:

Nama Mahasiswa : Agnes Theresia Sinaga

NIM : 08031282126031

Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia

Jenis Karya Ilmiah : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya hak bebas royalti non-eksklusif (*nonexclusively royalty-free right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul “Uji Kinerja *Membrane Electrode Assembly* (MEA) Untuk *Direct Methanol Fuel Cell* Dengan Membran Nafion 117 Hasil Regenerasi”. Dengan hak bebas royalti non-eksklusif ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih, edit/memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tugas akhir atau skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya.

Indralaya, 9 Januari 2025

Yang Menyatakan,



Agnes Theresia Sinaga

NIM. 08031282126031

## **HALAMAN PERSEMBAHAN**

### **Roma 12:12**

Bersukacitalah dalam pengharapan, sabarlah dalam kesesakan, dan bertekunlah dalam doa

----

**Keberhasilan adalah milik mereka yang berani mencoba.**

**Skripsi ini saya persembahkan kepada:**

- 1. Tuhan Yesus Kristus**
- 2. Ibu, Bapak dan Kakak tercinta yang senantiasa mendoakan dan memberikan motivasi serta support dalam bentuk apapun dikala senang maupun sedih**
- 3. Dosen pembimbing (Prof. Drs. Dedi Rohendi, M. T., Ph.D.)**
- 4. Keluarga besar, sahabat dan semua orang yang membantu hingga terselesaikannya skripsi ini**
- 5. Orang-orang yang memotivasiku selama masa perkuliahan**
- 6. Sahabat dan teman-teman yang terlibat dalam membantu dalam perkuliahan**
- 7. Teman-teman seperjuangan dalam Almamaterku yang aku banggakan, Universitas Sriwijaya**
- 8. Diriku sendiri**

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, kita memujinya, memohon ampunan dan meminta pertolongan kepada-Nya dan pada akhirnya penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul: “Uji Kinerja *Membrane Electrode Assembly* (MEA) Untuk *Direct Methanol Fuel Cell* Dengan Membran Nafion I17 Hasil Regenerasi”. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Kimia Universitas Sriwijaya.

Proses penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari berbagai rintangan, mulai dari pengumpulan literatur, penelitian, pengumpulan data dan sampai pada pengolahan data maupun dalam tahap penulisan. Namun dengan kesabaran dan ketekunan yang dilandasi dengan rasa tanggung jawab selaku mahasiswa dan juga bantuan dari berbagai pihak, baik material maupun moril, akhirnya selesai sudah penulisan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak **Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D** yang telah banyak memberikan bimbingan, bantuan, motivasi, saran dan petunjuk kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya.
2. Ibu Prof. Muharni, M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
3. Bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si. selaku Sekretaris Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
4. Bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si. dan Ibu Dr. Nurlisa Hidayati, M.Si. selaku dosen pembahas seminar hasil dan penguji sidang sarjana.
5. Ibu Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing akademik.
6. Bapak Dr. Muhammad Said, M.T selaku dosen yang sangat berjasa memberikan perhatian dan bantuan bagi penulis dan keluarga penulis.
7. Seluruh Dosen Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu, mendidik, dan membimbing selama masa perkuliahan hingga lulus.

8. Bapak, Mamak dan Kakak, terimakasih sudah banyak sekali memberi dukungan dan yang selalu mendoakan setiap menit setiap detik.
9. Kak lin dan mbak Novi selaku admin jurusan kimia yang telah membantu proses administrasi.
10. Kak Dwi, kak Reka dan kak Yollan selaku mentor serta Kak Hawa yang sangat baik hati, terima kasih kepada kakak-kakak atas ilmunya dan bantuannya selama penelitian dilaksanakan.
11. Gataude (Mira, Nursal, Adels, Depiw) loveyu banyak, terimakasih sudah selalu mendukung penulis, membantu saat praktikum dan perkuliahan, semangat terus bis akita bisa jadi ibuibu karir.
12. Rizky Azahra, kiky kya iloveyousomat sudah menjadi teman day one ku, semangat terus.
13. Kambekegen, walau jarang kambek karena sibuk masing-masing, semangat kan kita mau buat usaha coffeshop bareng hehe.
14. Tim PUR Fuel Cell & Hidrogen 2021 (Ciaak, Nabiguy, DianaDeorise, Mbak Yanti, Vina, Raihan, Dera), terima kasih atas dukungan dan bantuannya selama penelitian.
15. Keluarga besar FMIPA Kimia, terimakasih atas kebersamaan dan suka-duka selama perkuliahan.
16. Seluruh pihak yang terlibat dalam penelitian maupun penulisan yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih dukungan dan bantuannya selama penelitian.

Penulis menyadari masih banyak terdapat kekurangan dalam karya tulis ini serta jauh dari kata sempurna. Semoga karya tulis ini dapat bermanfaat dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Indralaya, 9 Januari 2025

Penulis



Agnes Theresia Sinaga

NIM. 08031282126031



**SUMMARY**  
**PERFORMANCE TEST OF MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY FOR DIRECT**  
**METHANOL FUEL CELL WITH NAFION 117 MEMBRANE REGENERATION**  
**RESULT**

Agnes Theresia Sinaga: Supervised by Prof. Drs. Dedi Rohendi, M. T., Ph. D.

Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Sriwijaya University  
ix + 64 Pages, 5 Tables, 10 Pictures, 12 Appendices

The high price of Nafion-117 membrane is an obstacle to the commercialization of the membrane. Therefore, regeneration of Nafion-117 membrane that has been used is one alternative to overcome this problem. In this study, the Nafion-117 membrane regeneration process was carried out by soaking the membrane using 2-propanol and then continuing the membrane activation using 3% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution with varying concentrations, namely 0.5; 1.0; 1.5; 2.0 and 2.5 M. The membrane was characterized using the Ion Exchange Capacity (IEC) Characterization method to replace H<sup>+</sup> ions in the membrane and Water Uptake (WU) to determine the membrane's ability to absorb water and Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy analysis to see the functional groups of the membrane. The results of the IEC and WU characterization showed that the best membrane was found in the regenerated membrane with a H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentration of 2.5 M. The FTIR results showed that the regenerated membrane still contained sulfonate groups which are characteristic of the Nafion-117 membrane. Membrane Electrode Assembly (MEA) was made by combining anode with Pt-Ru/C catalyst and Pt/C as cathode on both sides of Nafion-117 membrane from regeneration and activation with 2.5 M sulfuric acid solution. MEA was then tested in Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) equipment with methanol concentration as fuel of 20% v/v. The results of MEA performance test with new Nafion-117 membrane and regenerated result obtained Open Circuit Voltage (OCV) value with value of 0.612 and 0.462 V respectively. I-V and I-P curves showed that both new MEA and regenerated result produced power density of 0.94 and 0.83 mW/cm<sup>2</sup> respectively at current density of 4.37 mA/cm<sup>2</sup> and both were relatively able to maintain voltage on additional electric current.

**Keywords** : Nafion-117, DMFC, Regeneration, Pt-Ru/C, Pt/C

**Citation** : 92 (2015-2024)

**RINGKASAN**  
**UJI KINERJA MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY UNTUK DIRECT**  
**METHANOL FUEL CELL DENGAN MEMBRAN NAFION 117**  
**HASIL REGENERASI**

Agnes Theresia Sinaga: Dibimbing oleh Prof. Drs. Dedi Rohendi, M. T., Ph. D  
Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya ix +  
64 halaman, 5 Tabel, 11 Gambar, 12 Lampiran

Harga membran Nafion-117 yang mahal menjadi kendala dalam komersialisasi membran. Oleh karena itu, regenerasi membran Nafion-117 yang telah digunakan menjadi salah satu alternatif untuk menanggulangi permasalahan tersebut. Pada penelitian ini, dilakukan proses regenerasi membran Nafion-117 dengan merendam membran menggunakan 2-propanol lalu dilanjutkan pengaktifan membran menggunakan larutan  $\text{H}_2\text{O}_2$  3% dan larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  dengan konsentrasi bervariasi, yaitu 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 dan 2,5 M. Membran dikarakterisasi menggunakan metode karakterisasi Kapasitas Pertukaran Ion (KPI) untuk menggantikan ion  $\text{H}^+$  dalam membran dan Serapan Air (WU) untuk mengetahui kemampuan membran dalam menyerap air serta analisis *Fourier Transform Infrared* (FTIR) Spektrofotometer untuk melihat gugus fungsi dari membran. Hasil karakterisasi KPI dan WU menunjukkan membran terbaik terdapat pada membran hasil regenerasi dengan konsentrasi  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2,5 M. Hasil FTIR menunjukkan pada membran hasil regenerasi masih terdapat gugus sulfonat yang menjadi ciri khas dari membran Nafion-117. *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dibuat dengan menggabungkan anoda dengan katalis Pt-Ru/C dan Pt/C sebagai katoda di kedua sisi membran Nafion-117 hasil regenerasi dan aktivasi dengan larutan asam sulfat 2,5 M. MEA kemudian diuji dalam peralatan *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) dengan konsentrasi metanol sebagai bahan bakar sebesar 20% v/v. Hasil uji kinerja MEA dengan membran Nafion-117 baru dan hasil regenerasi diperoleh nilai *Open Circuit Voltage* (OCV) dengan nilai berturut-turut sebesar 0,612 dan 0,462 V. Kurva I-V dan I-P menunjukkan bahwa kedua MEA baru dan hasil regenerasi menghasilkan densitas daya berturut-turut sebesar 0,94 dan 0,83  $\text{mW}/\text{cm}^2$  pada densitas arus 4,37  $\text{mA}/\text{cm}^2$  serta keduanya relatif dapat mempertahankan tegangan pada penambahan arus listrik.

**Kata Kunci** : Nafion-117, DMFC, Regenerasi, Pt-Ru/C, Pt/C

Sitasi : 92 (2015-2024)

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN .....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>vii</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>ix</b>
<b>RINGKASAN.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1 Fuel Cell .....	5
2.2 Prinsip Kerja Fuel Cell .....	6
2.3 Mekanisme Kerja DMFC .....	6
2.4 Komponen Penyusun DMFC.....	7
2.4.1 Membrane Electrode Assembly.....	7
2.4.2 Pelat Bipolar .....	10
2.4.3 Gas Diffusion Layer (GDL) .....	10
2.4.4 Gasket .....	11
2.4.5 Current Collector .....	11
2.4.6 End Plate.....	12
2.5 Katalis Pt-Ru/C dan Pt/C.....	13

2.6 Karakterisasi Membran.....	13
2.6.1 <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR) Spektrofotometer .....	13
2.6.2 Kapasitas Pertukaran Ion .....	14
2.6.3 Serapan Air .....	7
2.7 Kurva Polarisasi Pada Uji Kinerja <i>Fuel Cell</i> .....	13
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>17</b>
3.1 Waktu dan Tempat.....	17
3.2 Alat dan Bahan .....	17
3.2.1 Alat .....	17
3.2.2 Bahan .....	17
3.3 Prosedur Penelitian .....	17
3.3.1 Regenerasi Membran Nafion 117 Bekas .....	17
3.3.2 Aktivasi Membran Nafion 117 Baru .....	18
3.3.3 Pembuatan GDL .....	18
3.3.4 Pembuatan Elektroda dengan katalis Pt-Ru/C dan Pt/C Menggunakan Metode <i>Spraying</i> .....	19
3.3.5 Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA).....	20
3.3.6 Karakterisasi Membran.....	21
3.3.7 Pengujian MEA .....	21
3.3.8 Analisis Data .....	22
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>24</b>
4.1 Karakterisasi Kapasitas Pertukaran Ion .....	24
4.2 Karakterisasi Serapan Air .....	26
4.3 Karakterisasi <i>Fourier Transform Infrared</i> Spektrofotometer.....	28
4.4 Pengujian Kinerja MEA Terhadap DMFC .....	30
4.4.1 Pengukuran Nilai OCV.....	30
4.4.2 Analisis <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA) Berdasarkan Pengujian I-V dan I-P <i>Performance</i> .....	31
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>35</b>
5.1 Kesimpulan .....	35
5.2 Saran .....	35
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>36</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>43</b>



