

**UJI KINERJA *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) PADA
PEMFC STEK TUNGGAL MENGGUNAKAN KATALIS Pt/C DENGAN
LOADING KATALIS YANG BERVARIASI**

SKRIPSI

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



Oleh:

VINA AGUSTIANA

08031282126036

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

2025

HALAMAN PENGESAHAN

**UJI KINERJA *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) PADA
PEMFC STEK TUNGGAL MENGGUNAKAN KATALIS Pt/C DENGAN
LOADING KATALIS YANG BERVARIASI**

SKRIPSI

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

Oleh

VINA AGUSTIANA

08031282126036

Indralaya, 24 Januari 2025

**Mengetahui,
Pembimbing**



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

NIP. 196704191993031001

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

NIP. 197111191997021001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi Vina Agustiana (08031282126036) dengan judul “Uji Kinerja *Membrane Electrode Assembly* (MEA) pada PEMFC Stek Tunggal Menggunakan Katalis Pt/C dengan Loading Katalis yang Bervariasi” telah disidangkan dihadapan Tim Penguji Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 23 Januari 2025 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, 24 Januari 2025

Ketua :

1. **Dr. Desnelli, M.Si.**

NIP. 196912251997022001

()

Anggota :

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

NIP. 196704191993031001

()

2. **Prof. Dr. Poedji Loekitowati H, M.Si.**

NIP. 196808271994022001

()

Mengetahui,

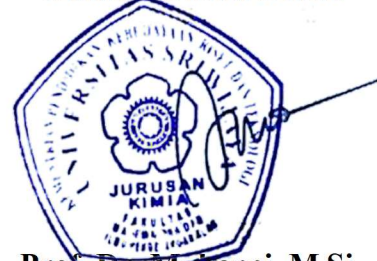
Dekan FMIPA



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

NIP. 197111191997021001

Ketua Jurusan Kimia



Prof. Dr. Muhiarni, M.Si.

NIP. 196903041994122001

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Vina Agustiana
NIM : 08031282126036
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 sarjana strata (S1) dari Universitas Sriwijaya maupun perguruan tinggi lain. Semua informasi yang dimuat dalam skripsi ini 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, 24 Januari 2025

Penulis



Vina Agustiana

NIM. 08031282126036

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

Sebagai civitas akademik Universitas Sriwijaya, yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Vina Agustiana
NIM : 08031282126036
Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “hak bebas royalti non-eksklusif (*non-exclusively royalty-free right*) atas karya ilmiah yang berjudul: “Uji Kinerja *Membrane Electrode Assembly* (MEA) pada PEMFC Stek Tunggal Menggunakan Katalis Pt/C dengan Loading Katalis yang Bervariasi”. 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.

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Indralaya, 24 Januari 2025

Penulis



Vina Agustiana

NIM. 08031282126036

HALAMAN PERSEMBAHAN

“Barang siapa yang menempuh jalan untuk mencari ilmu, maka Allah akan memudahkan baginya jalan menuju surga.”

(HR. Bukhari dan Muslim)

“Boleh jadi kamu tidak menyenangi sesuatu, padahal itu baik bagimu, dan boleh jadi kamu menyukai sesuatu, padahal itu tidak baik bagimu. Allah mengetahui, sedang kamu tidak mengetahui.”

(QS. Al-Baqarah/2:216)

“Dan barang siapa yang bertakwa kepada Allah niscaya Allah menjadikan baginya kemudahan dalam urusan.”

(QS. Ath-Thalaq/65:4)

Skripsi ini sebagai tanda syukur dan terimakasih kepada Allah SWT. dan baginda Rasul Muhammad SAW. Skripsi ini saya persembahkan kepada:

1. Kedua orang tuaku yang selalu memberikan doa dan dukungan baik secara moral maupun material yang tiada hentinya.
2. Keluarga besarku yang selalu mensupport dan mendoakanku.
3. Dosen Pembimbingku Bapak Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D dan seluruh dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
4. Rekan-rekan seperjuangan di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
5. Almamater Universitas Sriwijaya.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Uji Kinerja *Membrane Electrode Assembly* (MEA) pada PEMFC Stek Tunggal Menggunakan Katalis Pt/C dengan Loading Katalis yang Bervariasi”. Shalawat dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW yang ajarannya menjadi teladan dalam menuntut ilmu dan mengabdikan diri untuk kebaikan bersama. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya.

Proses penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari berbagai hambatan dan rintangan yang penulis hadapi. Namun dengan kesabaran dan ketekunan yang dilandasi dengan rasa tanggung jawab selaku mahasiswa dan juga bantuan dari berbagai pihak baik berupa material maupun moril, akhirnya selesai sudah penulisan skripsi ini.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

1. Orang tua tercintaku, Ayah Suprpto dan Ibu Sulismiati yang menjadi sumber kekuatan dan inspirasi terbesar dalam hidup penulis. Terima kasih atas doa dan dukungan yang tiada henti, cinta yang tulus, serta pengorbanan tanpa batas. Segala pencapaian ini hanyalah wujud kecil dari rasa syukur atas kasih sayang kalian terhadap penulis.
2. Kedua adikku, Tata Dwi Nata dan Rifatan Maulana yang telah menjadi sumber semangat dan kebahagiaan dalam perjalanan hidup penulis. Terima kasih atas dukungan, kesabaran, dan kebersamaan yang tak ternilai.
3. Bapak Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D selaku pembimbing TA yang telah banyak meluangkan waktunya dalam memberikan bimbingan, bantuan, motivasi, saran, dan arahan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Bapak Prof. Hermasyah, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya.
5. Ibu Prof. Dr. Muharni, M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.

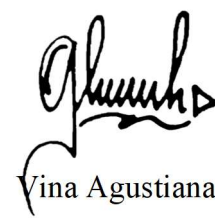
6. Bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si. selaku sekretaris Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
7. Bapak Prof. Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, M.Si selaku dosen PA, terimakasih atas bimbingan dan saran selama masa perkuliahan penulis.
8. Ibu Dr. Desnelli, M.Si, Bapak Dr. Zainal Fanani, M.Si. dan Ibu Prof. Dr. Poedji Loekitowati Hariani, M.Si selaku dosen penguji tugas akhir, terima kasih atas masukan dan saran terkait penelitian dan dalam penyelesaian skripsi ini.
9. Seluruh Dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya yang telah membimbing dan memberikan ilmu kepada penulis selama masa perkuliahan, terima kasih atas setiap pelajaran kehidupan yang diberikan.
10. Staff administrasi Jurusan Kimia, Kak Chosiin dan Mbak Novi yang telah membantu penulis dalam proses perkuliahan hingga tugas akhir.
11. Keluarga besar penulis yang telah memberikan dukungan dan doa sepanjang perjalanan hidup penulis.
12. Kakak-kakak mentor PUR (Kak Dwi, Kak Reka, Kak Yollan, dan Kak Hawa), yang telah memberikan banyak bimbingan dan wawasan berharga yang sangat membantu proses penelitian dan penulisan skripsi ini. Terima kasih atas dedikasi, waktu, dan pengetahuan yang telah dibagikan kepada penulis. Semoga kakak senantiasa dalam lindungan Allah SWT dan dilancarkan segala urusannya.
13. Sahabat terbaikku, Sabrina Widya Ningrum atas dukungan, semangat, dan kebersamaan yang memberikan warna, kekuatan, dan inspirasi dalam perjalanan hidup penulis. Semangat menjalani hari yang penuh teka-teki ini.
14. Sobat Lima Serangkai (Ardhan, Linda, Sabrina, dan Tama), yang sudah menjadi partner terbaik sejak bangku sekolah hingga saat ini. Semangat untuk kalian yang sedang menempuh pendidikan di kota orang.
15. Sobat Info Qosidahan (Aghni, Aca, Kya, Riyanti, dan Via), terima kasih telah menjadi teman seperjuangan sekaligus keluarga selama perkuliahan yang selalu memberikan dukungan, kebaikan, dan semangat kepada penulis.
16. Sobat The Kost (Ade, Cindy, dan Iki), terimakasih telah menjadi pendengar setia penulis selama perkuliahan dan dalam penyelesaian skripsi ini.

