

**PENGARUH LAJU ALIR GAS HIDROGEN TERHADAP KINERJA DAN
DAYA TAHAN MEA DENGAN KATALIS Pt/C PADA PEMFC**

SKRIPSI

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



**Oleh:
DERA OKTA FIRANDA
08031282126030**

**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

**PENGARUH LAJU ALIR GAS HIDROGEN TERHADAP KINERJA DAN
DAYA TAHAN MEA DENGAN KATALIS Pt/C PADA PEMFC**

SKRIPSI

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

Diusulkan oleh :

DERA OKTA FIRANDA

08031282126030

Indralaya, 09 Januari 2025

**Mengetahui,
Dosen Pembimbing**



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

NIP. 196704191993031001

Dekan FMIPA



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

NIP. 197111191997021001

HALAMAN PERSETUJUAN


Karya tulis ilmiah berupa skripsi Dera Okta Firanda (08031282126030) dengan judul “Pengaruh Laju Alir Gas Hidrogen Terhadap Kinerja dan Daya Tahan MEA dengan Katalis Pt/C pada PEMFC” telah disidangkan dihadapan Tim Penguji Seminar Hasil Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada Tanggal 08 Januari 2025 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, 09 Januari 2025

Ketua:

1. **Dr. Zainal Fanani, M. Si**

NIP. 196708211995121001

()

Pembimbing:

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

NIP. 196704191993031001

()

Penguji:


1. **Dr. Zainal Fanani, M. Si**

NIP. 196708211995121001

()

2. **Bijak Riyandi Ahadito, S.Si., M.Eng.**

NIP. 199401162022031009

()

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 : Dera Okta Firanda

NIM : 08031282126030

Fakultas/Jurusan : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam/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 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.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Indralaya, 09 Januari 2025

Yang menyatakan,



Dera Okta Firanda

NIM. 08031282126030

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

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

Nama Mahasiswa : Dera Okta Firanda
NIM : 08031282126030
Fakultas/Jurusan : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam/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 saya yang berjudul “Pengaruh Laju Alir Gas Hidrogen Terhadap Kinerja dan Daya Tahan MEA dengan Katalis Pt/C pada PEMFC”. Dengan hak bebas royalti non eksklusif ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, 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, 09 Januari 2025

Yang menyatakan,



Dera Okta Firanda

NIM. 08031282126030

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan Menyebut Nama Allah Yang Maha Pengasih Lagi Maha Penyayang
Segala Puji Bagi Allah, Tuhan Semesta Alam

“Hai orang-orang beriman, mintalah pertolongan kepada Allah dengan sabar dan salat. Sesungguhnya Allah bersama orang-orang yang sabar.”
(Q.S 2: 153)

“Maha Suci Allah. Aku memuji-Nya sebanyak makhluk-Nya, sejauh kerelaan-Nya, seberat timbangan 'Arsy-Nya, dan sebanyak tinta tulisan kalimat-Nya”
(HR. Muslim, no 2726)

“Jadilah mata air yang jernih yang memberikan kehidupan kepada sekitarmu”
(B.J Habibie)

“Tidak ada kesuksesan tanpa kerja keras. Tidak ada keberhasilan tanpa kebersamaan. Tidak ada kemudahan tanpa doa.”
(Ridwan Kamil)

“Dan Dia (Allah) bersama kamu dimana saja kamu berada”
(Q.S Al-Hadid:4)

Skripsi ini dipersembahkan sebagai ungkapan syukur kepada Allah SWT dan Nabi Muhammad SAW serta kupersembahkan untuk orang tua-ku, pembimbingku, sahabatku, dan almamaterku.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT. yang senantiasa memberikan rahmat, karunia, dan petunjuk sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Pengaruh Laju Alir Gas Hidrogen Terhadap Kinerja dan Daya Tahan MEA dengan Katalis Pt/C pada PEMFC”. Tidak lupa, sholawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada junjungan kita, Nabi Muhammad SAW yang telah membawa umat manusia dari zaman kegelapan menuju cahaya kebenaran. Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Kimia.

Penyusunan skripsi ini merupakan proses yang penuh tantangan dan pembelajaran yang tidak mungkin dapat terlaksana tanpa bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak. Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada **Bapak Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D.** yang telah membimbing penulis dengan sabar, teliti, dan penuh perhatian dalam setiap proses penyusunan skripsi ini. Arahan, saran, dan koreksi yang diberikan menjadi bekal berharga bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Komitmen dan dedikasi yang Bapak berikan memberikan inspirasi dan semangat bagi penulis untuk terus berusaha dan menyelesaikan penelitian ini dengan baik.

Penyelesaian skripsi ini juga tidak lepas dari dukungan, bimbingan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan tulus hati, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya
2. Ibu Prof. Muharni, M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya
3. Bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si. selaku Sekretaris Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya
4. Bapak Dr. Zainal Fanani, M.Si. dan Bapak Bijak Ahadito, S.Si, M.Eng. selaku dosen pembahas seminar hasil dan penguji sidang sarjana yang telah memberikan saran, masukan, dan arahan untuk perbaikan pada skripsi ini.

