

**UJI KINERJA DAN KETAHANAN *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY*
(MEA) DENGAN KATALIS Pd-Ni/C PADA *DIRECT METHANOL FUEL CELL*
STEK TUNGGAL**

SKRIPSI

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



Oleh:

Misbach Hilal Afif

08031181924002

**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2023**

HALAMAN PENGESAHAN

**UJI KINERJA DAN KETAHANAN *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY*
(MEA) DENGAN KATALIS Pd-Ni/C PADA *DIRECT METHANOL FUEL CELL*
STEK TUNGGAL**

SKRIPSI

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

Diusulkan oleh:

MISBACH HILAL AFIF

08031181924002

Indralaya, 1 Agustus 2023

Pembimbing



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

NIP. 196704191993031001

Mengetahui,

Dekan FMIPA



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

NIP. 197111191997021001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi Misbach Hilal Afif (08031181924002) dengan judul “Uji Kinerja dan Ketahanan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan Katalis Pd-Ni/C Pada *Direct Methanol Fuel Cell* Stek Tunggal” telah diseminarkan di hadapan Tim Penguji Seminar Hasil Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 5 Juli 2023 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, 1 Agustus 2023

Ketua :

1. Dr. Miksusanti, M.Si.

NIP. 196807231994032003

()

Sekretaris :

1. Dr. Nurlisa Hidayati, M.Si

NIP. 197211092000032001

()

Pembimbing :

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

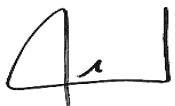
NIP. 196704191993031001

()

Penguji :

1. Dr. Desneli, M.Si.

NIP. 196912251997022001

()

2. Dr. Suheryanto, M.Si.

NIP. 196006251989031006

()

Mengetahui,



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

NIP. 197111191997021001



Prof. Dr. Muharni, M.Si

NIP. 196903041994122001

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Mahasiswa : Misbach Hilal Afif

NIM : 08031181924002

Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia

Menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri dan karya ilmiah ini belum pernah diajukan sebagai pemenuhan persyaratan untuk memperoleh gelar kesarjanaan strata (S1) dari Universitas Sriwijaya maupun perguruan tinggi lain.

Semua informasi yang dimuat dalam skripsi ini yang berasal dari penulis lain baik yang dipublikasikan atau tidak telah diberikan penghargaan dengan mengutip nama sumber penulis secara benar. Semua isi dari skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya sebagai penulis.

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya,

Indralaya, \ Agustus 2023

Yang Menyatakan,



Misbach Hilal Afif

NIM. 08031181924002

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

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

Nama Mahasiswa : Misbach Hilal Afif

NIM : 08031181924002

Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia

Jenis Karya Ilmiah : 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 “Uji Kinerja dan Ketahanan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan Katalis Pd-Ni/C Pada *Direct Methanol Fuel Cell* Stek Tunggal”. Dengan hak bebas royalti non-eksklusif ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih, edit/memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tugas akhir atau skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya.

Indralaya, 1 Agustus 2023

Yang Menyatakan,



Misbach Hilal Afif

NIM. 08031181924002

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang.
Segala puji bagi Allah, Tuhan seluruh alam.

“Ya Tuhanku, berilah aku petunjuk agar aku dapat mensyukuri nikmat-Mu yang telah Engkau limpahkan kepadaku dan kepada kedua orang tuaku dan agar aku dapat berbuat kebajikan yang Engkau ridai; dan berilah aku kebaikan yang akan mengalir sampai kepada anak cucuku. Sesungguhnya aku bertobat kepada Engkau dan sungguh, aku termasuk orang muslim.”

(QS. 46:15)

Skripsi ini sebagai tanda syukur kepada Allah SWT. dan Nabi Muhammad SAW.
dan ku persembahkan untuk kedua orang tua, saudara, pembimbing dan almamaterku.

Terimakasih Ayah dan Ibu, penulis sangat bersyukur dilahirkan dikeluarga ini, keluarga yang hangat dan sederhana. Terimakasih atas semua doa, kasih sayang, bantuan, dukungan, dan semua hal baik yang telah diberikan untuk penulis.

Penulis juga sangat bersyukur mempunyai saudara kandung yang luar biasa dalam memberikan kasih sayang. Terimakasih telah terlahir didunia ini.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur hanyalah milik Allah SWT, kita memujinya, memohon ampunan dan meminta pertolongan kepada-Nya dan pada akhirnya penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul: “Uji Kinerja dan Ketahanan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan Katalis Pd-Ni/C Pada *Direct Methanol Fuel Cell* Stek Tunggal”. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Kimia Universitas Sriwijaya.

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

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

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

8. Kak Iin dan mbak Novi selaku admin jurusan kimia yang telah membantu proses administrasi.
9. Kak Dwi, kak Ica dan kak Reka selaku mentor yang sangat baik hati, terima kasih kepada kakak-kakak atas ilmunya dan bantuannya selama penelitian dilaksanakan.
10. Tim PUR Fuel Cell & Hidrogen 2019 (Annash, Gumay, Joy, Yati, Yollan), terima kasih atas dukungan dan bantuannya selama penelitian.
11. Keluarga besar FMIPA Kimia, terimakasih atas kebersamaan dan suka-duka selama perkuliahan.
12. Seluruh pihak yang terlibat dalam penelitian maupun penulisan yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih dukungan dan bantuannya selama penelitian.