17. Couple Tiga Sahabat (Ara dan Via), yang telah menjadi tempat cerita baik suka maupun duka dan mewarnai hidup penulis dengan segala pertikaian kecilnya.
18. Tim PUR Fuel Cell & Hidrogen 2021 (Agnes, Biga, Cia, Dera, Diana, Raihan, dan Riyanti) atas kerjasama, bantuan, dan dukungannya selama penelitian.
19. Badan Pengurus Inti Askara dan Kolaka yang telah menjadi rumah dikala sedih tertimpa LPJ dan selalu memberikan semangat baru disetiap langkah perjalanan dalam masa perkuliahan penulis.
20. Teman-teman seperjuangan Kimia Angkatan 2021, terima kasih atas bantuan dan kebersamaannya dari maba hingga akhir serta untuk semua pengalaman dan pembelajaran yang luar biasa bersama kalian.
21. Seluruh kakak dan adik tingkat Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya, yang telah membantu memberikan saran dan masukan baik secara langsung maupun tidak langsung dalam pembuatan skripsi ini.
22. Semua pihak yang telah membantu penulis baik secara langsung maupun tidak langsung yang tidak dapat disebutkan satu per satu sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini dengan baik.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dan kesalahan yang perlu diperbaiki dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca untuk kesempurnaan skripsi ini. Semoga karya ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua dan berkontribusi pada pengembangan ilmu kimia di masa yang akan datang. Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih atas perhatian, dukungan, dan waktu yang telah diberikan.

Indralaya, 24 Januari 2025

Penulis



Vina Agustiana

NIM. 08031282126036

SUMMARY

PERFORMANCE TEST OF MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA) IN PEMFC SINGLESTACK USING Pt/C CATALYST WITH VARIED CATALYST LOADINGS

Vina Agustiana, Supervised by Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D.
Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Sriwijaya University

ix + 92 pages, 3 tables, 19 figures, 9 appendices

The Membrane Electrode Assembly (MEA) is a crucial component in converting chemical energy into electrical energy in Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC). One of the factors influencing the performance of MEA in PEMFCs is the type and loading of the catalyst used. This study evaluated the performance of a membrane electrode assembly (MEA) in a single-cell PEMFC using Pt/C catalysts with varying catalyst loadings. The MEA used in the study had dimensions of $2,5 \times 2,5$ cm and consisted of an anode and cathode electrode utilizing Pt/C as the catalyst, demonstrating good efficiency and durability across different catalyst loadings of 1; 2; 3; 4; and 5 mg/cm². The electrodes of the MEA were characterized to determine their morphology and thickness using a Scanning Electron Microscope (SEM) and their electrochemical properties using methods such as Cyclic Voltammetry (CV), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), and Linear Sweep Voltammetry (LSV). Additionally, the performance of the MEA was assessed through I-V and I-P curves with a hydrogen flow rate of 100 mL/min, providing information on the current density produced and the characteristics of the polarization curve. The results indicated that the MEA with a Pt/C catalyst loading of 2 mg/cm² exhibited the best performance based on electrode characterization and MEA performance tests. SEM-EDX morphological characterization of the electrodes revealed the following elemental composition is 83,50% carbon, 13,43% fluorine, 0,27% sulfur, and 2,81% platinum, with a thickness of 230,95 μ m. Electrochemical property analysis showed that the electrode with a catalyst loading of 2 mg/cm² had an Electrochemical Surface Area (ECSA) of 10,022 m²/g, a conductivity of $12,06 \times 10^{-2}$ S/cm, and an electric charge of 0,021 C. The optimum performance of the MEA was observed from the I-V curve, where the current density increased from 0,8 mA/cm² to 137,6 mA/cm². From the I-P curve, the optimum power density was achieved at 30,112 mW/cm² with a current density of 67,2 mA/cm².

Keywords : Pt/C Catalyst Loading, Electrode, Membrane Electrode Assembly (MEA), Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Citation : 99 (2014-2024)

RINGKASAN

UJI KINERJA *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) PADA PEMFC STEK TUNGGAL MENGGUNAKAN KATALIS Pt/C DENGAN LOADING KATALIS YANG BERVARIASI

Vina Agustiana : Dibimbing oleh Prof. Drs. Dedi Rohendi, M. T., Ph. D
Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya
ix + 92 halaman, 3 tabel, 19 gambar, 9 lampiran

Membrane Electrode Assembly (MEA) merupakan salah satu komponen yang memiliki peran sentral dalam mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik dalam PEMFC. Salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja MEA dalam PEMFC berupa jenis dan loading katalis yang digunakan. Penelitian ini dilakukan uji kinerja *membrane electrode assembly* (MEA) pada PEMFC stek tunggal menggunakan katalis Pt/C dengan loading katalis yang bervariasi telah dilakukan. MEA yang digunakan berukuran $2,5 \times 2,5$ cm yang tersusun dari elektroda anoda dan katoda menggunakan katalis Pt/C sebagai katalis memiliki efisiensi dan daya tahan yang baik dalam penggunaannya dengan berbagai variasi loading katalis, yaitu 1; 2; 3; 4; 5 mg/cm². Elektroda pada MEA dikarakterisasi untuk mengetahui morfologi dan ketebalannya menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) serta mengetahui sifat elektrokimianya menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV), *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS), dan *Linear Sweep Voltammetry* (LSV). Selain itu, performa MEA dapat dilihat menggunakan kurva I-V dan I-P dengan laju alir hidrogen sebesar 100 mL/menit yang memberikan informasi tentang densitas arus yang dihasilkan dan karakteristik kurva polarisasinya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MEA dengan loading katalis Pt/C sebesar 2 mg/cm² merupakan MEA terbaik berdasarkan hasil karakterisasi elektroda dan uji kinerja MEA. Hasil karakterisasi morfologi SEM-EDX pada elektroda menunjukkan persentase unsur karbon 83,50%, unsur flourin 13,43%, unsur sulfur 0,27% dan unsur platina 2,81% dengan ketebalan sebesar 230,95 μ m. Hasil analisis sifat elektrokimia menunjukkan nilai ECSA elektroda dengan loading katalis 2 mg/cm² sebesar 10,022 m²/g dan nilai konduktivitas sebesar $12,06 \times 10^{-2}$ S/cm serta muatan listrik sebesar 0,021 C. Kinerja optimum MEA pada kurva I-V diperoleh densitas arus yang meningkat dari 0,8 mA/cm² hingga 137,6 mA/cm², sementara pada kurva I-P didapatkan densitas daya optimum sebesar sebesar 30,112 mW/cm² pada nilai densitas arus sebesar 67,2 mA/cm².