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.</b>	Prinsip Kerja fuel cell (Sazali et al., 2020).....	6
<b>Gambar 2.</b>	Prinsip Kerja dari DMFC (Ahmed et al., 2022) .....	7
<b>Gambar 3.</b>	Hasil Elektroda Mengelupas dari Membran .....	25
<b>Gambar 4.</b>	Grafik Kapasitas Pertukaran Ion (KPI) .....	25
<b>Gambar 5.</b>	Grafik Serapan Air (WU) .....	27
<b>Gambar 6.</b>	Spektra FTIR Konsentrasi 0,5 M.....	28
<b>Gambar 7.</b>	Spketra FTIR Konsentrasi 1,5 M.....	28
<b>Gambar 8.</b>	Spektra FTIR Konsentrasi 2,5 M.....	28
<b>Gambar 9.</b>	Grafik Nilai OCV Masing-masing MEA.....	30
<b>Gambar 10.</b>	Kurva Polarisasi I-V Masing-masing MEA.....	31
<b>Gambar 11.</b>	Kurva Polarisasi I-P Masing-masing MEA .....	32

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1.</b> Komposisi Bahan Pembuatan GDL .....	19
<b>Tabel 2.</b> Komposisi Bahan Pembuatan Elektroda dengan katalis Pt-Ru/C .....	20
<b>Tabel 3.</b> Komposisi Bahan Pembuatan Elektroda dengan katalis Pt /C .....	20
<b>Tabel 4.</b> Data Analisis .....	23
<b>Tabel 5.</b> Hasil FTIR gugus sulfonat dengan nilai transmitan terendah .....	30

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1.</b>	Regenerasi Membran Nafion 117 Bekas .....	44
<b>Lampiran 2.</b>	Aktivasi Membran Nafion 117 .....	45
<b>Lampiran 3.</b>	Pembuatan Gas Diffusion Layer (GDL) .....	46
<b>Lampiran 4.</b>	Pembuatan Elektroda Katalis Pt-Ru/C .....	47
<b>Lampiran 5.</b>	Pembuatan Elektroda Katalis Pt/C .....	49
<b>Lampiran 6.</b>	Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA) .....	51
<b>Lampiran 7.</b>	Perhitungan Pembuatan GDL .....	52
<b>Lampiran 8.</b>	Perhitungan Komponen Elektroda .....	53
<b>Lampiran 9.</b>	Data Hasil Karakterisasi Kapasitas Pertukaran Ion .....	55
<b>Lampiran 10.</b>	Data Hasil Karakterisasi Serapan Air .....	56
<b>Lampiran 11.</b>	Data Hasil Uji Kinerja MEA Menggunakan Membran Baru dan Membran Regenerasi .....	57
<b>Lampiran 12.</b>	Gambar Alat dan Bahan Penelitian .....	59

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Bahan bakar fosil masih menjadi bahan bakar utama yang digunakan masyarakat sebagai penunjang dalam kehidupan sehari-hari (Nugraha *et al.*, 2023). Hal tersebut yang membuat masyarakat masih sangat bergantung pada konsumsi energi fosil, sedangkan penggunaan energi fosil dapat meningkatkan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dimana dapat menimbulkan dampak buruk terhadap lingkungan seperti pemanasan global (A'nnisa *et al.*, 2020 ; Martins *et al.*, 2019). Oleh karena itu, masyarakat membutuhkan suatu sumber energi alternatif yang dapat menanggulangi hal tersebut. Adapun salah satu teknologi alternatif yang dapat menggantikan bahan bakar fosil berupa penggunaan *fuel cell* (Erwin *et al.*, 2022).

*Fuel Cell* dikenal sebagai suatu alat elektrokimia efisien yang secara langsung mengubah energi kimia menjadi energi listrik (Sayed *et al.*, 2019). *Fuel cell* dapat digunakan sebagai energi baru terbarukan (EBT) untuk aplikasi penyimpanan energi. Selain itu, *fuel cell* juga suatu energi yang ramah lingkungan (Abdelkareem *et al.*, 2021). *Fuel cell* terbagi menjadi beberapa jenis seperti *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells* (PEMFCs), *Solid Oxide Fuel Cells* (SOFCs), *Alkaline Fuel Cells* (AFCs), *Direct Methanol Fuel Cells* (DMFCs), and *Phosphoric Acid Fuel Cells* (PAFCs) (Ramasamy *et al.*, 2024).

Salah satu jenis *fuel cell* yaitu DMFC yang menggunakan metanol sebagai bahan bakar (Hakim, 2018). DMFC memiliki keunggulan antara lain lebih sederhana karena dapat digunakan dalam suhu yang rendah dan memiliki kadar energi teoritis yang tinggi (Junoh *et al.*, 2020). Secara umum, katalis yang sering digunakan dalam DMFC berupa katalis Platinum (Pt) karena memiliki aktivitas katalitik yang baik, pertukaran arus tinggi, dan fungsi kinerja yang sangat baik (Ramli *et al.*, 2019). Namun selama reaksi elektro-oksidasi metanol (MOR) yang berlangsung menggunakan katalis Pt, karbon monoksida (CO) yang bertindak sebagai molekul intermediet memblokir situs Pt sehingga menyebabkan permukaan Pt diracuni oleh CO. Oleh karena itu, untuk mengatasi hal tersebut dilakukan



perpaduan logam biner berupa Ru dan katalis Pt pada elektroda anoda DMFC yakni Pt-Ru (Yu *et al.*, 2018). Dalam DMFC, Pt-Ru/C bertindak sebagai katalis anoda sedangkan yang bertindak sebagai katoda berupa katalis Pt/C (Qin *et al.*, 2022). Pt/C digunakan sebagai elektrokatalis pada DMFC karena memiliki efisiensi yang tinggi. Elektrokatalis atau biasa dikenal sebagai dua elektroda yang berlapisan katalis dan membran sebagai tempat pertukaran ion dimana keduanya berupa komponen MEA dalam DMFC (Vietanti *et al.*, 2019).