5. Seluruh dosen Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya Jurusan Kimia yang telah memberikan ilmu, motivasi, dan inspirasi selama masa perkuliahan.
6. Mba Novi dan Kak Cossiin selaku Admin Kimia yang telah membantu penulis dalam proses administrasi selama perkuliahan.
7. Kak Dwi Hawa Yulianti selaku mentor penulis yang telah memberikan ilmu, saran, dan masukan serta bantuan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini.
8. Kak Reka, Kak Yollan, dan Kak Hawa yang turut membantu penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir. Terima kasih banyak kakak-kakak, semoga sukses selalu.
9. Orang tua tercinta yaitu Papa dan Mama yang telah memberikan doa, kasih sayang, dan dukungan yang tiada henti kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini. Love you papa dan mama tersayang.
10. Saudara/i yaitu kakak tercinta Dinda Ayu Paroza dan Adik tersayang Al Paris Arasy serta keluarga besar penulis yang telah memberikan dukungan sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini.
11. Mia dan Ara yang telah menjadi sahabat penulis dari awal perkuliahan sampai sekarang dan selalu mendengarkan penulis untuk bercerita, serta ade, iki, via, dan cindi yang telah memberikan dukungan dan banyak membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
12. Rahma selaku sahabat penulis dari masa MAN hingga sekarang yang telah memberikan semangat dan selalu mendukung penulis.
13. Tim PUR Fuel Cell dan Hidrogen 2021 (Vina, Biga, Diana, Riyanti, Cia, Agens, dan Raihan) yang telah bekerjasama, mendukung, dan membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
14. Teman-teman angkatan 2021 yang telah membersamai penulis dari awal perkuliahan hingga sekarang. Terima kasih untuk kerjasamanya selama di perkuliahan, semoga kita sukses selalu.
15. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung kepada penulis dalam proses penyusunan skripsi ini.

Semoga segala kebaikan, bantuan, dan doa yang telah diberikan oleh semua pihak dibalas dengan limpahan berkah dan rahmat dari Allah SWT. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, penulis berharap agar skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang membutuhkan, serta menjadi kontribusi kecil dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Indralaya, 09 Januari 2025

Penulis,



Dera Okta Firanda

SUMMARY

EFFECT OF HYDROGEN GAS FLOW RATE ON THE PERFORMANCE AND DURABILITY OF MEA WITH Pt/C CATALYST IN PEMFC

Dera Okta Firanda, supervised by Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D

Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Sriwijaya
University

72 pages, 11 figures, 2 tables, 12 appendices

Membrane electrode assembly (MEA) is a crucial component in a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) and serves as the electrochemical core of the system. One of the factors that significantly influences the performance of the MEA is the hydrogen flow rate as the fuel source. This study evaluates the performance and durability of the MEA with Pt/C catalyst in a PEMFC under varying hydrogen flow rates. The MEA used in this study measures 6.5 cm x 30 cm with a catalyst loading of 2 mg/cm². The hydrogen flow rates investigated are 100, 200, 300, and 400 mL/min. MEA performance was analyzed through polarization curves (D_I -V curves) and D_I - D_P curves (power density vs. current density). The optimal performance was achieved at a hydrogen flow rate of 200 mL/min, yielding a power density of 3.563 mW/cm² and a current density of 10.256 mA/cm². Meanwhile, MEA durability was assessed at the optimal hydrogen flow rate of 200 mL/min under a 2 A load for 12 hours. Voltage degradation was not significant during the first 60 minutes, but a sharp voltage drop of 24.35% was observed after 600 minutes. MEA characterization was performed using cyclic voltammetry (CV), electrochemical impedance spectroscopy (EIS), and linear sweep voltammetry (LSV) methods. The calculated results revealed an electrochemically active surface area (ECSA) 1.477×10^{-5} , an electrical conductivity of 3.218×10^{-4} S/cm and an electric charge of 4.2×10^{-6} C.

Keywords : Pt/C catalyst, MEA, hydrogen flow rate, durability, PEMFC

Citations : 78 (2008-2024)

RINGKASAN

PENGARUH LAJU ALIR GAS HIDROGEN TERHADAP KINERJA DAN DAYA TAHAN MEA DENGAN KATALIS Pt/C PADA PEMFC

Dera Okta Firanda, dibimbing oleh Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas
Sriwijaya

72 halaman, 11 gambar, 2 tabel, 12 lampiran

Membrane electrode assembly (MEA) merupakan komponen sangat penting pada *proton exchange membrane fuel cell* (PEMFC) dan berfungsi sebagai pusat elektrokimia pada PEMFC. Salah satu faktor yang dapat menentukan kinerja MEA adalah laju alir hidrogen sebagai bahan bakar. Penelitian ini dilakukan pengukuran kinerja dan daya tahan MEA dengan katalis Pt/C pada PEMFC dengan laju alir gas hidrogen bervariasi. MEA yang digunakan sebesar 6,5 cm x 30 cm dengan *loading* katalis sebesar 2 mg/cm². Variasi laju alir gas hidrogen yang digunakan adalah 100, 200, 300, dan 400 mL/menit. Kinerja MEA dapat dilihat melalui kurva polarisasi (kurva D_I -V) dan kurva D_I - D_P (densitas daya pada densitas arus bervariasi). Kinerja optimum didapatkan pada variasi laju alir gas hidrogen 200 mL/menit dengan densitas daya sebesar 3,563 mW/cm² dan densitas arus sebesar 10,256 mA/cm². Sementara itu, daya tahan MEA diukur berdasarkan laju alir gas hidrogen optimum yang didapatkan sebesar 200 mL/menit dengan beban 2 A selama 12 jam. Tegangan tidak mengalami penurunan yang cukup drastis pada 60 menit pertama dan penurunan tegangan cukup drastis terjadi setelah 600 menit sebesar 24,35%. Karakterisasi MEA dilakukan dengan metode *cyclic voltammetry* (CV), *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS) dan *linear sweep voltammetry* (LSV). Hasil perhitungan diperoleh nilai luas permukaan aktif elektrokimia (ECSA) sebesar $1,477 \times 10^{-5}$ m²/g, nilai konduktivitas elektrik sebesar $3,218 \times 10^{-4}$ S/cm dan nilai muatan listrik sebesar $4,2 \times 10^{-6}$ C.