Kata kunci : Loading Katalis Pt/C, Elektroda, Membrane Electrode Assembly (MEA), Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Sitasi : 99 (2014-2024)

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	iiv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
SUMMARY	x
RINGKASAN	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Hidrogen.....	4
2.2 <i>Fuel Cell</i>	4
2.3 <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)</i>	6
2.4 Komponen Penyusun PEMFC	7
2.4.1 <i>Membrane Electrode Assembly (MEA)</i>	7
2.4.2 Elektroda	8
2.4.3 <i>Gas Diffusion Layer (GDL)</i>	9
2.4.4 <i>Catalyst Layer (CL)</i>	10
2.4.5 Katalis Pt/C	10
2.4.6 Membran Nafion	11
2.4.7 <i>Bipolar Plate (BP)</i>	12
2.4.8 Gasket.....	12
2.4.9 <i>Current Colector (CC)</i>	13
2.4.10 <i>End Plate</i>	13
2.5 Karakterisasi Elektroda	14
2.5.1 <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	14
2.5.2 <i>Cyclic Voltammetry (CV)</i>	14
2.5.3 <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i>	15
2.5.4 <i>Linear Sweep Voltammetry (LSV)</i>	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	17

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	Pembuatan <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)	17
3.3.2	Pembuatan Elektroda Pt/C	18
3.3.3	Karakterisasi Elektroda Pt/C	19
3.3.4	Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	20
3.3.5	Uji Kinerja <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	21
3.3.6	Analisis Data	21
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		24
4.1	Pembuatan <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)	24
4.2	Pembuatan Elektroda dan Karakterisasi Elektroda	25
4.2.1	Karakterisasi Elektroda dengan Metode <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	27
4.2.2	Karakterisasi Elektroda dengan Metode <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	33
4.2.3	Karakterisasi Elektroda dengan Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	34
4.2.4	Karakterisasi Elektroda dengan Metode <i>Linear Sweep Voltammetry</i> (LSV)	37
4.3	Pembuatan MEA	38
4.4	Uji Kinerja MEA	39
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		43
5.1	Kesimpulan	43
5.2	Saran	43
DAFTAR PUSTAKA		44
LAMPIRAN		56

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Prinsip Kerja <i>Fuel Cell</i> (Wang <i>et al.</i> , 2024).....	5
Gambar 2. (a) Komponen Penyusun PEMFC; (b) Skema Operasi Kerja PEMFC (Abaspour <i>et al.</i> , 2014; Tellez-Cruz <i>et al.</i> , 2021).....	6
Gambar 3. Struktur Elektroda PEMFC (Majlan <i>et al.</i> , 2018).....	8
Gambar 4. Lapisan <i>gas diffusion layer</i> (Park <i>et al.</i> , 2015)	9
Gambar 5. Struktur <i>catalyst layer</i> pada PEMFC (Okonkwo <i>et al.</i> , 2021)	10
Gambar 6. Morfologi GDL Menggunakan Instrumen <i>Microscope Hiview</i> Perbesaran 1.600x.....	24
Gambar 7. Citra Gambar Elektroda dengan Variasi Loading Katalis Pt/C Lapisan 1 Menggunakan Instrumen <i>Microscope Hiview</i> (a) 1 mg/cm ² (b) 2 mg/cm ² (c) 3 mg/cm ² (d) 4 mg/cm ² (e) 5 mg/cm ²	26
Gambar 8. Citra Gambar Elektroda dengan Variasi Loading Katalis Pt/C Lapisan 2 Menggunakan Instrumen <i>Microscope Hiview</i> (a) 1 mg/cm ² (b) 2 mg/cm ² (c) 3 mg/cm ² (d) 4 mg/cm ² (e) 5 mg/cm ²	27
Gambar 9. Citra Gambar Elektroda dengan Variasi Loading Katalis Pt/C Lapisan 3 Menggunakan Instrumen <i>Microscope Hiview</i> (a) 1 mg/cm ² (b) 2 mg/cm ² (c) 3 mg/cm ² (d) 4 mg/cm ² (e) 5 mg/cm ²	27
Gambar 10. Morfologi Hasil SEM-EDX Elektroda Pt/C dengan Variasi Loading Katalis (a) 1 mg/cm ² (b) 2 mg/cm ² (c) 3 mg/cm ² (d) 4 mg/cm ² (e) 5 mg/cm ² dengan Perbesaran Berturut-turut 5.000, 10.000, dan 15.000x untuk Masing-masing Loading.....	28
Gambar 11. Komposisi Hasil SEM-EDX Elektroda Pt/C dengan Variasi Loading Katalis (a) 1 mg/cm ² (b) 2 mg/cm ² (c) 3 mg/cm ² (d) 4 mg/cm ² (e) 5 mg/cm ²	30
Gambar 12. Ketebalan Hasil SEM-EDX Elektroda Pt/C dengan Variasi Loading Katalis Perbesaran 250x (a) 1 mg/cm ² (b) 2 mg/cm ² (c) 3 mg/cm ² (d) 4 mg/cm ² (e) 5 mg/cm ²	32
Gambar 13. Kurva Voltammogram Elektroda Variasi Loading Katalis Pt/C.....	33
Gambar 14. Kurva Nyiquis Elektroda Variasi Loading Katalis Pt/C (a) 1 mg/cm ² (b) 2 mg/cm ² (c) 3 mg/cm ² (d) 4 mg/cm ² (e) 5 mg/cm ²	36
Gambar 15. Kurva LSV Elektroda Pt/C dengan Variasi Loading Katalis.....	37
Gambar 16. MEA dengan Variasi Loading Katalis Pt/C.....	38
Gambar 17. Nilai OCV pada Variasi Loading Katalis Pt/C.....	39
Gambar 18. Kurva Hubungan Densitas Arus Terhadap Tegangan MEA dengan Katalis Pt/C.....	40
Gambar 19. Kurva Hubungan Densitas Arus Terhadap Densitas Daya dari MEA dengan Katalis Pt-C.....	41

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Komposisi Bahan Pembuatan Elektroda Bagian Anoda dan Katoda dengan Loading Katalis Pt/C yang Bervariasi	19
Tabel 2. Data ECSA Elektroda dengan Loading Katalis Pt/C Bervariasi	33
Tabel 3. Nilai Konduktivitas Elektroda Pt/C.....	36

