

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI KATALIS Pd-Ni/C TERHADAP
KINERJA *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* UNTUK PEMFC**

SKRIPSI

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



Oleh:

ALYSIA LYDIA SITOMPUL

08031282126045

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

2025

HALAMAN PENGESAHAN

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI KATALIS Pd-Ni/C TERHADAP
KINERJA *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* UNTUK PEMFC**

SKRIPSI

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

Diusulkan Oleh:

ALYSIA LYDIA SITOMPUL

08031282126045

Menyetujui,

Pembimbing I

Pembimbing II



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

Dr. Nurlisa Hidayati, M.Si.

NIP. 196704191993031001

NIP. 197211092000032001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

NIP. 197111191997021001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi Alysia Lydia Sitompul (08031282126045) dengan judul “Pengaruh Variasi Komposisi Katalis Pd-Ni/C Terhadap Kinerja *Membrane Electrode Assembly* Untuk PEMFC” telah disidangkan di hadapan Tim Penguji Sidang Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada Januari 2025 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang diberikan.

Indralaya, Januari 2025

Ketua

1. **Dr. Desnelli, M.Si**
NIP. 196912251997022001

()

Anggota:

1. **Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T.,Ph. D**
NIP. 196704191993031001

()

2. **Dr. Nurlisa Hidayati, M.Si**
NIP. 197211092000032001

()

3. **Dra. Fatma, M.S.**
NIP. 196207131991022001

()

Mengetahui,

Dekan FMIPA

Ketua Jurusan Kimia



Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 197111191997021001



Prof. Dr. Muharni, M.Si
NIP. 196903041994122001

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Alysia Lydia Sitompul

NIM : 08031282126045

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 persyaratan untuk memperoleh gelar kesarjanaan strata (S1) dari Universitas Sriwijaya maupun perguruan tinggi lain. Semua informasi yang dimuat dalam skripsi ini yang berasal dari penulis lain baik yang dipublikasikan atau tidak telah diberikan penghargaan dengan mengutip nama sumber penulis secara benar. Semua isi dari skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya sebagai penulis.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Indralaya, Januari 2025



Alysia Lydia Sitompul

NIM. 08031282126045

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

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

Nama Mahasiswa : Alysia Lydia Sitompul

NIM : 08031282126045

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 Variasi Komposisi Katalis Pd-Ni/C Terhadap Kinerja *Membrane Electrode Assembly* Untuk 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, Januari 2025

Penulis,



Alysia Lydia Sitompul

NIM. 08031282126045

HALAMAN PERSEMBAHAN

“Karena itu Aku berkata kepadamu: apa saja yang kamu minta dan doakan, percayalah bahwa kamu telah menerimanya, maka hal itu akan diberikan kepadamu” (Markus 11: 24).

“Serahkanlah segala kekuatiranmu kepada-Nya, sebab Ia yang memelihara kamu” (1 Petrus 5:7).

Skripsi ini penulis persembahkan dengan kerendahan hati dan penuh ucapan syukur kepada Bapa yang di Surga Tuhan Yesus Kristus, Tuhan dan Juruselamat yang hidup karena atas kasih dan karuniaNya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Saya juga mempersembahkan skripsi ini kepada:

1. Kedua orang tua yang penulis sayangi, {Sihar Sitompul} dan {Tormauli Apriyanti Nababan}. Terima kasih untuk semua dukungan baik doa, materi dan segalanya yang bapak dan mamak berikan kepada penulis untuk dapat sampai pada tahap ini. Penulis tidak dapat membalas segala kebaikan bapak dan mamak, semoga Tuhan Yesus meberikan bapak dan mamak kesehatan, panjang umur dan murah rezeki aminn.
2. Dosen pembimbing penulis, bapak Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T.,Ph. D dan Ibu Dr. Nurlisa Hidayati, M.Si terima kasih sudah selalu perhatian kepada penulis, sudah banyak meluangkan waktu untuk membimbing penulis, memberikan arahan dan gambaran serta memberikan penulis ilmu yang sangat bermanfaat, motivasi dan dukungan. Semoga bapak dan Ibu panjang umur, selalu diberikan kesehatan, dilancarkan segala urusannya amin.
3. Dosen pembahas penulis, Ibu Dr. Desnelli, M.Si dan Ibu Dr. Fatma, M.Si. Terima kasih Ibu sudah memberikan perhatian lebih kepada penulis . Terima kasih untuk ilmu yang sangat bermanfaat, semoga Ibu selalu sehat, Panjang umur dan diberikan kelancaran dalam segala aktivitasnya amin.
4. Keluarga besar, sahabat dan teman-teman penulis yang tidak bisa disebutkan satu per satu terima kasih banyak atas dukungannya untuk penulis.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur atas berkat yang Tuhan Yesus berikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Variasi Komposisi Katalis Pd-Ni/C Terhadap Kinerja *Membrane Electrode Assembly* Untuk PEMFC” Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Sarjana (S1) Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya. Proses penyusunan skripsi tidak terlepas dari hambatan dan tantangan, proses tersebut dapat dilalui hingga pada tahap akhir ini karena izin dari Tuhan Yang Maha Esa dan banyak dukungan dari segala pihak. Penulis mengucapkan terima kasih banyak atas dukungan dari dosen pembimbing tugas akhir, Bapak Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T.,Ph.D yang telah membimbing penulis selama penelitian dan memberikan banyak pengalaman yang membangun penulis agar menjadi pribadi yang lebih baik lagi dan memotivasi penulis untuk mampu melewati segala hambatan dan tantangan dan penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada dosen pembimbing akademik, Ibu Dr. Nurlisa Hidayati, M.Si yang telah memberikan banyak dukungan dan perhatiannya kepada penulis mulai dari awal menjadi mahasiswa baru sampai akhirnya penulis dapat menyelesaikan pendidikan S1 Kimia Universitas Sriwijaya.