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

Indralaya, 1 Agustus 2023

Yang Menyatakan,



Misbach Hilal Afif

NIM. 08031181924002

SUMMARY

MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA) PERFORMANCE AND DURABILITY TEST WITH Pd-Ni/C CATALYST ON SINGLE STACK DIRECT METHANOL FUEL CELL

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

xvi + 82 pages, 13 figures, 11 tables, 13 attachments.

Pd-Ni/C catalyst with a mass ratio of Pd:Ni = 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, and 100:0 was successfully synthesized by the impregnation method. Pd-Ni/C catalyst ink is sprayed onto the surface of the gas diffusion layer (GDL) to obtain Pd-Ni/C electrodes. Pd-Ni/C electrodes were characterized by cyclic voltammetry (CV) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) methods. CV characterization aims to determine the catalytic activity of the electrode based on the value of Electrochemical Surface Area (ECSA). While the EIS characterization aims to determine the electrical conductivity produced by the electrode based on the value of electrical conductivity. The results of CV and EIS characterization obtained the highest ECSA value was $1.663 \text{ m}^2/\text{g}$ at the catalyst mass ratio Pd:Ni = 75:25 and the highest conductivity value was $3.473 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ at the catalyst mass ratio Pd:Ni = 0:100. After being characterized, the Pd-Ni/C electrodes were made into MEA and then tested for performance and durability on a single-stack DMFC. The result showed that the best MEA was obtained for the mass ratio of the catalyst Pd:Ni = 75:25 using methanol with a concentration of 10% (v/v) with the result being the OCV values of 0.707 V, a current density of 12 mA/cm^2 , and an optimum power density of 2.646 mW/cm^2 . The best MEA was tested for durability on single-stack DMFC and the results showed that the resistance of MEA was stable in the range of 0.468 V to 0.474 V for 9 hours.

Keywords : Pd-Ni/C catalyst, MEA, DMFC, performance test, durability test.

Citation : 77 (2011-2022).

RINGKASAN

UJI KINERJA DAN KETAHANAN *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) DENGAN KATALIS Pd-Ni/C PADA *DIRECT METHANOL FUEL CELL* STEK TUNGGAL

Misbach Hilal Afif, dibimbing oleh Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D
Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas
Sriwijaya.

xvi + 82 halaman, 13 gambar, 11 tabel, 13 lampiran.

Katalis Pd-Ni/C dengan rasio massa Pd:Ni = 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, dan 100:0 berhasil disintesis menggunakan metode impregnasi. Tinta katalis Pd-Ni/C disemprotkan ke permukaan *gas diffusion layer* (GDL) sehingga terbentuk elektroda Pd-Ni/C. Elektroda Pd-Ni/C dikarakterisasi menggunakan metode *cyclic voltammetry* (CV) dan *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS). Karakterisasi CV bertujuan untuk mengetahui aktivitas katalitik pada elektroda berdasarkan nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA). Sedangkan karakterisasi EIS bertujuan untuk mengetahui daya hantar listrik yang dihasilkan elektroda berdasarkan nilai konduktivitas elektrik. Hasil karakterisasi CV dan EIS didapatkan nilai ECSA tertinggi sebesar 1,663 m²/g pada rasio massa katalis Pd:Ni = 75:25 dan nilai konduktivitas tertinggi sebesar 3,473 x 10⁻² S/cm pada rasio massa katalis Pd:Ni = 0:100. Setelah dikarakterisasi, elektroda Pd-Ni/C dibuat menjadi MEA dan kemudian diuji kinerja dan daya tahannya pada DMFC stek tunggal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MEA terbaik didapatkan pada rasio massa katalis Pd:Ni = 75:25 menggunakan metanol dengan konsentrasi 10% (v/v) dengan hasil berupa nilai OCV sebesar 0,707 V, densitas arus 12 mA/cm², dan densitas daya optimum 2,646 mW/cm². MEA terbaik dilakukan uji daya tahan pada DMFC stek tunggal dan hasilnya menunjukkan bahwa ketahanan MEA stabil di kisaran 0,468 V hingga 0,474 V selama 9 jam.

Kata kunci : Katalis Pd-Ni/C, MEA, DMFC, uji kinerja, uji ketahanan.

Sitasi : 77 (2011-2022).