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Skema Kerja.....	56
Lampiran 2. Perhitungan Pembuatan GDL.....	63
Lampiran 3. Perhitungan Komponen Elektroda.....	64
Lampiran 4. Analisis Ukuran Partikel pada Elektroda Pt/C.....	67
Lampiran 5. Perhitungan Nilai ECSA Karakterisasi CV.....	69
Lampiran 6. Perhitungan Nilai Konduktivitas dari Pengukuran EIS.....	76
Lampiran 7. Perhitungan Nilai Muatan (Q) pada Kurva LSV.....	81
Lampiran 8. Data Hasil Uji Kinerja MEA dengan Variasi Loading Katalis Pt/C pada Laju Alir Hidrogen 100 mL/menit.....	83
Lampiran 9. Alat dan Bahan Penelitian.....	90

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan energi listrik semakin meningkat seiring berjalannya waktu. Saat ini, banyak energi listrik yang masih bergantung pada bahan bakar fosil sebagai sumber utamanya dimana ketersediaan bahan bakar fosil akan habis jika dipakai secara terus-menerus (Hidayat *et al.*, 2022). Penggunaan bahan bakar fosil juga memiliki dampak negatif bagi lingkungan meliputi mengakibatkan pemanasan global, kabut asap, polusi air, kekeringan, banjir, hujan asam, dan dapat menyebabkan kenaikan CO₂ di atmosfer (Tampubolon *et al.*, 2021; Zarandi *et al.*, 2019). Tidak seperti bahan bakar fosil, sumber energi terbarukan sangat melimpah, dapat terus diperbaharui, dan sedikit berdampak negatif bagi lingkungan (Zhang, 2024). Oleh karena itu, diperlukan alternatif yang dapat menggantikan bahan bakar fosil sebagai sumber utama untuk menghasilkan energi listrik dengan energi terbarukan berupa gas hidrogen melalui proses konversi energi menggunakan *fuel cell* (Hidayat *et al.*, 2022; Ma'fur & Widiarsa, 2016).

Fuel cell dinyatakan sebagai perangkat konversi energi elektrokimia yang secara langsung mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi listrik (Musse & Lee, 2024). Salah satu teknologi *fuel cell* yang paling canggih dan tersebar secara luas dikenal sebagai *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). PEMFC menjadi sebuah sel elektrokimia di mana hidrogen mengalami oksidasi di anoda dan oksigen mengalami reduksi di katoda. Reaksi kimia dalam PEMFC menghasilkan listrik dengan mengeluarkan hanya air sebagai hasil sampingan (Liu & Zio, 2019). Keunggulan PEMFC dibandingkan dengan jenis *fuel cell* lainnya mencakup kemudahan pengoperasian karena penggunaan membran elektrolit yang dapat mencegah korosi, kinerja yang cepat, efisiensi dan kerapatan arus yang tinggi, temperatur yang rendah, suplai bahan bakar yang baik, dan umur pakai yang panjang (Hasanah & Muslimin, 2020).

Komponen utama dalam *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) berupa *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang memiliki peran sentral dalam mengkatalisasi reaksi kimia menjadi energi listrik (Rohendi *et al.*, 2019). MEA

terdiri dari elektroda anoda, membran elektrolit, dan elektroda katoda sehingga dapat terjadi reaksi elektrokimia. Membran elektrolit tersebut diapit oleh anoda dan katoda di kedua sisinya (Rohendi *et al.*, 2016). Elektroda pada MEA disusun dari beberapa komponen, yaitu lapisan difusi gas (GDL), lapisan mikropori (MPL), dan lapisan katalis (CL) (Olabi *et al.*, 2022). Lapisan katalis menjadi tempat terjadinya reaksi elektrokimia dalam MEA (Feng *et al.*, 2022). Kinerja MEA diukur melalui rapat arus yang dihasilkan, yang dapat dioptimalkan dengan mempertimbangkan jenis dan loading katalis yang digunakan (Rohendi *et al.*, 2019).

Katalis yang digunakan dalam penelitian ini berupa Pt/C yang terletak pada elektroda baik di anoda maupun di katoda. Katalis Pt/C umum diaplikasikan pada elektroda dalam PEMFC karena memiliki aktivitas katalitik yang tinggi, selektivitas, dan stabilitas yang baik (Tellez-Cruz *et al.*, 2021). Katalis Pt/C juga memiliki efisiensi dan daya tahan yang baik dalam penggunaannya (Chourashiya *et al.*, 2022; Ojemaye & Okoh, 2021). Selain katalis, loading katalis juga mempengaruhi kinerja MEA. Hal ini karena loading katalis dapat mempercepat reaksi pemisahan ion hidrogen dan elektron dari gas hidrogen sebagai reaktan pada PEMFC (Sucipta *et al.*, 2023). Penelitian Sgarbi *et al.*, 2023 telah melakukan uji terhadap loading katalis Pt/C dengan variasi sebesar 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 mg/cm² yang digunakan untuk mengevaluasi pengaruh loading katalis Pt/C pada mekanisme dan tingkat degradasi terhadap MEA pada PEMFC. Ukuran MEA yang digunakan dalam penelitian tersebut sebesar 5 × 5 cm. Penelitian tersebut mendapatkan hasil dimana variasi loading katalis 0,2 dan 0,3 mg/cm² memiliki kinerja yang baik pada MEA yang digunakan dalam penelitian tersebut. Loading katalis tersebut belum dapat dikatakan sebagai variasi yang optimum untuk mendukung kinerja MEA pada aplikasi PEMFC dalam skala besar seperti di industri atau perusahaan (Sgarbi *et al.*, 2023).

Berbeda dari penelitian sebelumnya, penelitian ini menggunakan variasi loading katalis Pt/C berupa 1; 2; 3; 4; 5 mg/cm² pada MEA dengan ukuran 2,5 × 2,5 cm agar dapat digunakan dalam skala industri atau perusahaan sehingga diperlukan variasi loading katalis yang lebih besar. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang densitas arus yang dapat dihasilkan dan karakteristik kurva polarisasinya. Hasil penelitian ini juga kedepannya diharapkan

dapat menjadi dasar pengaplikasian pada *fuel cell* untuk *backup power Base Transreceiver Station* (BTS) yang membutuhkan aplikasi PEMFC dengan daya tahan dan efisiensi yang tinggi untuk memastikan operasional yang stabil dan berkelanjutan. Dalam konteks ini, performa MEA menjadi sangat krusial karena MEA yang digunakan harus mampu menahan degradasi selama periode waktu yang panjang dan tetap mempertahankan kinerja optimal. Selain itu, pemilihan material yang tepat dan pengoptimalan loading katalis juga akan memainkan peran penting dalam menjaga efisiensi serta daya tahan pada PEMFC sehingga dapat memenuhi kebutuhan energi yang tinggi dalam skala industri besar.