Kata kunci : Katalis Pt/C, MEA, laju alir hidrogen, daya tahan, PEMFC.

Sitasi : 78 (2008-2024)

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN	i
HALAMAN PERSETUJUAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iii
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
SUMMARY	ix
RINGKASAN	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Hidrogen.....	5
2.2 <i>Fuel Cell</i>	5
2.3 <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)</i>	6
2.3.1 Pelat Bipolar.....	8
2.3.2 Gasket.....	9
2.3.3 <i>Membrane Electrode Assembly (MEA)</i>	9
2.4 Katalis Pt/C	12
2.5 Pengujian <i>Membrane Electrode Assembly (MEA)</i>	13
2.5.1 Laju Alir Hidrogen.....	13
2.5.2 D_I -V dan D_I - D_P	14
2.5.3 Daya Tahan PEMFC	15

2.6	Karakterisasi MEA.....	16
2.6.1	<i>Cyclic voltammetry (CV)</i>	16
2.6.2	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i>	16
2.6.3	<i>Linear Sweep Voltammetry (LSV)</i>	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		19
3.1	Waktu dan Tempat	19
3.2	Alat dan Bahan.....	19
3.2.1	Alat.....	19
3.2.2	Bahan.....	19
3.3	Prosedur Penelitian.....	19
3.3.1	Pembuatan GDL.....	19
3.3.2	Pembuatan Elektrode	20
3.3.3	Pembuatan MEA	20
3.3.4	Pengujian Kinerja MEA dengan Katalis Pt/C pada PEMFC	21
3.3.4.1	Pengukuran <i>Open Circuit Voltage (OCV)</i>	21
3.3.4.2	Pengukuran Kinerja Pengaruh Variasi Laju Alir Gas Hidrogen	21
3.3.4.3	Pengukuran Daya Tahan MEA.....	21
3.3.5	Karakterisasi MEA.....	22
3.4	Analisis Data	23
3.4.1	Analisis Data Pengaruh Variasi Laju Alir Hidrogen.....	23
3.4.2	Analisis Daya Tahan MEA	24
3.4.3	Analisis CV	25
3.4.4	Analisis EIS.....	25
3.4.5	Analisis LSV	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		29
4.1	Pembuatan <i>Gas Diffusion Layer (GDL)</i>	29
4.2	Pembuatan Elektrode	28
4.3	Pembuatan MEA	30
4.4	Uji Kinerja MEA dengan Variasi Laju Alir Hidrogen.....	31
4.5	Uji Daya Tahan MEA	35
4.6	Karakterisasi MEA.....	37
4.6.1	<i>Cyclic voltammetry (CV)</i>	37

4.6.2	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i>	38
4.6.3	<i>Linear Sweep Voltammetry (LSV)</i>	39
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		41
5.1	Kesimpulan	41
5.2	Saran.....	41
DAFTAR PUSTAKA		42
LAMPIRAN		50

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 (a) Komponen PEMFC; (b) Kondisi Operasi PEMFC (Madhav <i>et al.</i> , 2024).....	7
Gambar 2.2 Kurva D_I -V dan D_I - D_P pada <i>Fuel Cell</i> (Matsumura, 2023).....	14
Gambar 4.1 (a) Morfologi GDL; (b) Interpretasi dengan <i>Software ImageJ</i>	28
Gambar 4.2 Elektrode Tiga Lapisan dengan Katalis Pt/C (a) Lapisan Katalis Pt/C Pertama; (b) Lapisan Katalis Pt/C Kedua; (c) Elektrode Tiga Lapisan	29
Gambar 4.3 MEA ukuran 6,5 cm x 30 cm	31
Gambar 4.4 Kurva OCV Variasi Laju Alir Hidrogen	32
Gambar 4.5 Kurva D_I -V Variasi Laju Alir Hidrogen dengan Katalis Pt/C dalam PEMFC	33
Gambar 4.6 Kurva D_I - D_P Variasi Laju Alir Hidrogen dengan Katalis Pt/C dalam PEMFC	34
Gambar 4.7 Pengaruh Waktu Terhadap Tegangan Pada Uji Daya Tahan MEA dengan Katalis Pt/C dalam PEMFC	35
Gambar 4.8 Penurunan Daya Tahan MEA dalam PEMFC dengan katalis Pt/C.	36
Gambar 4.9 Kurva Voltammogram CV Pada MEA dengan Katalis Pt/C.....	37
Gambar 4.10 Kurva Nyquist dan Sirkuit MEA dengan Katalis Pt/C.....	38
Gambar 4.11 Kurva Voltammogram LSV Pada MEA dengan Katalis Pt/C.....	39

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 <i>Template</i> Data Pengukuran Laju Alir Hidrogen.....	23
Tabel 3.2 <i>Template</i> Data Pengukuran Daya Tahan MEA	24