Komponen dalam DMFC antara lain MEA yang terdiri dari membran elektrolit polimer dan elektroda berupa anoda dan katoda (Kang *et al.*, 2018). Kedua komponen tersebut dapat mempengaruhi kinerja DMFC dimana anoda dan katoda termasuk bagian penting dalam reaksi elektrokimia yang digunakan untuk menghasilkan listrik dalam DMFC. (Madaswamy *et al.*, 2021). Selain itu, membran elektrolit juga termasuk komponen penting dalam DMFC karena dikenal sebagai jantung dari DMFC dan menjadi media penghantar proton. Membran elektrolit dapat digunakan untuk membatasi anoda dan katoda (Hakim, 2018). Membran yang banyak digunakan dalam DMFC berupa Nafion (Ng *et al.*, 2022).

Membran Nafion memiliki kinerja yang unggul sehingga membran ini dianggap sebagai membran pertukaran proton yang paling menjanjikan (Zhu *et al.*, 2022). Nafion berupa polimer ionik yang terdiri dari struktur utama polifluorokarbon serta gugus asam sulfonat liontin dengan konsentrasi tinggi. Membran Nafion terdiri dari beberapa jenis diantaranya Nafion 112, 115, 117, 1110 (Ahmad *et al.*, 2022). Salah satu jenis membran Nafion yakni membran Nafion 117 yang dikenal memiliki ketahanan permeabilitas metanol yang tinggi sehingga sering digunakan dalam *fuel cell* (Asghar and Xu, 2024). Namun, harga membran Nafion yang mahal menjadi salah satu kendala dalam komersialisasinya (Cindy Imannurya *et al.*, 2020). Oleh karena itu, penggunaan membran Nafion hasil regenerasi menjadi alternatif menarik yang dapat dilakukan untuk mengatasi kendala tersebut (Alipour *et al.*, 2018).

Proses regenerasi dikenal sebagai proses memulihkan atau memperbarui kembali sesuatu untuk mendapatkan hasil yang lebih baik (Morseletto, 2020).

Alipour Moghaddam *et al.*, (2018) telah melakukan penelitian terhadap membran Nafion hasil regenerasi menunjukkan bahwa kinerja sel bahan bakar dari membran Nafion regenerasi mendekati kinerja membran Nafion komersial. Membran Nafion umumnya diaktifkan menggunakan asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) dengan konsentrasi di bawah 1 M. Pujiastuti & Onggo (2016) melakukan penelitian tentang pengaruh variasi konsentrasi asam sulfat untuk aktivasi membran Nafion dan menunjukkan bahwa variasi konsentrasi asam sulfat berpengaruh terhadap kemampuan membran dalam transfer proton dari anoda ke katoda sehingga menghasilkan membran yang memiliki kinerja lebih baik. Membran Nafion 117 hasil regenerasi memiliki sifat ikatan yang sangat baik sehingga dapat digunakan sebagai membran penukar proton. Membran Nafion 117 hasil regenerasi juga dapat mengurangi permasalahan lingkungan (Alipour Moghaddam *et al.*, 2018). Penggunaan membran hasil regenerasi lebih ekonomis karena memanfaatkan kembali membran yang sudah tidak terpakai. Hal tersebut juga dapat mengurangi limbah membran sehingga dapat mengurangi tingkat penggantian membran serta memperpanjang umur membran (Yusuf *et al.*, 2020).

Berdasarkan uraian di atas, Membran Nafion 117 bekas yang sudah tidak digunakan dapat dipertimbangkan untuk penelitian lebih lanjut. Pada penelitian ini, dilakukan proses regenerasi terhadap Membran Nafion 117 bekas, aktivasi Membran Nafion 117 baru, pembuatan *Gas Diffusion Layer* (GDL), pembuatan elektroda, dan pembuatan *Membrane Electrode Assembly* (MEA). Penelitian ini juga melakukan pengujian kinerja MEA pada DMFC dengan pengaruh konsentrasi asam sulfat bervariasi menggunakan katalis Pt-Ru/C di sisi anoda dan Pt/C di sisi katoda dengan Membran Nafion 117 bekas hasil regenerasi dan Membran Nafion 117 baru yang diaktifasi pada variasi konsentrasi asam sulfat.

## 1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik Membran Nafion 117 hasil regenerasi dan baru yang diaktifasi dengan variasi konsentrasi  $H_2SO_4$ ?
2. Bagaimana kinerja *Membrane Electrode Assembly* (MEA) pada DMFC dengan Membran Nafion 117 hasil regenerasi dan baru?

### 1.3. Tujuan

1. Menentukan karakteristik Membran Nafion 117 hasil regenerasi dan baru yang diaktivasi dengan variasi konsentrasi  $H_2SO_4$ .
2. Menguji kinerja *Membrane Electrode Assembly* (MEA) pada DMFC dengan Membran Nafion 117 hasil regenerasi dan baru.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah dapat mengurangi pemakaian membran Nafion 117 baru sehingga membantu menurunkan operasional *Direct Methanol Fuel Cell* dan mengetahui uji kinerja *Membrane Electrode Assembly* (MEA) pada DMFC dengan Membran Nafion 117 hasil regenerasi.