Elektroda dengan loading katalis Pt/C 1; 2; 3; 4; 5 mg/cm² pada penelitian ini dikarakterisasi menggunakan metode *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Cyclic Voltammetry* (CV), *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS), dan *Linear Sweep Voltammetry* (LSV) dan diuji kinerjanya dalam peralatan PEMFC *stack* tunggal.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik dan sifat elektrokimia elektroda dalam MEA pada PEMFC yang menggunakan katalis Pt/C dengan berbagai variasi loading melalui analisis SEM-EDX, CV, EIS, dan LSV?
2. Bagaimana pengaruh loading katalis Pt/C terhadap kinerja MEA pada PEMFC stek tunggal?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menentukan karakteristik elektroda dalam MEA menggunakan katalis Pt/C dengan berbagai variasi loading melalui analisis SEM-EDX, ECSA, nilai konduktivitas elektrik, dan nilai muatan listrik (Q).
2. Menentukan pengaruh loading katalis Pt/C terhadap kinerja MEA pada PEMFC stek tunggal.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini dapat memberikan kontribusi untuk mengembangkan teknologi *fuel cell* dalam hal peningkatan kinerja MEA serta memberikan informasi mengenai hasil pengujian katalis Pt/C dengan loading katalis yang bervariasi dalam PEMFC.

DAFTAR PUSTAKA

- Abaspour, A., Tadrissi Parsa, N., & Sadeghi, M. (2014). A New Feedback Linearization-NSGA-II based Control Design for PEM Fuel Cell. *International Journal of Computer Applications*, 97(10), 25–32. <https://doi.org/10.5120/17044-7354>
- Abimanyu, F., Rosi, M., & Abrar. (2021). Fabrikasi Elektroda Karbon Aktif Superkapasitor dengan Menggunakan Metode Hotpress. *E-Proceeding of Engineering*, 8(5), 5685–5692.
- Adhika, D. R., Anindya, A. L., Tanuwijaya, V. V., & Rachmawati, H. (2019). Teknik Pengamatan Sampel Biologi dan Non-Konduktif Menggunakan Scanning Electron Microscopy. *Journal of SNIKO*. 53–58. <https://doi.org/10.5614/sniko.2018.9>
- Akinyele, D., Olabode, E., & Amole, A. (2020). Review of Fuel Cell Technologies and Applications for Sustainable Microgrid Systems. *Journal of Inventions*, 5(42), 1-35. <https://doi.org/doi:10.3390/inventions5030042>
- Alaswad, A., Omran, A., Sodre, J. R., Wilberforce, T., Pignatelli, G., Dassisti, M., Baroutaji, A., & Olabi, A. G. (2021). Technical and Commercial Challenges of Proton-Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells. *Energies*, 14(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/en14010144>
- Barton, D. J., Nguyen, D. T., Perea, D. E., Stoerzinger, K. A., Lumagui, K. M., Lambeets, S. V., Wirth, M. G., & Devaraj, A. (2023). Towards Quantitative Analysis of Deuterium absorption in Ferrite and Austenite during Electrochemical Charging by Comparing Cyclic Voltammetry and Cryogenic Transfer Atom Probe Tomography. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.256>
- Braz, B. A., Moreira, C. S., Oliveira, V. B., & Pinto, A. M. F. R. (2019). Electrochimica Acta 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., Moreira, C. S., Oliveira, V. B., & Pinto, A. M. F. R. (2022). Electrochemical Impedance Spectroscopy as A Diagnostic Tool for Passive Direct Methanol Fuel Cells. *Energy Reports*, 8, 7964–7975. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.045>
- Cahyotomo, A., Panglipur, H. S., Tirta, A. P., Hayat, & Madiabu, J. (2022). Deteksi Metil Paraben secara Voltametri Menggunakan Elektrode Pasta Karbon. *War. Akab*, 46(1), 16–20, <https://doi:10.55075/wa.v46i1.79>
- Carcadea, E., Varlam, M., Marinoiu, A., Raceanu, M., Ismail, M. S., & Ingham, D. B. (2019). Influence of Catalyst Structure on PEM Fuel Cell Performance – A Numerical Investigation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(25), 12829–12841. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.155>

- Chai, H., Koo, B., & Son, S. (2024). Validity and Reproducibility of Counter Electrodes for Linear Sweep Voltammetry Test in Microbial Electrolysis Cells. *Energies*, 2(17), 1–16.
- Chattot, R., Mirolo, M., Martens, I., Kumar, K., Martin, V., Gasmi, A., Dubau, L., Maillard, F., Castanheira, L., & Drnec, J. (2023). Beware of Cyclic Voltammetry Measurement Artefact in Accelerated Stress Test of Fuel Cell Cathode Revealed By Operando X-Ray Diffraction. *Journal of Power Sources*, 555(September 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232345>
- Chourashiya, M., Sharma, R., Gyergyek, S., & Andersen, S. M. (2022). Gram-size Pt/C Catalyst Synthesized Using Pt Compound Directly Recovered from An End-Of-Life PEM Fuel Cell Stack. *Materials Chemistry and Physics*, 276(November 2021), 125439. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125439f>
- Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen Production for Energy: An Overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847–3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
- Dey, S., & Dhal, G. C. (2020). Property And Structure of Various Platinum Catalysts fdawoodor Low-Temperature Carbon Monoxide Oxidations. *Materials Today Chemistry*, 16, 100228. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2019.100228>
- Dwi, Y., Dan, H., & Kn, N. (2024). Merancang Generator Hydrogen Full Cell Kapasitor Untuk Renewable Energi. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 5(1). 104–108.
- El Aboudi, I., Mdarhri, A., Lame, O., Brosseau, C., Nourdine, A., Fabrègue, D., & Bonnefont, G. (2020). Analyzing The Microstructure and Mechanical Properties of Polytetrafluoroethylene Fabricated by Field-Assisted Sintering. *Polymer*, 203(July). <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122810>
- Elgrishi, N., Rountree, K. J., McCarthy, B. D., Rountree, E. S., Eisenhart, T. T., & Dempsey, J. L. (2018). A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry. *Journal of Chemical Education*, 95(2), 197–206. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00361>
- Erwin., Fernanda, R., Dharma, M., Faiq, N., Rafi, I. (2022). Kajian Penerapan Sistem Fuel Cell Sebagai Sumber Energi Alternatif Ramah Lingkungan Pada Kendaraan Bermotor. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, 10(2), 104–116.
- Escobar, R., Valencia, G., Cardenas-escorcia, Y., Iv, J., & Meri, L. (2019). Heliyon Research Trends in Proton Exchange Membrane Fuel Cells During 2008 – 2018 : A Bibliometric Analysis. *Heliyon*, 5(May). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01724>
- Fan, L., Tu, Z., & Hwa, S. (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>
- Feng, Z., Huang, J., Jin, S., Wang, G., & Chen, Y. (2022). Artificial Intelligence-Based Multi-Objective Optimisation for Proton Exchange Membrane Fuel Cell: A Literature Review. *Journal of Power Sources*, 520(November 2021), 230808. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230808>
- Gao, W., Yin, Q., Zhang, X., Zhang, C., Lei, Y., & Wang, C. (2022). Low-Platinum Dissymmetric Membrane Electrode Assemblies for Fuel Cells Suitable for A Variety of External Humidification Conditions. *Journal of Power Sources*, 547(March), 232013. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232013>
- Gao, X., Chen, J., Xu, R., Zhen, Z., Zeng, X., Chen, X., & Cui, L. (2024). Research Progress and Prospect of The Materials of Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs). *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 711–743. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.005>
- Gobel, M., Godehardt, M., & Schladitz, K. (2017). Multi-Scale Structural Analysis of Gas Diffusion Layers. *Journal of Power Sources*, 355, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.086>
- Guo, H., Chen, L., Ismail, S. A., Jiang, L., Guo, S., Gu, J., Zhang, X., Li, Y., Zhu, Y., Zhang, Z., & Han, D. (2022). Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A Review. *Materials*, 15(24). <https://doi.org/10.3390/ma15248800>
- Hasanah, U., & Muslimin, M. (2020). Pengaruh Tekanan Compression Moulding terhadap Kinerja Pelat Bipolar Komposit Grafit/Resin Epoksi Komposisi 20% Karbon Tempurung Kelapa. *Jurnal Mekanik Terapan*, 1(1), 71–80. <https://doi.org/10.32722/jmt.v1i1.3335>
- Hendricks, F., Chamier, J., & Tanaka, S. (2020). Membrane Electrode Assembly Performance of A Standalone Microporous Layer on A Metallic Gas Diffusion Layer. *Journal of Power Sources*, 464(March), 228222. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228222>
- Hidayat, A. I., Kirom, M. R., Salam, R. A. (2022). Sistem Semi Kontinu Tubular Microbial Fuel Cell Microbial Fuel Cell Tubular Semi Continuous System. *E-Proceeding of Engineering*, 9(3), 898–905.
- Houam., Sabrina., Affoune., Mohamed, A., Atek., Imene., Kesri., Fatima., Guermeche, S., Rania., Chelaghmia., Lyamine, M., Nacef., Mouna., Khelifi., Omar, B., Craig, E. (2023). Determination of The Standard Rate Constant for Soluble-Soluble Quasi -Reversible Electrochemical Systems By Linear Sweep Voltammetry : Application to The Electrochemical Oxidation on Screen-Printed Graphite Electrodes. *Electrochimica Acta*, 449, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142200>