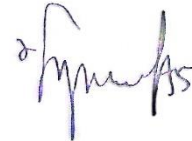
Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Hermasyah, S.Si., M.Si., Ph.D selaku Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya.
2. Ibu Prof. Dr. Muharni, M.Si selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
3. Bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si selaku Sekretaris Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya
4. Ibu Dr. Desnelli, M.Si selaku dosen pembahas penulis mulai dari seminar kemajuan, seminar hasil dan sidang skripsi. Terima kasih banyak Ibu yang sudah banyak memberikan masukan dan pengetahuan yang sangat bermanfaat bagi penulis.

5. Ibu Dr. Fatma, M.Si selaku dosen pembahas seminar hasil dan sidang skripsi penulis, terima kasih Ibu sudah memberikan banyak pengetahuan mulai dari cara pemaparan yang baik dan penulisan yang baik untuk skripsi.
6. Seluruh dosen FMIPA Universitas Sriwijaya yang tidak dapat disebutkan satu per satu, terima kasih banya untuk ilmu pengetahuan dari bapak/Ibu yang telah diberikan kepada penulis.
7. Mamak dan bapak yang selalu mendukung penulis, memberikan semangat dan pastinya doa-doa yang sangat membantu penulis dan selalu percaya dan bangga kepada penulis. Maafkan penulis yang belum bisa menjadi yang terbaik namun penulis akan berusaha menjadi anak dan kakak yang dapat membahagiakan mamak, bapak dan adek-adek.
8. Adek-adekku {Artha Gracia Sitompul}, {Andrew Timothy Sitompul}, dan {Azyer Yosafat Sitompul} terima kasih untuk semua dukungan dan doanya, semoga kalian sukses selalu dalam pendidikannya dan dapat tercapai segala harapan kalian kedepannya aminn.
9. Kak iin dan mba novi, terima kasih banyak sudah membantu penulis dalam setiap kendala teknis dalam perkuliahan dan pemberkasan. Semoga kakak dan mba selalu sehat dan bahagia selalu.
10. Adelia, Muthiara Romastiur br Sinaga dan Yunika Mian Hotnida Ambarita terima kasih baanyak sudah mau menemani penulis mulai dari awal kuliah sampai sekarang, sudah mau menjadi teman yang pengertian dan sangattt peduli kepada penulis. Semoga “Dilarang Ketawa Besok Ujian” tetap harmonis dan keakraban kita ngga pernah putus. Penulis berharap semoga kalian selalu sehat, bahagia, panjang umur dan dapat sukses dalam segala hal yang diharapkan, semangat terus buat kitaa!! segala kebaikan dan cerita kita selama ini akan selalu dikenang oleh penulis. Sekali lagi Terima kasihh banyakk yaa loPPP youu guys now and forever.
11. Tim Pur { agness, dianaa, nabighaa, riyantii, vinaa, deraa dan raihann} terima kasih sudah menjadi kawan yang baik dan pengertian selama kita penelitian semoga kita sukses selalu dan segala kenangan serta cerita yang pernah ada akan menjadi hal yang tidak terlupakan bagi penulis.

12. Kak Dwi selaku mentor bagi penulis, terima kasih banyak kak untuk kesabaran, kebaikan, Ilmu pengetahuan, motivasi dan segala hal baik yang tidak dapat disebutkan satu per satu oleh penulis. Mohon maaf penulis banyak melakukan kesalahan dalam penelitian ataupun tingkah laku penulis yang kurang menyenangkan bagi kakak. Semoga kakak selalu sehat, panjang umur, sukses selalu dan bahagiaa selalu yaa kakk amin.
13. Kak Reka dan Kak Yollan selaku mentor bagi penulis, terima kasih banyak untuk segala hal baik yang kakak- kakak berikan kepada penulis, mohon maaf banayk kekuarangan yang dilakukan penulis, semoga kakkak-kakak sekalian selalu sehat, panjang umur dan sukses selalu yaa kak aminn.
14. Teman- teman kimia angkatan 2021 yang tidak dapat disebutkan satu per satu, terima kasih banyak sudah menjadi teman yang baik bagi penulis, semoga kita semua selalu diberikan kelancaran dan kesuksesan aminn.

Indralaya, Januari 2025



Penulis

SUMMARY

INFLUENCE VARIATION OF Pd-Ni/C CATALYST COMPOSITION ON MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY PERFORMANCE FOR PEMFC

Alysia Lydia Sitompul: Supervised by Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D. and Dr. Nurlisa Hidayati, M.Si.

Departement of Chemistry, Faculty of Math and Science, Sriwijaya University xv + 71 pages, 6 Tables, 12 Pictures, 14 Appediences

The increasing demand for fossil energy aligns with population growth, necessitating the development of alternative energy sources to replace fossil fuels. One such alternative is the fuel cell, which can convert chemical energy into electrical energy. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) is a type of fuel cell capable of directly converting the chemical energy from hydrogen and oxygen into electricity. A critical component of PEMFC is the Membrane Electrode Assembly (MEA), which typically employs Pt catalysts in its fabrication. An alternative to Pt catalysts, which are expensive and scarce, is the use of non-platinum catalysts.