### DAFTAR PUSTAKA

- A'nnisa, L., Sasana, H., & Septiani, Y. (2020). Analysis of Fossil Energy Consumption, CO<sub>2</sub> Emission, Renewable Energy Consumption and Economic Growth on Indonesian Health Expenditure for The Period 2000-2017. *Dinamic : Directory Journal of Economic*, 2(2), 431–445.
- Abdelkareem, M. A., Elsaid, K., Wilberforce, T., Kamil, M., Sayed, E. T., & Olabi, A. (2021). Environmental aspects of fuel cells: A review. *Science of the Total Environment*, 752, 141803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141803>
- Abriyani, E., Syalomita, D., Apriani, I. P., Puspawati, I., & Adiputra, S. (2024). Pengaruh Pengolahan Termal Terhadap Struktur Molekul Material Polimer Studi Dengan Spektroskopi FTIR. *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 4(1), 3424–3432.
- Adiyar, S. R., Satriyatama, A., Azjuba, A. N., & Sari, N. K. A. K. (2021). An overview of synthetic polymer-based membrane modified with chitosan for direct methanol fuel cell application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1143(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1143/1/012002>
- Ahmad, S., Nawaz, T., Ali, A., Orhan, M. F., Samreen, A., & Kannan, A. M. (2022). An overview of proton exchange membranes for fuel cells: Materials and manufacturing. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(44), 19086–19131. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.099>
- Ahmed, A. A., Al Labadidi, M., Hamada, A. T., & Orhan, M. F. (2022). Design and Utilization of a Direct Methanol Fuel Cell. *Membranes*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/membranes12121266>
- Alauhdin, M., Tirza Eden, W., & Alighiri, D. (2021). Aplikasi Spektroskopi Inframerah untuk Analisis Tanaman dan Obat Herbal. *Inovasi Sains Dan Kesehatan*, 84–118. <https://doi.org/10.15294/.v0i0.15>
- Alias, M. S., Kamarudin, S. K., Zainoodin, A. M., & Masdar, M. S. (2020). Active direct methanol fuel cell: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38), 19620–19641. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.202>
- Alipour Moghaddam, J., Parnian, M. J., & Rowshanzamir, S. (2018). Preparation, characterization, and electrochemical properties investigation of recycled proton exchange membrane for fuel cell applications. *Energy*, 161, 699–709. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.123>
- Alqaheem, Y., & Alomair, A. A. (2020). Microscopy and spectroscopy techniques for characterization of polymeric membranes. In *Membranes* (Vol. 10, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/MEMBRANES10020033>
- Ambarwati, S. A., Hidayati, N. A., & Hutapea, H. P. (2024). Sintesis Membran Kitosan/Poli Vinil Alkohol (Pva) Untuk Menurunkan Kadar Limbah Pewarna Tekstil. *Dalton : Jurnal Pendidikan Kimia Dan Ilmu Kimia*, 7(1), 75.



<https://doi.org/10.31602/dl.v7i1.14360>

- 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). <https://doi.org/10.1007/s10965-024-03964-y>
- Avcu, A., Choupani, N., & Tuccar, G. (2021). A Numerical Investigation of The Fracture Energy of Materials for Fuel Cell End Plates. *European Mechanical Science*, 5(2), 56–63. <https://doi.org/10.26701/ems.792302>
- Aziz, A., Wahyuningrum, D., & Arcana, I. M. (2021). Kestabilan Termal dan Ketahanan Oksidatif Membran Poli(arilen eter keton) Tersulfonasi dengan Gugus Samping Karboksilat. *Seminar Nasional Kimia*, 1–12.
- Berghuis, N. T., Zulfikar, M. A., & Wahyuningrum, D. (2020). Synthesis of Chitosan Based Composite Membrane Using Sol-Gel Method As Fuel Cell Membrane At High Temperature. *Al-Kimiya*, 7(1), 35–46.
- Bessarabov, D., Wang, H., Li, H., and Zhao, N. (2015). *PEM Electrolysis for Hydrogen Production*. CRC Press.
- Braz, B. A., Moreira, C. S., Oliveira, V. B., & Pinto, A. M. F. R. (2019). Effect of the current collector design on the performance of a passive direct methanol fuel cell. *Electrochimica Acta*, 300, 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.01.131>
- Braz, B. A., Oliveira, V. B., & Pinto, A. M. F. R. (2020). Optimization of a passive direct methanol fuel cell with different current collector materials. *Energy*, 208, 118394. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118394>
- Chen, M., Zhao, C., Sun, F., Fan, J., Li, H., & Wang, H. (2020). Research progress of catalyst layer and interlayer interface structures in membrane electrode assembly (MEA) for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system. *ETransportation*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100075>
- Cindy Imannurya, P., Nur Hidayati, dan, Yani Tromol Pos, J. A., & Kartasura Surakarta, P. (2020). Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Pengaruh Penambahan Silika Carbon Nanotube dalam Membran sPEEK PVA terhadap Karakteristik Membran pada Sel Bahan Bakar Metanol. *Jurusan Teknik Kimia*, 2015, 14–15.
- Erwin, Fernanda, R., Dharma, M. P., Faiq, N. R., & Rafi, I. K. (2022). Kajian Penerapan Sistem Fuel Cell Sebagai Sumber Energi Alternatif Ramah Lingkungan Pada Kendaraan Bermotor. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, 10(2), 104–116. <http://10.0.93.79/jptm.v10i2.45831>
- Fadlelmoula, A., Pinho, D., Carvalho, V. H., Catarino, S. O., & Minas, G. (2022). Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy to Analyse Human Blood over the Last 20 Years: A Review towards Lab-on-a-Chip Devices. *Micromachines*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/mi13020187>