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Pembuatan <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)	51
Lampiran 2. Pembuatan Elektrode Katalis Pt/C.....	52
Lampiran 3. Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	54
Lampiran 4. Perhitungan Pembuatan GDL	55
Lampiran 5. Perhitungan Pembuatan Elektrode.....	56
Lampiran 6. Kurva, Tabel dan Perhitungan Hasil Karakterisasi <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	57
Lampiran 7. Kurva, Tabel dan Perhitungan Hasil Karakterisasi <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS).....	59
Lampiran 8. Kurva, Tabel dan Perhitungan Hasil Karakterisasi <i>Linear Sweep Voltammetry</i> (LSV)	60
Lampiran 9. Data Hasil Variasi Laju Alir Hidrogen	61
Lampiran 10. Data Hasil Uji Daya Tahan MEA	69
Lampiran 11. Persentase Penurunan Daya Tahan MEA	70
Lampiran 12. Gambar Alat dan Bahan Penelitian.....	71

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi digunakan dalam berbagai aktivitas, seperti transportasi, penerangan, pemanasan, pendinginan, proses industri, dan penyediaan listrik (Rosen, 2021). Sebagian besar energi berasal dari bahan bakar fosil yang termasuk sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui (Martins *et al.*, 2019). Penggunaan bahan bakar fosil telah menyebabkan masalah lingkungan, seperti pemanasan global dan perubahan iklim. Emisi gas rumah kaca dari pembangkit listrik meningkat secara signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Energi yang berkelanjutan diperlukan untuk menggantikan sumber pembangkit listrik konvensional berbasis bahan bakar fosil. Oleh karena itu, energi terbarukan seperti energi matahari, angin, hidro, biomassa, panas bumi, dan hidrogen diperlukan untuk menghasilkan listrik dan mengatasi permasalahan lingkungan yang sedang dihadapi (Ang *et al.*, 2022). Hidrogen termasuk salah satu sumber energi baru yang ramah lingkungan karena hanya menghasilkan air sehingga tidak menyebabkan polusi (Yue *et al.*, 2021). Hidrogen dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam konversi *fuel cell* menghasilkan listrik (Jamal *et al.*, 2023).

Fuel cell merupakan perangkat elektrokimia yang mengubah energi kimia dari bahan bakar dan oksigen menjadi energi listrik secara langsung (Al-Zaidi *et al.*, 2021). Salah satu jenis *fuel cell* berupa *proton exchange membrane fuel cell* (PEMFC). PEMFC beroperasi pada suhu di bawah 100°C memiliki efisiensi konversi energi lebih dari 50%. Operasi pada suhu rendah memungkinkan untuk memulai proses dengan cepat sehingga membuat teknologi ini sesuai untuk aplikasi transportasi. Selanjutnya, dalam PEMFC terdapat elektrolit yang berperan penting dalam proses konversi energi. Elektrolit yang biasa digunakan berupa membran polimer *perfluorinated* yang dapat menghantarkan ion hidrogen (proton) (Dewantoro dan Roihatin, 2019). PEMFC mampu beroperasi dalam kondisi kelembapan relatif kering atau rendah dan bahan bakar yang digunakan ramah lingkungan (hidrogen) dibandingkan dengan jenis *fuel cell* lain (Wei *et al.*, 2024). Keuntungan PEMFC antara lain kepadatan daya yang tinggi, efisiensi tinggi, suhu pengoperasian rendah, tidak menghasilkan emisi, struktur yang kokoh, dan ramah

lingkungan. Keuntungan lainnya termasuk *start-up* yang cepat dan pengoperasian yang senyap (Tawalbeh *et al.*, 2022).

Kunci utama untuk meningkatkan performa PEMFC adanya bagian *membrane electrode assembly* (MEA) (Wicaksono dkk, 2021). MEA merupakan komponen inti dari *fuel cell* yang membantu menghasilkan reaksi elektrokimia yang diperlukan untuk memisahkan elektron (Zhang & Shen, 2020). MEA berfungsi sebagai pemisah antara anode dan katode di mana masing-masing merupakan tempat penyuplai aliran hidrogen dan oksigen. Fungsi lainnya sebagai penyalur proton atau muatan positif dari hidrogen ke katode hingga akhirnya menyatu dengan muatan negatif dan oksigen yang menghasilkan produk air (Sucipta *et al.*, 2023). Komponen MEA yang dianggap sebagai bagian paling penting dari PEMFC di antaranya *proton exchange membrane* (PEM), *gas diffusion layer* (GDL) dan *catalyst layer* (CL) (Cao *et al.*, 2023).

PEM merupakan kunci dari PEMFC karena harus memastikan hanya proton yang lewat sekaligus mencegah konduksi elektron langsung dan permeasi gas antara anode dan katode (Madhav *et al.*, 2024). GDL berperan dalam memfasilitasi transportasi gas, membantu pengelolaan air dan memberikan dukungan untuk PEM (Wu *et al.*, 2023). Lapisan katalis terbentuk dari struktur berpori yang terdiri dari nanopartikel platinum yang didukung oleh nanomaterial karbon, serta lapisan ionomer tipis yang melapisi nanopartikel platinum dan karbon (Wicaksono dkk, 2021). Katalis berbasis Pt sering digunakan dalam penelitian karena penggunaan katalis Pt diperlukan untuk meningkatkan reaksi elektrokimia (Cao *et al.*, 2023). Kinerja MEA dapat dipengaruhi oleh kandungan katalis dan metode pembuatan elektrode. Elektrode terdiri dari tiga lapisan, di antaranya *backing layer* (BL), *gas diffusion layer* (GDL) dan *catalyst layer* (CL) (Majlan *et al.*, 2018).