This study developed Pd-Ni/C catalysts using the impregnation method with varying compositions of Pd:Ni catalysts. The aim of varying the Pd-Ni catalyst composition is to investigate its effect on the MEA performance in PEMFC. The Pd-Ni composition ratios used were 1:0, 1:3, 3:1, and 0:1. The MEA fabrication method employed Catalyst Coated Substrate (CCS). Electrode characterization was conducted using Cyclic Voltammetry (CV) to determine the Electrochemical Surface Area (ECSA) and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) to measure electrical conductivity. MEA performance testing was carried out through polarization curve analysis (I-V and I-P) and a 12-hour durability test in a single PEMFC stack.

The results showed that the Pd:Ni = 1:3 ratio in the Pd-Ni/C catalyst achieved the highest electrode ECSA value of 0,628 m²/g and an electrode electrical conductivity of 0.0005 S/cm. In performance testing, the MEA with the Pd-Ni 1:3 composition exhibited the highest power density of 5.514 mW/cm² and a maximum current density of 45.296 mA/cm², indicating the best performance compared to other variations. Durability testing indicated MEA stability with minimal voltage degradation over 12 hours, maintaining stable voltage in the range of 0.453–0.457 Volts. This study demonstrates that the Pd-Ni 1:3 catalyst composition provides the best performance and durability for MEA in PEMFC.

Keywords: Catalyst, Impregnation, MEA, PEMFC, Palladium, Nickel
Citations : 72 (2018–2024)

RINGKASAN

PENGARUH VARIASI KOMPOSISI KATALIS Pd-Ni/C TERHADAP KINERJA *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* UNTUK PEMFC

Alysia Lydia Sitompul: Dibimbing oleh Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D. dan Dr. Nurlisa Hidayati, M.Si.

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya xv+71 halaman , 6 Tabel, 12 Gambar, 14 Lampiran

Kebutuhan energi fosil bertambah dengan seiring pertumbuhan penduduk, oleh karena itu perlu energi alternatif yang dapat dikembangkan untuk menggantikan energi fosil, salah satu alternatifnya adalah *fuel cell*. *Fuel Cell* dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang dapat mengubah energi kimia dari hidrogen dan oksigen secara langsung menjadi listrik. Bagian penting dari PEMFC yakni *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dan pada proses pembuatan MEA umumnya menggunakan katalis Pt. Alternatif katalis yang dapat digunakan untuk menggantikan katalis Pt yang mahal dan sulit diperoleh adalah penggunaan katalis non platina.

Pada penelitian ini dikembangkan pembuatan katalis Pd-Ni/C menggunakan metode impregnasi dengan komposisi katalis Pd:Ni bervariasi. Tujuan variasi katalis Pd-Ni untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi katalis Pd-Ni terhadap kinerja MEA pada PEMFC. Variasi rasio komposisi Pd-Ni yang digunakan adalah 1:0, 1:3, 3:1, dan 0:1. Metode pembuatan MEA menggunakan *Catalyst Coated Substrate* (CCS). Karakterisasi elektroda dilakukan menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk menghitung luas permukaan aktif elektrokimia atau *Electrochemical Surface Area* (ECSA) dan metode *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) untuk mengukur konduktivitas elektrik. Uji kinerja MEA dilakukan melalui analisis kurva polarisasi yang menunjukkan hubungan antara densitas arus terhadap tegangan (I-V) dan densitas daya terhadap densitas arus (I-P) serta pengujian daya tahan selama 12 jam pada PEMFC *stack* tunggal.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio Pd:Ni = 1:3 pada katalis Pd-Ni/C, menghasilkan nilai ECSA elektroda tertinggi sebesar 0,628 m²/g dan konduktivitas elektrik elektroda sebesar 0,0005 S/cm. Pada pengujian kinerja, MEA dengan komposisi Pd-Ni 1:3 memiliki densitas daya tertinggi sebesar 5,514 mW/cm². Densitas arus maksimum 45,296 mA/cm² pada komposisi Pd:Ni 1:3 yang menunjukkan kinerja terbaik dibandingkan variasi lainnya. Uji daya tahan mengindikasikan kestabilan MEA dengan penurunan tegangan yang minimal selama 12 jam, dengan tegangan stabil di kisaran 0,453–0,457 Volt. Penelitian ini menunjukkan bahwa komposisi katalis Pd-Ni 1:3 memberikan kinerja dan daya tahan terbaik untuk MEA pada PEMFC.

Kata Kunci : Katalis, Impregnasi, MEA, PEMFC, Paladium, Nikel
Sitasi : 72 (2018-2024)

DAFTAR ISI

BAB 1 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 <i>Fuel Cell</i>	4
2.2 <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)</i>	5
2.3 Komponen Penyusun PEMFC	Error! Bookmark not defined.
2.3.1 <i>Membrane Electrode Assembly (MEA)</i>	Error! Bookmark not defined.
2.3.2 <i>Current Collector</i>	9
2.3.3 Gasket	Error! Bookmark not defined.
2.3.4 Pelat Bipolar.....	Error! Bookmark not defined.
2.3.5 <i>End Plate</i>	Error! Bookmark not defined.
2.4. Katalis Pd-Ni/C	Error! Bookmark not defined.
2.5 Metode Impregnasi	Error! Bookmark not defined.
2.6 Karakterisasi Elektroda	Error! Bookmark not defined.
2.6.1 Metode <i>Cyclic Voltammetry (CV)</i>	Error! Bookmark not defined.
2.6.2 Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> ...	Error! Bookmark not defined.
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	16
3.1 Waktu dan Tempat	16
3.2 Alat dan Bahan	16
3.3 Prosedur Penelitian	16
3.3.1 Sintesis Katalis Pd-Ni/C Menggunakan Metode Impregnasi	16
3.3.2 Pembuatan <i>Gas Diffusion Layer (GDL)</i>	Error! Bookmark not defined.
3.3.3 Pembuatan Elektroda .	Error! Bookmark not defined.
3.3.4 Karakterisasi Elektroda	Error! Bookmark not defined.