- Fan, L., Tu, Z., & Chan, S. H. (2021). Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. *Energy Reports*, 7, 8421–8446. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.003>
- Frühwirt, P., Kregar, A., Törring, J. T., Katrašnik, T., & Gescheidt, G. (2020). Holistic approach to chemical degradation of Nafion membranes in fuel cells: Modelling and predictions. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22(10), 5647–5666. <https://doi.org/10.1039/c9cp04986j>
- Ghotkar, R., & Milcarek, R. J. (2022). Modeling of the Kinetic Factors in Flame-Assisted Fuel Cells. *Sustainability (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/su14074121>
- Giordano, E., Berretti, E., Capozzoli, L., Lavacchi, A., Muhyuddin, M., Santoro, C., Gatto, I., Zaffora, A., & Santamaria, M. (2023). Boosting DMFC power output by adding sulfuric acid as a supporting electrolyte: Effect on cell performance equipped with platinum and platinum group metal-free cathodes. *Journal of Power Sources*, 563(October 2022), 232806. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232806>
- Goh, J. T. E., Rahim, A. R. A., Masdar, M. S., & Shyuan, L. K. (2021). Enhanced performance of polymer electrolyte membranes via modification with ionic liquids for fuel cell applications. *Membranes*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/membranes11060395>
- Haaren, Céline, V., De Bock, M., & Kazarian, S. G. (2023). Advances in ATR-FTIR Spectroscopic Imaging for the Analysis of Tablet Dissolution and Drug Release. *Molecules*, 28(12). <https://doi.org/10.3390/molecules28124705>
- Hakim, A. R. (2018). Pengaruh Kadar Clay dalam Sulfonasi Polieter-Eter Ketone (sPEEK) terhadap Permeabilitas Methanol melalui Membran Direct Methanol Fuel Cell Effect of Clay Content in Sulfonated Poly-Ether – Ether Ketone (sPEEK) on Methanol Permeability via Direct Metha. *Eksergi, Vol 15, No. 1. 2018*, 15(1), 9–15.
- Hakim, M. F., & Kusworo, T. D. (2018). Pengaruh Metode Sulfonasi dan Penambahan Pengisi pada Membran Direct Metanol Fuel Cell. *JRST (Jurnal Riset Sains Dan Teknologi)*, 2(2), 71. <https://doi.org/10.30595/jrst.v2i2.3402>
- Hasanah, L.M., Yudha, C.S., Muzayanha, S.U., I. (2019). Desain Sistem Fuel Cell Untuk Pembangkit Listrik Daerah Terpencil. *SNTK Ecosmart*, 1(1), 42–47.
- He, P., Sun, C., & Wang, Y. (2021). Material distortion in laser-based additive manufacturing of fuel cell component: Three-dimensional numerical analysis. *Additive Manufacturing*, 46(March), 102188. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102188>
- Jayakumar, A., Madheswaran, D. K., & Kumar, N. M. (2021). A critical assessment on functional attributes and degradation mechanism of membrane electrode assembly components in direct methanol fuel cells. *Sustainability*

- (Switzerland), 13(24). <https://doi.org/10.3390/su132413938>
- Junoh, H., Jaafar, J., Nik Abdul, N. A. H., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., Rahman, M. A., Aziz, F., & Yusof, N. (2020). Performance of polymer electrolyte membrane for direct methanol fuel cell application: Perspective on morphological structure. *Membranes*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/membranes10030034>
- Kang, S., Bae, G., Kim, S. K., Jung, D. H., Shul, Y. G., & Peck, D. H. (2018). Performance of a MEA using patterned membrane with a directly coated electrode by the bar-coating method in a direct methanol fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(24), 11386–11396. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.086>
- Kharisma, T., Ariesta, N., & Arrisujaya, D. (2020). Karakteristik Membran Komposit Berbasis Kitosan/Pva Termodifikasi Lempung Dari Babakan Madang Bogor. *Jurnal Sains Natural*, 10(1), 33. <https://doi.org/10.31938/jsn.v10i1.276>
- Kuan, Y. Der, Lyu, J. L., Ke, T. R., Sung, M. F., & Do, J. S. (2019). Planar current collector design and fabrication for proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20), 10071–10081. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.178>
- Kusumastuti, E., Susilaningsih, E., Sulistyani, M., Mu`Tazam, M., Fadzillah, A. M., & Atmaja, L. (2021). Bab 3 Geopolimer Dan Potensinya Dalam Aplikasi Membran Polimer Elektrolit. *Pemanfaatan Sumber Daya Alam Indonesia: Ketahanan Pangan, Energi Dan Material Maju*, 65–96.
- Lorenz-Fonfria, V. A. (2020). Infrared Difference Spectroscopy of Proteins: From Bands to Bonds. *Chemical Reviews*, 120(7), 3466–3576. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00449>
- Lusiana, R. A., & Prasetya, N. B. A. (2020). Indonesian Journal of Chemical Science Pengaruh Penambahan Aditif terhadap Karakterisasi Fisikokimia Membran Polisulfon. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 9(3), 197. <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ijcs>
- Madaswamy, S. L., Alothman, A. A., AL-Anazy, M. mana, Ifseisi, A. A., Alqahtani, K. N., Natarajan, S. K., Angaiah, S., & Ragupathy, D. (2021). Polyaniline-based nanocomposites for direct methanol fuel cells (DMFCs) - A Recent Review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 97, 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.02.008>
- Martins, F., Felgueiras, C., Smitkova, M., & Caetano, N. (2019). Analysis of fossil fuel energy consumption and environmental impacts in european countries. *Energies*, 12(6), 1–11. <https://doi.org/10.3390/en12060964>
- Maulana, M. I., Syahbanu, I., & Harlia. (2017). Sintesis dan Karakterisasi Material Konduktif Film Komposit Polipirol (PPy)/Selulosa Bakteri. *Jkk*, 6(3), 11–18.

<https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jkkmipa/article/view/22258>