GDL terdiri dari dua lapisan yaitu MPL yang terdiri dari serbuk karbon dan agen hidrofilik/hidrofobik serta BL yang terdiri dari kertas karbon. GDL merupakan campuran dari karbon, propanol, air dan politetrafluoroetilena (PTFE) yang menghubungkan pelat bipolar dan CL. Bahan berbasis karbon digunakan sebagai bahan BL karena sifat ketahanan terhadap asam, peningkatan permeabilitas gas, konduktivitas listrik yang baik, karakteristik elastis di bawah kompresi, dan kemampuannya untuk mempertahankan porositas. Bahan pengisi MPL yaitu serbuk

karbon. Selain serbuk karbon, MPL juga terdiri dari PTFE yang berada di antara BL dan CL. MPL bertujuan untuk mengurangi resistansi arus, mengatur tingkat hidrofobisitas, mengontrol aliran air, serta mencegah CL merembes ke dalam BL. PTFE berperan dalam memfasilitasi transportasi gas dan air selama operasi *fuel cell* menuju CL (Majlan *et al.*, 2018).

Salah satu faktor penting yang dapat menentukan kinerja elektrokimia MEA adalah *loading*/pemuatan katalis. Umumnya, semakin tinggi *loading* katalis, maka kinerja MEA semakin bagus. Akan tetapi, faktor lain yang perlu diperhatikan juga adalah penempatan katalis pada lapisan katalis. Penelitian Sgarbi (2023) yang menggunakan katalis Pt dengan *loading* katalis Pt/C 0,05, 0,1, 0,2 dan 0,3 mg/cm² menunjukkan bahwa kinerja terendah dihasilkan pada *loading* katalis Pt/C 0,05 mg/cm² dan kinerja tertinggi dihasilkan pada *loading* katalis 0,3 mg/cm². Penelitian Agustiana (2024) menggunakan variasi *loading* katalis Pt/C yang cukup besar (1 s.d. 5 mg/cm²), akan tetapi menggunakan MEA ukuran kecil (2,5 x 2,5 cm²). Hasil penelitian menunjukkan bahwa *loading* katalis 2 mg/cm² merupakan *loading* katalis terbaik. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan katalis dengan *loading* 2 mg/cm² untuk melihat pengaruh *loading* katalis besar terhadap kinerja dan daya tahan MEA untuk proyeksi penggunaan pada *back up power* untuk BTS yang menggunakan PEMFC dengan ukuran MEA 6,5 x 30 cm².

Selain *loading* katalis kinerja MEA juga dapat dipengaruhi oleh laju alir gas hidrogen (Syampurwadi *et al.*, 2017). Kinerja *fuel cell* dapat dipengaruhi dengan menambah atau mengurangi laju alir gas hidrogen. Laju alir gas hidrogen bervariasi tergantung karakteristik MEA dan pelat bipolarnya. Beberapa penelitian menunjukkan kinerja PEMFC pada laju alir hidrogen bervariasi (Rohendi *et al.*, 2024), (Jose *et al.*, 2024).

Berdasarkan latar belakang di atas, penelitian ini mencoba melihat pengaruh laju alir gas hidrogen dengan variasi 100, 200, 300 dan 400 mL/menit terhadap kinerja MEA untuk proyeksi penggunaan pada BTS. Sementara itu, karakterisasi MEA dilakukan dengan menggunakan metode CV, EIS dan LSV. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi terkait hasil pengujian MEA tiga lapisan dengan katalis Pt/C pada PEMFC berdasarkan variasi laju alir hidrogen secara optimal dan pengujian daya tahan MEA pada beban tertentu.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana laju alir gas hidrogen optimum pada kinerja MEA tiga lapisan dengan katalis Pt/C dalam PEMFC?
2. Bagaimana penurunan persentase daya tahan MEA tiga lapisan dengan katalis Pt/C selama operasi PEMFC?
3. Bagaimana hasil karakterisasi MEA tiga lapisan dengan katalis Pt/C menggunakan metode CV, EIS dan LSV?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menentukan laju alir gas hidrogen optimum pada kinerja MEA tiga lapisan dengan katalis Pt/C dalam PEMFC.
2. Menentukan penurunan persentase daya tahan MEA tiga lapisan dengan katalis Pt/C selama operasi PEMFC.
3. Menentukan hasil karakterisasi MEA tiga lapisan dengan katalis Pt/C menggunakan metode CV, EIS dan LSV.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi terkait hasil pengujian MEA tiga lapisan dengan katalis Pt/C pada PEMFC berdasarkan variasi laju alir hidrogen secara optimal dan pengujian daya tahan MEA pada beban tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- Aba, M. M., Sauer, I. L., & Amado, N. B. (2024). Comparative Review of Hydrogen and Electricity As Energy Carriers For The Energy Transition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 57(March 2023), 660–678. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.034>
- Agustin, Q. & Setiarso, P. (2024). Cyclic Voltammetry Method for Analysis of Phosphate Concentration in Water. *Jurnal Pijar Mipa*, 19(1), 145–149. <https://doi.org/10.29303/jpm.v19i1.6090>
- 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. & Yakubu, S.O. (2019). Development of Sump Gasket Sheet from Groundnut Shell Composite. *International Journal of Mechanical Engineering*, 6(9), 11–21. <https://doi.org/10.14445/23488360/ijme-v6i9p103>
- 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
- Ang, T. Z., Salem, M., Kamarol, M., Das, H. S., Nazari, M. A., & Prabakaran, N. (2022). A Comprehensive Study of Renewable Energy Sources: Classifications, Challenges and Suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43(November 2021), 100939. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>
- Athanasaki, G., Jayakumar, A., & Kannan, A. M. (2023). Gas Diffusion Layers For PEM Fuel Cells: Materials, Properties and Manufacturing – A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(6), 2294–2313. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.058>
- Bhuvanendran, N., Ravichandran, S., Xu, Q., Maiyalagan, T., & Su, H. (2021). A Quick Guide for the Assessment of Key Electrochemical Performance Indicators for the Oxygen Reduction Reaction: A Comprehensive Review. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 47(11), 7113–7138. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.072>
- Bilen, K., Tarhan, B. C., & Çelik, S. (2023). Numerical Investigation of The Effect of Operating Conditions on The Performance Parameters of PEM Fuel Cells. *International Journal of Energy Studies*, 8(3), 491–512. <https://doi.org/10.58559/ijes.1264797>
- Cao, F., Ding, R., Rui, Z., Wang, X., Meng, Z., Zhang, B., Dong, W., Li, J., Liu, J. & Jiang, X. (2023). Advances in Low Pt Loading Membrane Electrode