3.3.5 Pembuatan *Membrane Electrode Assembly* (MEA)
Error! Bookmark not defined.

3.3.6 Uji Kinerja dan Daya Tahan MEA .. **Error! Bookmark
not defined.**

3.3.7 Analisis Data **Error! Bookmark not defined.**

3.3.8 Analisis Kinerja MEA . **Error! Bookmark not defined.**

3.3.9 Analisis Daya Tahan MEA	Error! Bookmark not defined.
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	Error! Bookmark not defined.
4.1 Pembuatan Katalis Pd-Ni/C.....	23
4.2 Pembuatan <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL).....	24
4.3 Pembuatan Elektroda Pd/C dan Pd-Ni/C.....	24
4.4 Karakterisasi Elektroda	Error! Bookmark not defined.
4.4.1 Karakterisasi Elektroda dengan Metode <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	Error! Bookmark not defined.
4.4.2 Karakterisasi Elektroda dengan Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	27
4.5 Uji Kinerja MEA.....	29
4.6 Uji Daya Tahan MEA dari MEA dengan Kinerja Terbaik....	31
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	33
5.1 Kesimpulan.....	33
5.2 Saran	33
DAFTAR PUSTAKA.....	34
LAMPIRAN.....	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Desain Dasar Fuel Cell (Al-Zaidi <i>et al.</i> ,2021).....	4
Gambar 2.	Skema proses kerja PEMFC PEMFC (Sun <i>et al.</i> ,2024).....	5
Gambar 3.	Skema MEA pada PEMFC (Lee <i>et al.</i> ,2024).....	7
Gambar 4.	a) Tegangan vs. waktu b) CV (Kim <i>et al.</i> ,2020).....	13
Gambar 5.	Spektrum impedansi (a) Plot Nyquist dan (b) Plot Bode (Braz <i>et al.</i> ,2022).....	14
Gambar 6.	Katalis Pd-Ni/C.....	23
Gambar 7.	Gas Diffusion Layer (GDL).....	24
Gambar 8.	Elektroda Pd/C dan elektroda Pd-Ni/C.....	25
Gambar 9.	Kurva Voltammogram Elektroda Variasi Komposisi Katalis Pd-Ni/C.....	26
Gambar 10.	Kurva Nyquist Variasi Komposisi Katalis Pd-Ni/C.....	27
Gambar 11.	Uji Kinerja MEA (a) Kurva I-V (b) Kurva I-P.....	30
Gambar 12.	Kurva Daya Tahan pada MEA dengan Komposisi Katalis Pd-Ni 1:3.....	32

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Perbandingan massa Pd dan Ni dalam Pd-Ni/C	Error! Bookmark not defined.
Tabel 2. Massa bahan pembuatan GDL	Error! Bookmark not defined.
Tabel 3. Massa bahan pembuatan elektroda....	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. Hasil analisis ECSA pada elektroda Pd-Ni/C dengan metode CCS..	26
Tabel 5. Nilai konduktivitas elektrik elektroda Pd-Ni/C dengan metode CCS ..	28
Tabel 6. Data OCV dari MEA dengan Variasi Komposisi Katalis Pd-Ni/C....	29

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Pembuatan GDL	43
Lampiran 2. Sintesis Katalis Pd-Ni /C secara impregnasi tanpa kalsinasi.....	
Error! Bookmark not defined.	
Lampiran 3. Pembuatan Elektroda Pd-Ni/C.....	45
Lampiran 4. Pembuatan MEA.....	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 5. Uji Kinerja MEA dengan Pemberian Beban	49
Lampiran 6. Uji Daya Tahan MEA.....	50
Lampiran 7. Perhitungan Pembuatan Katalis Pd-Ni/C.....	51
Lampiran 8. Perhitungan Pembuatan GDL.....	54
Lampiran 9. Perhitungan Pembuatan Elektroda.....	55
Lampiran 10. Kurva dan Tabel Hasil Pengukuran CV	Error! Bookmark not defined.
defined.	
Lampiran 11. Kurva dan Tabel Hasil Pengukuran EIS.....	61
Lampiran 12. Data Hasil Kinerja MEA Variasi Komposisi Katalis.....	63
Lampiran 13. Hasil Uji Daya Tahan dengan Kinerja MEA Terbaik Komposisi Katalis Pd-Ni 1:3.....	68
Lampiran 14. Alat dan Bahan.....	69