- Jawad, N. H., Yahya, A. A., Al-Shathr, A. R., Salih, H. G., Rashid, K. T., Al-Saadi, S., Abdulrazak, A. A., Salih, I. K., Zrelli, A., & Alsahy, Q. F. (2022). Fuel Cell Types, Properties of Membrane, and Operating Conditions: A Review. *Sustainability*, *14*(21). <https://doi.org/10.3390/su142114653>
- Kim, T., Choi, W., Shin, H. C., Choi, J. Y., Kim, J. M., Park, M. S., & Yoon, W. S. (2020). Applications of Voltammetry in Lithium Ion Battery Research. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, *11*(1), 14–25. <https://doi.org/10.33961/jecst.2019.00619>
- Lai, T., & Qu, Z. (2023). Two Polytetrafluoroethylene Distribution Effects on Liquid Water Dynamic Behavior in Gas Diffusion Layer of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell with A Pore-Scale Method. *Energy*, *271*(December 2022), 126920. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126920>
- Lestariningsih, T., Sabrina Q. dan Majid, N. (2017). Penambahan TiO₂ dalam Pembuatan Lembaran Polimer Elektrolit Berpengaruh Terhadap Konduktivitas dan Kinerja Baterai Lithium. *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, *07*(01): 31-37.
- Li, D., Qi, R., & Zhang, L. Z. (2019). Electrochemical Impedance Spectroscopy Analysis Of V–I Characteristics and A Fast Prediction Model For PEM-Based Electrolytic Air Dehumidification. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(36), 19533–19546. <https://doi.org/10.1016/J.Ijhydene.2019.06.011>
- Li, H., Huang, S., Guan, C., Wang, H., Nakajima, H., Ito, K., & Wang, Y. (2023). Experimental Optimization of The Nafion® Ionomer Content in The Catalyst Layer for Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolysis At High Temperatures. *Frontiers in Energy Research*, *11*(December 2023), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1313451>
- Li, S., Wei, X., Dai, H., Yuan, H., & Ming, P. (2022). Voltammetric and Galvanostatic Methods for Measuring Hydrogen Crossover in Fuel Cell. *IScience*, *25*(1), 103576. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103576>
- Lim, B. H., Majlan, E. H., Tajuddin, A., Husaini, T., Wan Daud, W. R., Mohd Radzuan, N. A., & Haque, M. A. (2021). Comparison of Catalyst-Coated Membranes and Catalyst-Coated Substrate for PEMFC Membrane Electrode Assembly: A Review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *33*, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.07.044>
- Liu, J., & Zio, E. (2019). Prognostics of A Multistack PEMFC System with Multiagent Modeling. *Energy Science and Engineering*, *7*(1), 76–87. <https://doi.org/10.1002/ese3.254>
- Liu, L., Xing, Y., Fu, Z., Li, Y., Li, Z., & Li, H. (2023). An ePTFE-Reinforced Membrane Electrode Assembly Based on A Wet-Contact Interface Design Strategy for High-Performance Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, *575*(April), 233221.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233221>

- Liu, S., Yuan, S., Liang, Y., Li, H., & Xu, Z. (2022). Engineering The Catalyst Layers Towards Enhanced Local Oxygen Transport of Low-Pt Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Materials, Designs, and Methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(11), 4389–4417. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.249>
- Ma'fur, H., & Widiharsa, F. (2016). Fuel Cell Sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif Pengisi Baterai Dengan Pengendali Panas. *Transmisi*, 12(1), 45–54.
- Magar, H. S., Hassan, R. Y. A., & Mulchandani, A. (2021). Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): Principles, Construction, and Biosensing Applications. *Sensors*, 21(19). <https://doi.org/10.3390/s21196578>
- Maheshwari, K., Sharma, S., Sharma, A., & Verma, S. (2018). Fuel Cell and Its Applications: A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 7(06), 6–9. www.ijert.org
- Majlan, E. H., Rohendi, D., Daud, W. R. W., Husaini, T., & Haque, M. A. (2018). Electrode for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89(March), 117–134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.007>
- Mauger, S. A., Pfeilsticker, J. R., Wang, M., Medina, S., Yang-Neyerlin, A. C., Neyerlin, K. C., Stetson, C., Pylypenko, S., & Ulsh, M. (2020). Fabrication Of High-Performance Gas-Diffusion-Electrode Based Membrane-Electrode Assemblies. *Journal of Power Sources*, 450(December 2019), 227581. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227581>
- Mohammed, A., & Abdullah, A. (2018). Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review. *International Conference on Hydraulics and Pneumatics*, 77–85.
- Montella, C., Tezyk, V., Effori, E., Laurencin, J., & Siebert, E. (2021). Linear Sweep and Cyclic Voltammetry of Porous Mixed Conducting Oxygen Electrode: Formal Study of Insertion, Diffusion and Chemical Reaction Model. *Solid State Ionics*, 359(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2020.115485>
- Musse, D., & Lee, D. (2024). Computational Evaluation of PEMFC Performance Based on Bipolar Plate Material Types. *Energy Reports*, 11(May), 4886–4903. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.052>
- Nguyen, H. L., Han, J., Nguyen, X. L., Yu, S., Goo, Y. M., & Le, D. D. (2021). Review of The Durability Of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell in Long-Term Operation: Main Influencing Parameters and Testing Protocols. *Energies*, 14(13), 1-34. <https://doi.org/10.3390/en14134048>
- Niblett, D., Guo, Z., Holmes, S., Niasar, V., & Prosser, R. (2022). Utilization Of 3D Printed Carbon Gas Diffusion Layers in Polymer Electrolyte Membrane

- Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(55), 23393–23410. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.134>
- Ninham, B. W., Battye, M. J., Bolotskova, P. N., Gerasimov, R. Y., Kozlov, V. A., & Bunkin, N. F. (2023). Nafion: New and Old Insights into Structure and Function. *Polymers*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/polym15092214>
- Nurlatifah, I. (2021). Produksi Gas Hidrogen dari Reaksi Elektrolisis Sebagai Bahan Bakar Non-Fosil. *Jurnal Pendidikan dan Aplikasi Industri*, 8(1), 30–36.
- Ojemaye, M. O., & Okoh, A. I. (2021). Global Research Direction on Pt and Pt Based Electro-Catalysts for Fuel Cells Application Between 1990 And 2019: A Bibliometric Analysis. *International Journal of Energy Research*, 45(11), 15783–15796. <https://doi.org/10.1002/er.6907>
- Okonkwo, P. C., Ige, O. O., Barhoumi, E. M., Uzoma, P. C., Emori, W., Benamor, A., & Abdullah, A. M. (2021). Platinum Degradation Mechanisms in Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) System: A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(29), 15850–15865. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.078>
- Olabi, A. G., Wilberforce, T., Alanazi, A., Vichare, P., Sayed, E. T., Maghrabie, H. M., Elsaid, K., & Abdelkareem, M. A. (2022). Novel Trends in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Energy Conversion and Management*, 15(14), 1-27. <https://doi.org/10.3390/en15144949>
- Parekh, A. (2022). Recent Developments of Proton Exchange Membranes For PEMFC : A Review. *Frontiers in Energy Research*, 1(September), 1-13. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.956132>
- Park, J., Oh, H., Ha, T., Il, Y., & Min, K. (2015). A Review of The Gas Diffusion Layer in Proton Exchange Membrane Fuel Cells : Durability And Degradation. *Applied Energy*, 155, 866–880. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.068>
- Pham Hoa, B., Dong Duc, H., Nguyen Van, T., Nguyen Ngoc, A., & Ngoc Vu, Q. (2024). a Review of Pem Fuel Cells Used for Automotive Applications. *Journal of Innovations in Business and Industry*, 2(1), 55–60. <https://doi.org/10.61552/jibi.2024.01.007>
- Qussay, R., Al-Zaidi, M. K., Al-Khafaji, R. Q., Al-Zubaidy, D. K., & Salman, M. M. (2021). A Review: Fuel Cells Types and their Applications. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)*, 7, 2395–3470. www.ijseas.com
- Rahmah, D. R., Rohendi, D., Syarif, N., Rachmat, A., & Febrika, N. (2021). Characterization of Electrode with Cu₂O-ZnO/C and Pt-Ru/C Catalyst for Electrochemical Reduction CO₂ to CH₃OH. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 6(1), 08-13.

<https://doi.org/10.24845/ijfac.v6.i1.08>

- Rao, H. S., Nagaraja, P., Sharma, S., Rao, G. R., & Justin, P. (2023). Materials Today Sustainability Enhancing The Methanol Electro-Oxidation Efficiency of Pt / C : Influence of MoO₃ Crystal Planes. *Materials Today Sustainability*, 24(September), 100570. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100570>
- Ren, X., Lv, Q., Liu, L., Liu, B., Wang, Y., Liu, A., & Wu, G. (2019). Current Progress of Pt and Pt-Based Electrocatalysts Used for Fuel Cells. *Sustainable Energy and Fuels*, 4(1), 15–30. <https://doi.org/10.1039/c9se00460b>
- Rohendi, D., Febrika, N., Majlan, E. H., Syarif, N., Rachmat, A., & Yulianti, D. H. (2023). The Electrochemical Conversion of CO₂ into Methanol with KHCO₃ Electrolyte Using Membrane Electrode Assembly (MEA). *Science and Technology Indonesia*, 8(4), 632-639.
- Rohendi, D., Majlan, E. H., Mohamad, A. B., Shyuan, L. K., & Raharjo, J. (2016). Comparison of The Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Electrodes with Different Carbon Powder Content and Methods of Manufacture. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 1(3), 61–66. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v1.i3.61>
- 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>
- Safitri, I. A., Rudiyanto, B., & Nursalim, A. (2016). Uji Kinerja Smart Grid Fuel Cell Tipe Proton Exchange Membrane (PEM) dengan Penambahan Hidrogen. *Jurnal Ilmiah Inovasi*, 16(1), 1411-5549. <https://doi.org/10.25047/jii.v16i1.2>
- Sajna, M. S., Zavahir, S., Popelka, A., Kasak, P., Al-Sharshani, A., Onwusogh, U., Wang, M., Park, H., & Han, D. S. (2023). Electrochemical System Design for CO₂ Conversion: A Comprehensive Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110467. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110467>
- Sapkota, P., Boyer, C., Dutta, R., Cazorla, C., & Aguey-Zinsou, K. F. (2020). Planar Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Powering Portable Devices from Hydrogen. *Sustainable Energy and Fuels*, 4(2), 439–468. <https://doi.org/10.1039/c9se00861f>
- Septiano, A. F., & Setyaningsih, N. E. (2021). Analisis Citra Hasil Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray (SEM EDX) Komposit Resin Timbal dengan Metode Contrast to Noise Ratio (CNR). *Indonesian Journal of Mathematics and Natural Sciences*, 44(2), 81–85. <http://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/JM>