- Assembly for Proton Exchange z Fuel Cells. *Molecules*, 28(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/molecules28020773>
- Chai, H., Koo, B., Son, S., & Jung, S. P. (2024). Validity and Reproducibility of Counter Electrodes for Linear Sweep Voltammetry Test in Microbial Electrolysis Cells. *Energies*, 17(11), 1–16. <https://doi.org/10.3390/en17112674>
- 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, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232345>
- Dafalla, A. M., Wei, L., Habte, B. T., Guo, J., & Jiang, F. (2022). Membrane Electrode Assembly Degradation Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A Review. *Energies*, 15(23), 1–26. <https://doi.org/10.3390/en15239247>
- 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>
- Erwin, Fernanda, R., P, M. D., R, N. F., & K, I. R. (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>
- 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>
- Fazal, A. & Al-Ahmed, A. 2019. *Advanced Nanomaterials for Membrane Synthesis and Its Applications*. Netherlands: Elsevier.
- Fernihough, O., Ismail, M. S., & El-kharouf, A. (2022). Intermediate Temperature PEFC's with Nafion® 211 Membrane Electrolytes: An Experimental and Numerical Study. *Membranes*, 12(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/membranes12040430>
- Hamzah, M. A. A., Kamarudin, S. K., Beygisangchin, M., Shaari, N., Hazan, R., & Zakaria, Z. (2024). Microporous layer in proton exchange membrane fuel cells: Advancement in materials and properties. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6), 114220. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114220>
- Hallems, N., Howey, D., Battistel, A., Saniee, N. F., Scarpioni, F., Wouters, B., La Mantia, F., Hubin, A., Widanage, W. D., & Lataire, J. (2023). Electrochemical impedance spectroscopy beyond linearity and stationarity—

- A critical review. *Electrochimica Acta*, 466(July), 142939. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142939>Hamzah, M. A. A.,
- Hasan, M. S., & Widayat, W. (2022). Produksi Hidrogen dengan Memanfaatkan Sumber Daya Energi Surya dan Angin di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 3(1), 38–48. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13374>
- Hernandez-Aldave, S., & Andreoli, E. (2020). Fundamentals of Gas Diffusion Electrodes and Electrolysers For Carbon Dioxide Utilisation: Challenges and Opportunities. *Catalysts*, 10(6), 1–34. <https://doi.org/10.3390/CATAL10060713>
- Jamal, T., Shafiullah, G. M., Dawood, F., Kaur, A., Arif, M. T., Pugazhendhi, R., Elavarasan, R. M., & Ahmed, S. F. (2023). Fuelling The Future: An In-Depth Review of Recent Trends, Challenges and Opportunities of Hydrogen Fuel Cell For A Sustainable Hydrogen Economy. *Energy Reports*, 10, 2103–2127. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.011>
- Jing, S. Y., Sun, Z. Y., Yang, L., & Wang, Y. (2024). Effects of Porosity and Porosity Distribution in Gas Diffusion Layer on The Performances of Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Journal of Power Sources*, 613(June), 234957. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234957>
- Jose, A., Bekal, S., & Revankar, S. T. (2024). Effect of Oxidant Quantity and Humidification Temperature on Performance of PEMFC With Twin Inlet and Twin Outlet Flow Field. *Frontiers in Energy Research*, 12(June), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1390956>
- Joshi, P. S & Sutrave, D. S. (2018). A Brief Study of Cyclic Voltammetry and Electrochemical Analysis. *International Journal of ChemTech Research*, 11(9), 77–88. <https://doi.org/10.20902/ijctr.2018.110911>
- Kane, S. N., Mishra, A., & Dutta, A. K. (2016). Preface: International Conference on Recent Trends in Physics (ICRTP 2016). *Journal of Physics: Conference Series*, 755(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/755/1/011001>
- Kazula, S., de Graaf, S., & Enghardt, L. (2023). Review of Fuel Cell Technologies and Evaluation of Their Potential and Challenges for Electrified Propulsion Systems in Commercial Aviation. *Journal of the Global Power and Propulsion Society*, 7, 43–57. <https://doi.org/10.33737/jgpps/158036>
- Kim, H. E., Kwon, J., & Lee, H. (2022). Catalytic Approaches Towards Highly Durable Proton Exchange Membrane Fuel Cells with Minimized Pt Use. *Chemical Science*, 13(23), 6782–6795. <https://doi.org/10.1039/d2sc00541g>
- Kim, I. G., Yoo, S. J., Kim, J. Y., Park, H. S., Lee, S. Y., Seo, B., Lee, K. Y., Jang, J. H., & Park, H. Y. (2024). A Review of Strategies to Improve the Stability of Carbon-supported PtNi Octahedral for Cathode Electrocatalysts in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Journal of Electrochemical Science and*