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi fosil semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan masyarakat, sedangkan cadangan energi fosil menipis. Situasi ini mendorong masyarakat untuk mencari energi alternatif sebagai sumber energi pengganti energi fosil (Safrijal, 2021). Salah satu sumber energi alternatif yang saat ini banyak diteliti dan dikembangkan yakni *fuel cell*. *Fuel cell* didefinisikan sebagai suatu perangkat konversi energi yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik (Fan *et al.*, 2021). Dalam *fuel cell*, idealnya hidrogen dan gas oksigen digabungkan secara elektrokimia melalui elektroda dan ion hidrogen diangkut melalui elektrolit konduktif kemudian listrik dan panas dihasilkan serta air terbentuk selama proses tersebut (Nanadegani & Sunden, 2023). *Fuel cell* memiliki keunggulan dibandingkan teknologi pembakaran konvensional lainnya, *fuel cell* memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada mesin pembakaran, *fuel cell* dapat mencapai efisiensi konversi energi listrik hingga 60% atau lebih, dengan menghasilkan emisi yang rendah. Dalam *fuel cell* dengan bahan bakar hidrogen, air adalah satu-satunya produk dari proses pembangkitan listrik, sehingga tidak ada emisi karbon dioksida atau polutan udara yang menyebabkan kabut asap dan masalah kesehatan. Selain itu, *fuel cell* beroperasi dengan suara rendah (Fan *et al.*, 2021).

Fuel cell diklasifikasikan menjadi *Alkaline Fuel Cells (AFC)*, *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*, *Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)*, *Model Reversibel (RMFC)*, *Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)*, dan *Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)* (Rafikiran *et al.*, 2023). PEMFC merupakan perangkat konversi canggih yang secara langsung dapat mengubah energi kimia dengan bantuan hidrogen menjadi energi listrik (Huang *et al.*, 2024; Kim *et al.*, 2024). Jenis PEMFC terdiri dari *stack* tunggal dan *multistack*. PEMFC *stack* tunggal memiliki kelebihan dibandingkan dengan *multistack* yakni, desain lebih sederhana dan memiliki efisiensi 40%- 45% (Liang *et al.*, 2022). Dalam proses kerja PEMFC, hidrogen dan oksigen disuplai ke anoda dan katoda, kemudian menghasilkan air cair dan energi listrik (Zhang *et al.*, 2024). PEMFC memiliki keunggulan dari jenis lainnya, yaitu memiliki kemampuan konversi energi yang

tinggi, tingkat kebisingan yang rendah, dan emisi nol. Hal ini penting dalam proses transformasi energi (Jing *et al.*, 2024). PEMFC memiliki komponen-komponen penting salah satunya yaitu *Membrane Electrode Assembly* (MEA). MEA terdiri dari lima komponen antara lain, lapisan katalis katoda dan anoda, membran pertukaran proton, serta lapisan difusi gas katoda dan anoda (Liu *et al.*, 2022). Metode dalam pembuatan MEA dibedakan menjadi metode *catalyst coated substrates* (CCS) dan *catalyst coated membrane* (CCM). Metode CCM merupakan metode dengan cara melapisi lapisan katalis langsung ke membran (Mauger *et al.*, 2020), sementara CCS merupakan metode dengan cara katalis dilapiskan pada penyangga atau substrat, kemudian membran dan katalis ditekan dalam kondisi panas untuk membentuk MEA (Lee *et al.*, 2024). Metode CCS memiliki kelebihan pada proses persiapan yang relatif sederhana dan ketahanan PEM terhadap pembengkakan (Li *et al.*, 2024).

Katalis yang sering digunakan dalam PEMFC yakni katalis Platina (Pt) namun memiliki kekurangan yakni, selain langka dan mahal, katalis Pt/C dalam suatu kondisi tertentu mengalami degradasi akibat korosi, terutama bila didukung oleh karbon sehingga dapat mengurangi masa pakai katalis secara keseluruhan (Xue & Zhang, 2024). Alternatif katalis yang dapat digunakan pada PEMFC yakni katalis Paladium (Pd). Pd sebagai alternatif yang menjanjikan karena kinerja elektrokatalitiknya yang kompetitif dengan Pt, terutama dalam reaksi reduksi oksigen. Selain itu, Pd lebih murah dan lebih melimpah dibandingkan Pt, sehingga menjadi pilihan yang baik untuk pengembangan katalis baru. Berbagai katalis bimetalik menggabungkan Pd dengan logam lain, seperti Pd-Ni, Pt-Pd, Pd-Cu, Pd-Fe, dan Pd-Co (Şahin *et al.*, 2023). Gabungan Pd dengan logam Ni memiliki kelebihan antara lain, biaya yang ekonomis karena logam Pd dan Ni mudah terjangkau dan melimpah ketersediaannya di bumi serta Ni memiliki atom yang lebih kecil dari Pd. Penambahan Ni dapat mengubah struktur elektronik Pd dan meningkatkan secara efektif kinerja katalitik (Niu *et al.*, 2024).

Berdasarkan latar belakang di atas, maka pada penelitian ini dilakukan penggabungan dua katalis Pd dan Ni dengan variasi komposisi katalis Pd-Ni 1:0, 1:3, 3:1, dan 0:1 untuk membuat MEA dengan metode CCS. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Afif (2023) dengan perbandingan komposisi katalis Pd-Ni 1:0,