- Sgarbi, R., Ait Idir, W., Labarde, Q., Mermoux, M., Wu, P., Mainka, J., Dillet, J., Marty, C., Micoud, F., Lottin, O., & Chatenet, M. (2023). Does The Platinum-Loading in Proton-Exchange Membrane Fuel Cell Cathodes Influence The Durability of The Membrane-Electrode Assembly. *Industrial Chemistry & Materials*, *1*(4), 501–515. <https://doi.org/10.1039/d3im00059a>
- Sim, J., Kang, M., Oh, H., Lee, E., Jyoung, J., & Min, K. (2022). The Effect of Gas Diffusion Layer on Electrochemical Effective Reaction Area of Catalyst Layer and Water Discharge Capability. *Renewable Energy*, *197*(April), 932–942. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.096>
- Siracusano, S., Trocino, S., Briguglio, N., Baglio, V., & Aric, A. S. (2018). Electrochemical Impedance Spectroscopy as a Membrane Electrolysis. *Materials*, *11*, 1368. <https://doi.org/10.3390/ma11081368>
- Song, S., He, H., Chai, S., & Li, H. (2024). Advanced Nafion/Nanofiller Composite Proton Exchange Membranes for Fuel Cell Applications. *Polymer*, *307*(June), 127241. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127241>
- Sucipta, M., Sibarani, J., Gunawan, I. G. N. W., Putra, S. G. B., Robert, R. A., Kandou, S., & Sudarsana, P. B. (2023). Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Membrane Electrode Assembly Based on Platinum-Carbon Electrocatalyst with Activated Carbon-Chitosan-Nickel. *International Journal of Renewable Energy Research*, *13*(1), 354–358. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i1.13554.g8688>
- Syarif, N., Rohendi, D., Nanda, A. D., Sandi, M. T., Sukma, D., & Br, W. (2022). Gas Diffusion Layer From Binchotan Carbon And Its Electrochemical Properties For Supporting Electrocatalyst In Fuel Cell. *Energy*, *10*(March), 292–305. <https://doi.org/10.3934/energy.2022016>
- Tampubolon, F. R. S., Yuwono, A. S., Tambunan, A. H., & Achsani, N. A. (2021). Penggunaan Bahan Bakar Alternatif dalam Pengelolaan Tambang Batubara sebagai Sumber Energi yang Ramah terhadap Lingkungan. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, *19*(1), 89–97. <https://doi.org/10.14710/jil.19.1.89-97>
- Tellez-Cruz, M. M., Escorihuela, J., Solorza-Feria, O., & Compañ, V. (2021). Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs): Advances And Challenges. *Polymers*, *13*(18), 1–54. <https://doi.org/10.3390/polym13183064>
- Vinodh, R., Palanivel, T., Kalanur, S. S., & Pollet, B. G. (2024). Energy Advances Recent Advancements in Catalyst Coated Membranes for Water Electrolysis : A Critical Review. *Royal Society of Chemistry*, *3*(May), 1144–1166. <https://doi.org/10.1039/d4ya00143e>
- Wafiroh, S., Suyanto, S., & Yuliana, Y. (2016). Pembuatan dan Karakterisasi Membran Komposit Kitosan-Sodium Alginat Terfosforilasi Sebagai Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). *Jurnal Kimia Riset*, *1*(1), 14. <https://doi.org/10.20473/jkr.v1i1.2436>

- Wallnofer-Ogris, E., Grimmer, I., Ranz, M., Höglinger, M., Kartusch, S., Rauh, J., Macherhammer, M. G., Grabner, B., & Trattner, A. (2024). A Review on Understanding and Identifying Degradation Mechanisms in PEM Water Electrolysis Cells: Insights For Stack Application, Development, and Research. *International Journal of Hydrogen Energy*, 65(March), 381–397. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.017>
- Wang, L., Yin, L., Yang, W., Cheng, Y., Wen, F., Liu, C., Dong, L., & Wang, M. (2020). 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, Y., Xu, X., Dong, G., Zhang, M., Jiao, K., & Leung, D. Y. C. (2024). Flexible Fuel Cells: A Prospective Review. *Energy Reviews*, 3(4), 100099. <https://doi.org/10.1016/j.enrev.2024.100099>
- Wang, Z. D., Xia, T., Li, Z. H., & Shao, M. F. (2024). A Review Of Carbon-Based Catalysts and Catalyst Supports for Simultaneous Organic Electro-Oxidation and Hydrogen Evolution Reactions. *Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Materials*, 39(1), 64–77. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(24\)60829-2](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(24)60829-2)
- Wang, Z., & Nagao, Y. (2014). Effects Of Nafion Impregnation Using Inkjet Printing for Membrane Electrode Assemblies in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Electrochimica Acta*, 129, 343–347. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.02.133>
- Weng, L. C., Bell, A. T., & Weber, A. Z. (2019). Towards membrane-electrode assembly systems for CO₂ reduction: A modeling study. *Energy and Environmental Science*, 12(6), 1950–1968. <https://doi.org/10.1039/c9ee00909d>
- Winkler, W., & Williams, M.C. (2018). Basics for Fuel Cell Performance Loss Evaluation. *ECS Transactions*, 83(1), 53–69. <https://doi.org/10.1149/08301.0053ecst>
- Xie, N., Wei, W., Ba, J., & Yang, T. (2024). Operation Parameters Study on The Performance of PEMFC Based Orthogonal Test Method. *Journal Pre-proof*, 101177. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105035>
- Xu, J. H., Zhang, B. X., Zhu, K. Q., Zheng, X. Y., Zhang, C. L., Chen, Z. L., Yang, Y. R., Huang, T. M., Bo, Z., Wan, Z. M., Hsu, S. H., Yan, W. M., & Wang, X. D. (2024). Fault Diagnosis of PEMFC Based on Fatal and Recoverable Failures Using Multi-Scale Convolutional Neural Networks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 80(July), 916–925. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.190>
- Yang, Z., Zhu, W., Zhang, Q., Pan, Y., & Cao, Z. (2024). PEMFC Sealing Modeling Relating to Fractal Characteristics of Gasket-BPP Interface Based on Micro-

- Contact. *International Journal of Hydrogen Energy*, 63(March), 803–814. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.142>
- Yuan, X. Z., Song, C., Wang, H., & Zhang, J. (2023). *Electrochemical Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells*. London: Springer.
- Yulianti, D. H., Rohendi, D., Syarif, N., & Rachmat, A. (2019). Performance Test of Membrane Electrode Assembly in DAFC using Mixed Methanol and Ethanol Fuel with Various Volume Comparison. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 4(3), 139–142. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v4.i3.139>
- Zarandi, R. F., Rezaei, B., Ghaziaskar, H. S., & Ensafi, A. A. (2019). Electrochemical Conversion of CO₂ to Methanol Using A Glassy Carbon Electrode, Modified By Pt@Histamine-Reduced Graphene Oxide. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(59), 30820–30831. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.237>
- Zhang, J. (2024). Energy Access Challenge and The Role of Fossil Fuels in Meeting Electricity Demand: Promoting Renewable Energy Capacity for Sustainable Development. *Geoscience Frontiers*, 15(5), 101873. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101873>
- Zhang, W., Su, H., & Xu, L. (2019). Improving Cell Performance and Alleviating Performance Degradation By Constructing A Novel Structure of Membrane Electrode Assembly of DMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (2019), 32231-32239. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.113>
- Zhang, Y., Li, J., Peng, Q., Yang, P., Fu, Q., Zhu, X., Liao, Q. (2022). Toward An Objective Performance Evaluation of Commercial Pt/C Electrocatalysts for oxygen reduction: Effect of catalyst loading. *Electrochimica Acta*, 429. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.140953>
- 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/zkac0967>
- Zheng, M., Liang, H., Bu, W., Qu, C., Hu, X., & Zhang, Z. (2024). Porosity And Permeability Optimization of PEMFC Cathode Gas Diffusion Layer Based on Topology Algorithm. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(11), 100803. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100803>
- Zhou, M., Feistner, J. C., Li, N., Araya, S. S., Cinti, G., & Liso, V. (2024). Experimental and Numerical Investigations of High-Temperature PEM Fuel Cells Under Different Anode Dilution Levels and Varying Temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 55(November 2023), 1383–1392. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.201>

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>