- Morseletto, P. (2020). Restorative and regenerative: Exploring the concepts in the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 24(4), 763–773. <https://doi.org/10.1111/jiec.12987>
- Mu, M., Liu, W., Xi, W., Yu, A., & Shi, L. (2024). Numerical investigation of anisotropic gas diffusion layers with graded porosity and wettability in anion exchange membrane fuel cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 226(January), 27–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125493>
- Muliawati, E. C., Budianto, A., & Hamid, A. (2021). Promising Potential of Eugenol (Clove) Based Organic Membrane for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. *Journal of Physics: Conference Series*, 2117(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2117/1/012037>
- Muliawati, E. C., & Yustia Wulandari Mirzayanti. (2021). Membran Polieugenol Tersulfonasi (PET) Sebagai Potensi Sel Bahan Bakar Metanol Langsung. *Journal of Research and Technology*, 7(2), 247–256. <https://doi.org/10.55732/jrt.v7i2.478>
- Munjewar, S. S., & Thombre, S. B. (2019). Effect of current collector roughness on performance of passive direct methanol fuel cell. *Renewable Energy*, 138, 272–283. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.101>
- Munjewar, S. S., Thombre, S. B., & Mallick, R. K. (2017). A comprehensive review on recent material development of passive direct methanol fuel cell. *Ionics*, 23(1). <https://doi.org/10.1007/s11581-016-1864-1>
- Mutia, A., & Hidayati, N. (2020). Karakteristik Membran sPEEK-PVA- Cs-Asam Fosfat untuk Sel Bahan Bakar Metanol. *Jurnal Kejuangan*, 3(1), 14–15.
- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. (2019). How to read and interpret ftir spectroscopy of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 97–118. <https://doi.org/10.17509/ijost.v4i1.15806>
- Nayla, M., & Radiman, C. L. (2023). Pengaruh Konsentrasi Agen Pensulfonasi Terhadap Karakteristik Membran Selulosa Bakterial Tersulfonasi Pada Aplikasi DMFC. *ALCHEMY: Journal of Chemistry*, 10(2), 60–70. <https://doi.org/10.18860/al.v10i2.13519>
- Ng, W. W., Thiam, H. S., Pang, Y. L., Chong, K. C., & Lai, S. O. (2022). A State-of-Art on the Development of Nafion-Based Membrane for Performance Improvement in Direct Methanol Fuel Cells. *Membranes*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/membranes12050506>
- Nugraha, A., Tamjidillah, M., Irawansyah, H., Pratama, T., Rusdi, M. Z., & Fadilah, A. (2023). Pengolahan Sampah dan Pemanfaatannya Sebagai Bahan Baku Energi Alternatif Pada Bank Sampah Urban Dewan Barabai. *Jurnal*

- Pengabdian ILUNG (Inovasi Lahan Basah Unggul)*, 3(2), 214.  
<https://doi.org/10.20527/ilung.v3i2.9660>
- O'Hayre, R. P. (2017). Fuel cells for electrochemical energy conversion. *EPJ Web of Conferences*, 148, 1–16. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714800013>
- Ogungbemi, E., Ijaodola, O., Khatib, F. N., Wilberforce, T., El Hassan, Z., Thompson, J., Ramadan, M., & Olabi, A. G. (2019). Fuel cell membranes – Pros and cons. *Energy*, 172, 155–172. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.034>
- Pacheco, C., Barbosa, R., Ordoñez, L. C., Sierra, J., & Escobar, B. (2021). Design, simulation and experimental characterization of a high-power density fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(51), 26197–26204. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.132>
- Parekh, A. (2022). Recent developments of proton exchange membranes for PEMFC: A review. *Frontiers in Energy Research*, 10(September). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.956132>
- Pujiastuti, S., & Onggo, H. (2016). Effect of various concentration of sulfuric acid for Nafion membrane activation on the performance of fuel cell. *AIP Conference Proceedings*, 1711. <https://doi.org/10.1063/1.4941639>
- Puspitasari, L., Mareta, S., & Thalib, A. (2021). Karakterisasi Senyawa Kimia Daun Mint (*Mentha* sp.) dengan Metode FTIR dan Kemometrik. *Sfj Sainstech Farma Jurnal Ilmu Kefarmasian*, 14(1), 5–11.
- Qin, C., Tian, S., Wang, W., Jiang, Z. J., & Jiang, Z. (2022). Advances in platinum-based and platinum-free oxygen reduction reaction catalysts for cathodes in direct methanol fuel cells. *Frontiers in Chemistry*, 10(November), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1073566>
- Ramasamy, P., Muruganantham, B., Rajasekaran, S., Babu, B. D., Ramkumar, R., Marthanda, A. V. A., & Mohan, S. (2024). A comprehensive review on different types of fuel cell and its applications. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 13(2), 774–780. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i2.6348>
- Ramli, Z. A. C., Kamarudin, S. K., Zainoodin, A. M., & Basri, S. (2019). Synthesis, characterization and potential of Pt-Ru supported carbon nanocage (CNC) electrocatalyst for future DMFC. *International Journal of Integrated Engineering*, 11(7), 190–200. <https://doi.org/10.30880/ijie.2019.11.07.025>
- Rohendi, D., Syarif, N., Said, M., Utami, M. T., & Marcelina, Y. (2019). Utilization of catalyst-coated membrane (CCM) and spraying methods in fabrication membrane electrode assembly (MEA) for direct methanol fuel Cell (DMFC) using Pt-Co / C catalyst. *Journal of Physics: Conference Series*, 1282(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1282/1/012065>
- Rohman, A., Windarsih, A., Lukitaningsih, E., Rafi, M., Betania, K., & Fadzillah,