1:3, 3:1 dan 0:1 diperoleh elektroda pada komposisi katalis Pd:Ni terbaik yakni = 3:1 dengan nilai ECSA sebesar $1,663 \text{ m}^2/\text{g}$ dan OCV tertinggi sebesar $0,707 \text{ V}$ serta nilai konduktivitas tertinggi pada komposisi katalis Pd:Ni = 0:1 dengan nilai $3,473 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ untuk *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC). Penelitian ini dilakukan dengan perbandingan komposisi yang sama untuk *Proton Exchange Membrane Cell* (PEMFC) dengan karakterisasi menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) serta mengetahui pengaruh kinerja MEA pada variasi komposisi katalis Pd-Ni/C pada PEMFC.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik elektroda yang dibuat dengan metode CCS pada variasi komposisi katalis Pd-Ni/C 1:0, 1:3, 3:1, dan 0:1 menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)?
2. Bagaimana kinerja MEA dengan komposisi katalis Pd-Ni/C yang bervariasi pada PEMFC *stack* tunggal?
3. Bagaimana daya tahan MEA dengan komposisi katalis Pd-Ni/C yang terbaik dari uji kinerja MEA pada PEMFC *stack* tunggal?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengkaji karakteristik elektroda yang dibuat dengan metode CCS menggunakan variasi komposisi katalis Pd-Ni/C dengan metode CV dan EIS.
2. Mengetahui kinerja MEA dengan komposisi katalis Pd-Ni/C yang bervariasi pada PEMFC *stack* tunggal.
3. Mengetahui daya tahan MEA dengan komposisi katalis Pd-Ni/C yang terbaik dari uji kinerja MEA pada PEMFC *stack* tunggal.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan informasi mengenai karakteristik MEA yang dibuat dengan variasi komposisi katalis Pd-Ni/C dengan metode CCS, pengaruh pemberian beban pada kinerja MEA dan daya tahan MEA pada PEMFC *stack* tunggal serta diharapkan MEA yang telah dibuat mampu menghasilkan kinerja dan ketahanan yang baik pada PEMFC *stack* tunggal

DAFTAR PUSTAKA

- Adhiyanti, N., Rohendi, D., Syarif, N., & Rachmat, A. (2020). Preparation and Characterization of Ti-Co/C catalyst for PEMFC Cathode. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 6(3), 109–114. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v6.i3.109>
- Agarwal, H., Pandey, R., & Bhat, S. D. (2020). Improved polymer electrolyte fuel cell performance with membrane electrode assemblies using modified metallic plate: Comparative study on impact of various coatings. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(37), 18731–18742. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.243>
- Akyüz, D. (2021). Electrochemical and in-situ spectroelectrochemical behaviors of non-peripherally tetra substituted zinc(II) and magnesium(II) phthalocyanines. *Journal of the Turkish Chemical Society, Section A: Chemistry*, 8(1), 9–20. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.781748>
- Al-Zaidi, 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
- 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>
- Athanasaki, G., Wang, Q., Shi, X., Chauhan, N., Vimala, V., Cindrella, L., Ahmad, R., & Kannan, A. M. (2021). Design and development of gas diffusion layers with pore forming agent for proton exchange membrane fuel cells at various relative humidity conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(9), 6835–6844. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.187>
- AVCU, A., CHOUPANI, N., & TÜCCAR, G. (2021). A Numerical Investigation of The Fracture Energy of Materials for Fuel Cell End Plates. *European Mechanical Science*, 5(2), 56–63. <https://doi.org/10.26701/ems.792302>
- Baba, M. A., Labbadi, M., Cherkaoui, M., & Maaroufi, M. (2021). Fuel cell electric vehicles: A review of current power electronic converters Topologies and technical challenges. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 785(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/785/1/012011>
- Babaei-Dehkordi, A., Soltanieh, M., Mirjalili, M., & Mostafaei, A. (2022). Quantitative analysis of diffusion kinetics of intermetallic formation in Ni-Ti system. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 4545–4555.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.017>

Braz, B. A., Moreira, C. S., Oliveira, V. B., & Pinto, A. M. F. R. (2019). Effect of the current collector design on the performance of a passive direct methanol fuel cell. *Electrochimica Acta*, 300, 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.01.131>

Braz, B. A., 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.egy.2022.06.045>

Cammarata, A., & Mastropasqua, L. (2023). *Theoretical analysis of mixed open-circuit potential for high temperature electrochemical cells electrodes*. May, 1–8. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1120343>

Earp, B., Dunn, D., Phillips, J., Agrawal, R., Ansell, T., Aceves, P., De Rosa, I., Xin, W., & Luhrs, C. (2020). Enhancement of electrical conductivity of carbon nanotube sheets through copper addition using reduction expansion synthesis. *Materials Research Bulletin*, 131(April), 110969. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2020.110969>

Falagüerra, T., Muñoz, P., & Correa, G. (2021). Analysis of the cathode side of a PEMFC varying design parameters to optimize current distribution and power density. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 880, 114820. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114820>

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>

Girish, C. R. (2018). Various impregnation methods used for the surface modification of the adsorbent: A review. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(4.7 Special Issue 7), 330–334. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.7.20571>

Gu, C., Wang, Q., Lu, Y., Tang, M., Lu, S., & Jin, J. (2023). Study on impregnation process optimization for regenerating the spent V2O5-WO3/TiO2 catalysts. *Molecular Catalysis*, 550(August), 113578. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2023.113578>

Habib, M. S., Arefin, P., Salam, M. A., Ahmed, K., Uddin, M. S., Hossain, T., Papri, N., & Islam, T. (2021). Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Durability Factors, Challenges, and Future Perspectives: A Detailed Review. *Material Science Research India*, 18(2), 217–234. <https://doi.org/10.13005/msri/180209>

Hardiani, R., & Khair, M. (2022). Impregnasi ZnO Karbon Aktif dari Sabut Kelapa (Cocos nucifera L) Fotokatalis Untuk Degradasi Rhodamin B. *Jurnal Periodic*