- Technology*, 15(1), 96–110. <https://doi.org/10.33961/jecst.2023.00941>
- Kumar, S. S. & Lim, H. (2022). An Overview of Water Electrolysis Technologies for Green Hydrogen Production. *Energy Reports*, 8, 13793–13813. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.127>
- Lazanas, A. C., & Prodromidis, M. I. (2023). Electrochemical Impedance Spectroscopy—A Tutorial. *ACS Measurement Science Au*, 3(3), 162–193. <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00070>
- Li, B., Wan, K., Xie, M., Chu, T., Wang, X., Li, X., Yang, D., Ming, P., & Zhang, C. (2022). Durability Degradation Mechanism and Consistency Analysis for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack. *Applied Energy*, 314(August 2021), 119020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119020>
- 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, S., Hua, S., Lin, R., Wang, H., Cai, X., & Ji, W. (2022). Improving The Performance and Durability of Low Pt-Loaded Meas by Adjusting The Distribution Positions of Pt Particles in Cathode Catalyst Layer. *Energy*, 253, 124201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124201>
- Madhav, D., Wang, J., Keloth, R., Mus, J., Buysschaert, F., & Vandeginste, V. (2024). A Review of Proton Exchange Membrane Degradation Pathways, Mechanisms, and Mitigation Strategies in a Fuel Cell. *Energies*, 17(5). <https://doi.org/10.3390/en17050998>
- Magar, H. S. E., Hassan, R. Y. A., & Mulchandani, A. (2023). Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Principles and Biosensing Applications. *Handbook of Nanobioelectrochemistry: Application in Devices and Biomolecular Sensing*, 919–939. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9437-1_42
- Maiket, Y., Yeetsorn, R., & Kaewmanee, W. (2022). Hydrogen Flow Controller Applied to Driving Behavior Observation of Hydrogen Fuel Cell Performance Test. *ACS Omega*, 7(43), 38277–38288. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02000>
- 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>
- Martínez-Hincapié, R., Wegner, J., Anwar, M. U., Raza-Khan, A., Franzka, S., Kleszczynski, S., & Čolić, V. (2024). The Determination of the

- Electrochemically Active Surface Area and its Effects on the Electrocatalytic Properties of Structured Nickel Electrodes Produced by Additive manufacturing. *Electrochimica Acta*, 476(September 2023). <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143663>
- 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>
- Matsumura, N. 2023. *Practical Battery Design and Control*. America: Artech House.
- Meddings, N., Heinrich, M., Overney, F., Lee, J. S., Ruiz, V., Napolitano, E., Seitz, S., Hinds, G., Raccichini, R., Gaberšček, M., & Park, J. (2020). Application of Electrochemical Impedance Spectroscopy to Commercial Li-Ion Cells: A Review. *Journal of Power Sources*, 480(July). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228742>
- Moore, M., Shukla, S., Voss, S., Karan, K., Weber, A., Zenyuk, I., & Secanell, M. (2021). A Numerical Study on the Impact of Cathode Catalyst Layer Loading on the Open Circuit Voltage in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 168(4), 044519. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abf50c>
- Nashira, A., Asyifa, S. N., & Yosida, R. S. (2022). Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) and Its Prospect for Powering Automobile in the Future. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 11(2), 114–127. <https://doi.org/10.13170/aijst.11.2.24592>
- 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). <https://doi.org/10.3390/en14134048>
- 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>
- Park, J.K. (2012). *Principles and Applications of Lithium Secondary Batteries*. Germany: Willey
- Pei, P., Wu, Z., Li, Y., Jia, X., Chen, D., & Huang, S. (2018). Improved Methods to Measure Hydrogen Crossover Current in Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Applied Energy*, 215(February), 338–347. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.002>
- Prasad, K. N. V., Prasad, V. K., Ramesh, S., Phanidhar, S. V., Venkata Ratnam, K.,