- N. A. (2020). The use of FTIR and Raman spectroscopy in combination with chemometrics for analysis of biomolecules in biomedical fluids: A review. *Biomedical Spectroscopy and Imaging*, 8(3–4), 55–71. <https://doi.org/10.3233/bsi-200189>
- Santiago, Ó., Raso, M. A., Navarro, E., & Leo, T. J. (2019). Selection of thermoplastic polymers for use as bipolar plates in direct methanol fuel cell applications. *Materials and Design*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108148>
- Sayed, E. T., Eisa, T., Mohamed, H. O., Abdelkareem, M. A., Allagui, A., Alawadhi, H., & Chae, K. J. (2019). Direct urea fuel cells: Challenges and opportunities. *Journal of Power Sources*, 417(December 2018), 159–175. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.12.024>
- Sazali, N., Salleh, W. N. W., Jamaludin, A. S., & Razali, M. N. M. (2020). New perspectives on fuel cell technology. *Membranes*, 10(5), 99.
- Shiva Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 442–454. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>
- Soriano, Roberto, M., Rojas, N., Nieto, E., de Guadalupe González-Huerta, R., & Sandoval-Pineda, J. M. (2021). Influence of the gasket materials on the clamping pressure distribution in a PEM water electrolyzer: Bolt torques and operation mode in pre-conditioning. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(51), 25944–25953. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.076>
- Sun, W., Zhang, W., Su, H., Leung, P., Xing, L., Xu, L., Yang, C., & Xu, Q. (2019). Improving cell performance and alleviating performance degradation by constructing a novel structure of membrane electrode assembly (MEA) of DMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(60), 32231–32239. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.113>
- Syarif, N., Rohendi, D., Nanda, A. D., Sandi, M. T., & Sihombing, D. S. W. B. (2022). Gas diffusion layer from Binchotan carbon and its electrochemical properties for supporting electrocatalyst in fuel cell. *AIMS Energy*, 10(2), 292–305. <https://doi.org/10.3934/energy.2022016>
- Tang, A., Crisci, L., Bonville, L., & Jankovic, J. (2021). An overview of bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13(2). <https://doi.org/10.1063/5.0031447>
- Vietanti, F., Susanti, D., Purwaningsih, H., & Kurniawan, F. (2019). Pengaruh Reduktor Zink pada Sintesis Graphene terhadap Performa PdAu/Graphene sebagai Material Elektrokatalis DMFC. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan VII- Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya*, 379–384.
- Waktu, D. A. N., Terhadap, P., Katalis, S., Tanliano, V. J., & Lee, D. (2023). *Pengaruh rasio pva-ssa, temperatur crosslinking dan waktu pengeringan*

*terhadap sintesa katalis asam heterogen tersulfonasi.*

- Wang, K., Zhou, T., He, J., Cao, Z., & Jiang, Z. (2024). Regulating the atomic ratio of Pt/Ru to enhance CO anti-poisoning of Pt based electrocatalysts toward methanol oxidation reaction. *Molecular Catalysis*, 556(February), 113927. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2024.113927>
- Wang, L., Rojas-Carbonell, S., Hu, K., Setzler, B. P., Motz, A. R., Ueckermann, M. E., & Yan, Y. (2022). Standard Operating Protocol for Ion-Exchange Capacity of Anion Exchange Membranes. *Frontiers in Energy Research*, 10(May), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.887893>
- Wang, L., Yin, L., Yang, W., Cheng, Y., Wen, F., Liu, C., Dong, L., Wang, M., Ma, S., & Feng, X. (2021). Evaluation of structural aspects and operation environments on the performance of passive micro direct methanol fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(2), 2594–2605. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.114>
- Wang, L., Yuan, Z., Wen, F., Cheng, Y., Zhang, Y., & Wang, G. (2018). A bipolar passive DMFC stack for portable applications. *Energy*, 144, 587–593. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.039>
- Wang, X. R., Ma, Y., Gao, J., Li, T., Jiang, G. Z., & Sun, Z. Y. (2021). Review on water management methods for proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(22), 12206–12229. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.211>
- Xue, R., Zhang, Y., Li, X., & Liu, X. (2018). Performance investigation and effect of temperature on a passive MDMFC with stainless steel mesh. *Applied Thermal Engineering*, 141(August 2017), 642–647. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.016>
- Yang, Y., Zhou, X., Li, B., & Zhang, C. (2021). Recent progress of the gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells: Material and structure designs of microporous layer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(5), 4259–4282. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.185>
- Yu, X., Zhang, Q., Ling, Y., Yang, Z., & Cheng, H. (2018). Promoted stability and electrocatalytic activity of PtRu electrocatalyst derived from coating by cerium oxide with high oxygen storage capacity. *Applied Surface Science*, 455(June), 815–820. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.058>
- Yusoff, Y. N., Loh, K. S., & Wong, W. Y. (2024). the Effect of Titanium Dioxide Filler in Polybenzimidazole-Sulfonated Graphene Oxide Composite Membrane for High-Temperature Pemfc Applications. *Jurnal Teknologi*, 86(1), 53–62. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v86.20075>
- Yusuf, A., Sodik, A., Giwa, A., Eke, J., Pikuda, O., De Luca, G., Di Salvo, J. L., & Chakraborty, S. (2020). A review of emerging trends in membrane science and technology for sustainable water treatment. *Journal of Cleaner Production*,

266, 121867. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121867>

- Zainudin, A., Anggraeni, A., Sofyatin, T., & Bahti, H. H. (2015). Pembuatan Resin Penukar Ion Polistiren Sulfonat. *Chimica et Natura Acta*, 3(1), 1–4. <https://doi.org/10.24198/cna.v3.n1.9172>
- Zhang, Z., Zhang, J., & Zhang, T. (2022). Endplate Design and Topology Optimization of Fuel Cell Stack Clamped with Bolts. *Sustainability (Switzerland)*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/su14084730>
- Zhao, J., Guo, H., Xing, Y., Ping, S., Lin, W., Yang, Y., Wang, Z., & Ma, T. (2023). A review on the sealing structure and materials of fuel-cell stacks. *Clean Energy*, 7(1), 59–69. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac096>
- Zhu, L. Y., Li, Y. C., Liu, J., He, J., Wang, L. Y., & Lei, J. Du. (2022). Recent developments in high-performance Nafion membranes for hydrogen fuel cells applications. *Petroleum Science*, 19(3), 1371–1381. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.11.004>
- Zhu, P., Gastol, D., Marshall, J., Sommerville, R., Goodship, V., & Kendrick, E. (2021). A review of current collectors for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 485. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229321>
- Zucconi, A., Hack, J., Stocker, R., Suter, T. A. M., Rettie, A. J. E., & Brett, D. J. L. (2024). Challenges and opportunities for characterisation of high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cells: a review. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(14), 8014–8064. <https://doi.org/10.1039/d3ta06895a>
- Zulfikar, M., Nur Hidayati, M. M., & Purnama, H. (2019). Karakteristik Membran sPEEK-Kitosan dengan Bahan Pengisi Silika-carbon nanotube untuk Sel Bahan Bakar Metanol. *URECOL*, 27–31. <http://repository.urecol.org/index.php/proceeding/article/download/784/767>