- Jurusan Kimia UNP*, 11(3), 56. <https://doi.org/10.24036/p.v11i3.115842>
- Herlina, H., Zulfikar, M. A., & Buchari, B. (2018). Cyclic voltammetry in electrochemical oxidation of amoxicillin with Co(III) as mediator in acidic medium using Pt, Pt/Co and Pt/Co(OH)₂ electrodes. *MATEC Web of Conferences*, 197. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819705004>
- Huang, T., Xiao, Y., Yi, D., Ren, X., Ma, J., Ding, W., Chen, Y., Wan, Z., Wang, X., & Zeng, W. (2024). Enhancing heat transfer in proton exchange membrane fuel cells through obstructed cooling channels: A comprehensive study. *Applied Thermal Engineering*, 250(December 2023), 123326. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123326>
- Jing, Y., Ma, Y., Ji, W., Cai, X., & Lin, R. (2024). Spatial characteristics of local current density distribution and the impact of relative humidity during airborne ammonia contaminates PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 83(June), 246–256. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.119>
- Khosravi, H. S., Abbas, Q., & Reichmann, K. (2021). *ScienceDirect Electrochemical aspects of interconnect materials in PEMFCs Resistance of Metal Paths*. 6.
- Kim, J., Han, C., Lee, S., Lee, D., & Kim, Y. (2024). Performance analysis of PEMFC-assisted renewable energy source heat pumps as a novel active system for plus energy buildings. *Energy and Buildings*, 319(June), 114477. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114477>
- 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>
- Kottayintavida, R., & Gopalan, N. K. (2020). Pd modified Ni nanowire as an efficient electro-catalyst for alcohol oxidation reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 8396–8404. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.006>
- Krasnova, A. O., Glebova, N. V., Kastsova, A. G., Rabchinskii, M. K., & Nechitailov, A. A. (2023). Thermal Stabilization of Nafion with Nanocarbon Materials. *Polymers*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/polym15092070>
- 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/acsmesuresciau.2c00070>
- Lee, S. A., Jun, S. E., Park, S. H., Kwon, K. C., Kang, J. H., Kwon, M. S., & Jang, H. W. (2024). Single atom catalysts for water electrolysis: from catalyst-coated substrate to catalyst-coated membrane. *EES Catalysis*, 2(1), 49–70. <https://doi.org/10.1039/d3ey00165b>

- Li, K., Wang, C., Li, J., Wang, L., Li, Z., & Zhang, C. (2024). Experimental Investigation into the Performance of PEMFCs with Three Different Hydrogen Recirculation Schemes. *Inventions*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/inventions9020033>
- Li, Y., Liu, L., Xing, Y., & Zhang, G. (2024). An asymmetric membrane electrode assembly for high-performance proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 55(November 2023), 357–364. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.280>
- Liang, Y. F., Liang, Q. C., Zhao, J. F., & He, J. N. (2022). Minimum hydrogen consumption power allocation strategy for the multi-stack fuel cell (MFC) system based on a discrete approach. *Frontiers in Energy Research*, 10(September), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.966852>
- Lit, L., Yu, S., Yue, X., Wang, J., Liang, M., Goo, L., & Yan, S. (2020). Effect of annealing atomic rearrangement on electrochemical performance of Pd-Ni catalyst. *International Journal of Electrochemical Science*, 15, 7896–7913. <https://doi.org/10.20964/2020.08.90>
- 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>
- Magar, et al. (2021). *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): Principles, Construction, and Biosensing Applications*.
- Martin, B., Dantras, E., Lonjon, A., Laffont, L., & Lacabanne, C. (2019). Fabrication of Nickel NanoChains/PVDF Nanocomposites and Their Electrical/Magnetic Properties. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 216(16). <https://doi.org/10.1002/pssa.201900158>
- 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(December 2023). <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143663>
- 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>
- 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>

- Moreno Soriano, R., Rojas, N., Nieto, E., de Guadalupe González-Huerta, R., & Sandoval-Pineda, J. M. (2021). Influence of the gasket materials on the clamping pressure distribution in a PEM water electrolyzer: Bolt torques and operation mode in pre-conditioning. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(51), 25944–25953. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.076>
- Nanadegani, F. S., & Sunden, B. (2023). Review of exergy and energy analysis of fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(84), 32875–32942. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.052>
- Niu, L., Meng, K., Song, J., Liu, Y., Jia, Z., Wang, Y., Tian, L., & Qi, T. (2024). Pd–Ni ellipsoidal nano-alloys with excellent catalytic performance for oxygen reduction reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 51, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.135>
- Okonkwo, P. C., Ben Belgacem, I., Emori, W., & Uzoma, P. C. (2021). Nafion degradation mechanisms in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 27956–27973. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.032>
- Padha, B., Verma, S., Mahajan, P., & Arya, S. (2022). Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Performance Analysis and Challenges in Fuel Cell Applications. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 13(2), 167–176. <https://doi.org/10.33961/jecst.2021.01263>
- Parekh, A. (2022). Recent developments of proton exchange membranes for PEMFC: A review. *Frontiers in Energy Research*, 10(September). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.956132>
- Petrov, S. A., Dudina, D. V., Ukhina, A. V., & Bokhonov, B. B. (2022). Morphological and Structural Transformations of Fe-Pd Powder Alloys Formed by Galvanic Replacement, Annealing and Acid Treatment. *Materials*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/ma15103571>
- Rafikiran, S., Devadasu, G., Basha, C. H. H., Tom, P. M., Prashanth, V., Dhanamjayulu, C., Kumbhar, A., & Muyeen, S. M. (2023). Design and performance analysis of hybrid MPPT controllers for fuel cell fed DC-DC converter systems. *Energy Reports*, 9, 5826–5842. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.030>
- 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., Syarif, N., Rachmat, A., Mersitarini, D., Ardiyanta, D., Erliana, R. R. W. H., Mahendra, I., Febrika, S. N., Yulianti, D. H., Amelia, I., & Al Reka Reo, M. (2022). Effect of Milling Time and PCA on Electrode Properties of Cu₂O-ZnO/C Catalyst Alloy used on Electrochemical Reduction Method of CO₂. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(2), 186–192.
<https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.02.022>