- Janardhan, S., Manjunatha, H., Sarma, M. S. S. R. K. N., & Srinivas, K. (2020). Ceramic Sensors: A Mini-Review of Their Applications. *Frontiers in Materials*, 7(November), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.593342>
- Qaiser, M., Asghar, A. B., Jaffery, M. H., Javaid, M. Y., & Khurram, M. S. (2021). Flow Control of Hydrogen Fuel in Pem Fuel Cell Using Soft Computing Techniques. *Journal of Ovonic Research*, 17(1), 31–44. <https://doi.org/10.15251/jor.2021.171.31>
- Radestia Rahmah, D., Rohendi, D., Syarif, N., Rachmat, A., Sya'baniah, N. F., & Hawa Yulianti, D. (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), 8–13. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v6.i1.08>
- Rohendi, D., Majlan, E. H., Yulianti, D. H., Juwita, Syarif, N., Rachmat, A., Sumboja, A., Nyimas, F. S., & Amelia, I. (2024). Performance of Membrane Electrode Assembly Using Pt/C and Cofe/N-C Catalysts in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 28(2), 388–396.
- Rosen, M. A. (2021). Energy Sustainability with a Focus on Environmental Perspectives. *Earth Systems and Environment*, 5(2), 217–230. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00217-6>
- Serhan, M., Sprowls, M., Jackemeyer, D., Long, M., Perez, I. D., Maret, W., Tao, N., & Forzani, E. (2019). Total iron measurement in human serum with a smartphone. *AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings, 2019-November*. <https://doi.org/10.1039/x0xx00000x>
- 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. Y., & Min, K. (2022). The Effect of Gas Diffusion Layer on Electrochemical Effective Reaction Area of Catalyst Layer and Water Discharge Capability. *Renewable Energy*, 197(June), 932–942. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.096>
- Song, K., Wang, Y., Ding, Y., Xu, H., Mueller-Welt, P., Stuermlinger, T., Bause, K., Ehrmann, C., Weinmann, H. W., Schaefer, J., Fleischer, J., Zhu, K., Weihard, F., Trostmann, M., Schwartz, M., & Albers, A. (2022). Assembly techniques for proton exchange membrane fuel cell stack: A literature review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 153). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111777>
- 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>
- Taghiabadi, M. M., Zhiani, M., & Silva, V. (2019). Effect of MEA activation method on the long-term performance of PEM fuel cell. *Applied Energy*, *242*(August 2018), 602–611. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.157>
- Tang, Q., Li, B., Yang, D., Ming, P., Zhang, C., & Wang, Y. (2021). Review of hydrogen crossover through the polymer electrolyte membrane. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(42), 22040–22061. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.050>
- Tawalbeh, M., Alarab, S., Al-Othman, A., & Javed, R. M. N. (2022). The Operating Parameters, Structural Composition, and Fuel Sustainability Aspects of PEM Fuel Cells: A Mini Review. *Fuels*, *3*(3), 449–474. <https://doi.org/10.3390/fuels3030028>
- 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>
- Wei, P., & Wang, Z. (2023). Pattern Recognition Assisted Linear Sweep Voltammetry Sensor for Analysis of Tea Quality. *International Journal of Electrochemical Science*, *18*(10), 100275. <https://doi.org/10.1016/J.IJOES.2023.100275>
- Wei, Y., Xing, Y., Zhang, X., Wang, Y., Cao, J., & Yang, F. (2024). A Review of Sealing Systems for Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *World Electric Vehicle Journal*, *15*(8). <https://doi.org/10.3390/wevj15080358>
- Wenkai, L., Zhiyong, X., & Haodong, Z. (2024). Current status of research on composite bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs): nanofillers and structure optimization. *RSC Advances*, *14*(10), 7172–7194. <https://doi.org/10.1039/d3ra08054d>
- Wicaksono, M. A., Noerochim, L., & Purniawan, A. (2021). Analisis Pengaruh Variasi Rasio Berat Nafion/Karbon pada Lapisan Katalis Membrane Electrode Assembly terhadap Performa Elektrokimia PEM Fuel Cell (PEMFC). *Jurnal Teknik ITS*, *10*(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v10i2.63997>
- Wu, N., Liu, Y., Tian, X., Liu, F., Ma, Y., Zhang, S., Zhang, Q., Hou, D., Qi, Y., Yang, R., & Wang, L. (2023). The microporous layer in proton exchange membrane fuel cells, from transport mechanism to structural design. *Journal of Power Sources*, *580*(June), 233412. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233412>

- Yang, D., Tan, Y., Li, B., Ming, P., Xiao, Q., & Zhang, C. (2022). A Review of the Transition Region of Membrane Electrode Assembly of Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Design, Degradation, and Mitigation. *Membranes*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/membranes12030306>
- Yi, S., Li, S., Wu, Q., Lin, C., Yang, S., & Pan, M. (2024). Influence of PTFE Content on Structural Parameters of Microporous Layer and Its Performance In PEMFCs. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(7), 100615. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100615>
- Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146(April), 111180. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>
- Zadehbagheri, M., Kiani, M. J., & Sutikno, T. (2022). Investigation of the Effects of Fuel Cells on V-Q & V-P Characteristics. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 3(4), 535–545. <https://doi.org/10.18196/jrc.v3i4.14855>
- Zhang, J. (2008). PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers. Germany: Springer.
- Zhang, C., Li, W., Hu, M., Cheng, X., He, K., & Mao, L. (2020). A Comparative Study of Using Polarization Curve Models in Proton Exchange Membrane Fuel Cell Degradation Analysis. *Energies*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/en13153759>
- Zhang, J. & Shen, S. 2021. *Low Platinum Fuel Cell Technologies*. Germany: Springer.
- Zhang, X. F., Liu, Y. T., Song, H., Yao, T. T., Liu, Q., & Wu, G. P. (2023). Single-Walled Carbon Nanotube Interlayer Modified Gas Diffusion Layers To Boost The Cell Performance of Self-Humidifying Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(79), 30899–30908. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.250>
- Zhang, X., Li, H., Yang, J., Lei, Y., Wang, C., Wang, J., Tang, Y., & Mao, Z. (2021). Recent Advances in Pt-Based Electrocatalysts For PEMFCs. *RSC Advances*, 11(22), 13316–13328. <https://doi.org/10.1039/d0ra05468b>
- Zhao, J., Liu, H., & Li, X. (2023). Structure, Property, and Performance of Catalyst Layers in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. In *Electrochemical Energy Reviews* (Vol. 6, Issue 1). Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/s41918-022-00175-1>