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>

Safrijal. (2021). *Search / Jurnal Teknologi Maritim*.
<https://journal.ppns.ac.id/index.php/teknologimaritim/search>

Şahin, Ö., Akdag, A., Horoz, S., & Ekinçi, A. (2023). Synthesized PdNi/C and PdNiZr/C catalysts for single cell PEM fuel cell cathode catalysts application. *Fuel*, 346(January). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128391>

Santiago, Ó., Raso, M. A., Navarro, E., & Leo, T. J. (2019). Selection of thermoplastic polymers for use as bipolar plates in direct methanol fuel cell applications. *Materials and Design*, 183.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108148>

Sazali, N., Salleh, W. N. W., Jamaludin, A. S., & Razali, M. N. M. (2020). New perspectives on fuel cell technology: A brief review. *Membranes*, 10(5).
<https://doi.org/10.3390/membranes10050099>

Afif, M. H. (2023). Uji Kinerja Dan Ketahanan Membrane Electrode Assembly (Mea) Dengan Katalis Pd-Ni/C Pada Direct Methanol Fuel Cell Stek Tunggal. *Skripsi*.

Shi, Q., Feng, C., Ming, P., Tang, F., & Zhang, C. (2022). Compressive stress and its impact on the gas diffusion layer: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(6), 3994–4009.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.058>

Wang, L., Yin, L., Yang, W., Cheng, Y., Wen, F., Liu, C., Dong, L., Wang, M., Ma, S., & Feng, X. (2021). Evaluation of structural aspects and operation environments on the performance of passive micro direct methanol fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(2), 2594–2605.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.114>

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>

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>

Windarto, C., Kumar, U., & Lim, O. (2024). *International Journal of Hydrogen Energy A review of materials and surface processing for bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cells*. 92(August), 419–433.

Xie, M., Chu, T., Wang, T., Wan, K., Yang, D., Li, B., Ming, P., & Zhang, C. (2021). Preparation, performance and challenges of catalyst layer for proton exchange membrane fuel cell. *Membranes*, 11(11), 1–33. <https://doi.org/10.3390/membranes11110879>

Xue, D., & Zhang, J.-N. (2024). Recent progress of antipoisoning catalytic materials for high temperature proton exchange membrane fuel cells doped with phosphoric acid. *Industrial Chemistry & Materials*, 2(2), 173–190. <https://doi.org/10.1039/d3im00101f>

Yang, P., Huang, J., Li, J., Luo, K., Zhang, L., Fu, Q., Zhu, X., & Liao, Q. (2024). Insights into the effect of drying temperature on catalyst layer structure and PEM water electrolysis performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52(PA), 170–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.108>

Zhang, A., Zhu, G., Zhai, M., Zhao, S., Zhu, liyan, Ye, D., Xiang, Y., Tian, T., & Tang, H. (2023). Construction of catalyst layer network structure for proton exchange membrane fuel cell derived from polymeric dispersion. *Journal of Colloid and Interface Science*, 638, 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.01.132>

Zhang, B. X., Wang, L. Q., Ding, Q., Zhu, K. Q., Xu, J. H., Yang, Y. R., Lee, D. J., & Wang, X. D. (2024). The effect of curved membrane electrode assemblies on performances of parallel and interdigitated flow field PEMFCs with wavelike gas channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 226(September 2023), 125519. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125519>

Zhang, L., Dai, Y., Li, C., Dang, Y., Zheng, R., Wang, Z., Wang, Y., Cui, Y., Arandiyana, H., Shao, Z., Sun, H., Zhuang, Q., & Liu, Y. (2024). Recent advances in electrochemical impedance spectroscopy for solid-state batteries. *Energy Storage Materials*, 69(March), 103378. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103378>

Zhang, Y., Liao, Y., Shi, G., Wang, W., & Su, B. (2020). *Preparation , characterization , and catalytic performance of Pd – Ni / AC bimetallic nano*

- *catalysts*. 760–769.

- Zhang, Z., Zhang, J., & Zhang, T. (2022). Endplate Design and Topology Optimization of Fuel Cell Stack Clamped with Bolts. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(8). <https://doi.org/10.3390/su14084730>
- Zhou, J., Zhou, X., Zhou, J., & Mi, Z. (2024). Preparation and application of superhydrophobic polytetrafluoroethylene materials and micro/nanoindentation. *Journal of Physics: Conference Series*, *2720*(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2720/1/012015>
- Zhu, L. Y., Li, Y. C., Liu, J., He, J., Wang, L. Y., & Lei, J. Du. (2022). Recent developments in high-performance Nafion membranes for hydrogen fuel cells applications. *Petroleum Science*, *19*(3), 1371–1381. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.11.004>
- Zhu, Y., Shan, W., Lian, Z., Liu, J., Zhang, Y., & He, H. (2024). Effects of impregnation sequence on the NH₃-SCR activity and hydrothermal stability of a Ce-Nb/SnO₂ catalyst. *Journal of Environmental Sciences (China)*, *138*, 450–457. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.04.032>