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
SUMMARY	ix
RINGKASAN	x
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Mekanisme Kerja DMFC	5
2.2 Komponen Penyusun DMFC	6
2.2.1 <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	6
2.2.2 Pelat Bipolar.....	8
2.2.3 Gasket.....	8
2.2.4 Kolektor Arus.....	8
2.2.5 Pelat Penutup.....	9
2.3 Katalis Non-Platina (Pd-Ni/C) Untuk DMFC	9
2.4 Metode Impregnasi Dalam Sintesis Katalis.....	10
2.5 <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	11
2.6 <i>Electrochemical Surface Area</i> (ECSA).....	12

2.7	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i>	13
2.8	Kurva Polarisasi Pada Uji Kinerja <i>Fuel Cell</i>	14
2.9	<i>Methanol Crossover (MCO)</i>	15
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	Sintesis Katalis Pd-Ni/C.....	17
3.3.2	Preparasi Elektroda	18
3.3.3	Karakterisasi Elektroda	18
3.3.4	Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly (MEA)</i>	19
3.3.5	Pengujian Kinerja MEA pada DMFC	19
3.3.6	Pengujian Daya Tahan MEA pada DMFC.....	19
3.3.7	Analisis Data	20
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		24
4.1	Sintesis Katalis Pd-Ni/C Menggunakan Metode Impregnasi dan Pembuatan Elektroda Menggunakan Metode Penyemprotan.....	24
4.2	Penentuan Nilai <i>Electrochemical Surface Area (ECSA)</i> Menggunakan Metode <i>Cyclic Voltammetry (CV)</i>	25
4.3	Penentuan Nilai Konduktivitas Menggunakan Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i>	26
4.4	Pengukuran Nilai <i>Open Circuit Voltage (OCV)</i> MEA Pada DMFC Stek Tunggal.....	28
4.5	Kurva Polarisasi I-V dan I-P Hasil Uji Kinerja MEA Pada DMFC Stek Tunggal.....	29
4.6	Pengaruh Konsentrasi Metanol Pada Pengukuran <i>Open Circuit Voltage (OCV)</i> MEA DMFC Stek Tunggal.....	31
4.7	Pengaruh Konsentrasi Metanol Pada Kurva Polarisasi I-V dan I-P Hasil Uji Kinerja MEA Pada DMFC Stek Tunggal.....	32
4.8	Pengujian Daya Tahan MEA Pada DMFC Stek Tunggal	34

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	36
5.1 Kesimpulan.....	36
5.2 Saran	36
LAMPIRAN.....	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Skema DMFC selama operasi normal	5
Gambar 2.	Diagram skema voltamogram	11
Gambar 3.	Hasil EIS pada performa MEA dalam berbagai kondisi	13
Gambar 4.	Keseluruhan spektrum DMFC untuk konsentrasi metanol 1 M dan voltase berbeda	14
Gambar 5.	Skema Kurva Polarisasi Pada Uji Kinerja <i>Fuel Cell</i>	15
Gambar 6.	Performa MEA <i>Fuel Cell</i> (tegangan vs waktu)	23
Gambar 7.	Kurva Voltammogram Masing-masing Elektroda Pd-Ni/C.	25
Gambar 8.	Kurva Nyquist Masing-masing Elektroda Pd-Ni/C.....	27
Gambar 9.	Kurva Polarisasi I-V Masing-masing MEA.	30
Gambar 10.	Kurva Polarisasi I-P Masing-masing MEA.	30
Gambar 11.	Kurva Polarisasi I-V MEA Pd:Ni = 75:25 Menggunakan Variasi Konsentrasi Metanol.....	33
Gambar 12.	Kurva Polarisasi I-P MEA Pd:Ni = 75:25 Menggunakan Variasi Konsentrasi Metanol.....	34
Gambar 13.	Pengaruh Waktu Terhadap Nilai Tegangan MEA Pd:Ni = 75:25 Pada Konsentrasi Metanol 10%.	35

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Rasio Massa Pd dan Ni pada Pd-Ni/C.....	18
Tabel 2. Data Analisis Kurva Volatammogram	20
Tabel 3. Data Nilai ECSA	20
Tabel 4. Data Analisis Kurva <i>Nyquist</i>	21
Tabel 5. Data Nilai Konduktivitas.....	21
Tabel 6. Data Nilai OCV	22
Tabel 7. Data Kurva Polarisasi I-V dan I-P.....	22
Tabel 8. Nilai ECSA Masing-masing Elektroda Pd-Ni/C	26
Tabel 9. Nilai Konduktivitas Masing-masing Elektroda Pd-Ni/C.....	27
Tabel 10. Nilai OCV Masing-masing MEA.....	28
Tabel 11. Nilai OCV MEA Pada Variasi Konsentrasi Metanol.....	31

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Pembuatan <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)	46
Lampiran 2.	Sintesis KatalisPd-Ni/C	47
Lampiran 3.	Pembuatan Elektroda Katalis Pd-Ni/C	48
Lampiran 4.	Pembuatan Elektroda Katalis Pt/C.....	49
Lampiran 5.	Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	50
Lampiran 6.	Perhitungan Pembuatan GDL	51
Lampiran 7.	Perhitungan Pembuatan Elektroda.....	52
Lampiran 8.	Perhitungan Nilai ECSA.....	58
Lampiran 9.	Perhitungan Nilai Konduktivitas	68
Lampiran 10.	Data Hasil Uji Kinerja MEA Menggunakan Variasi Rasio Massa Katalis	73
Lampiran 11.	Data Hasil Uji Kinerja MEA Menggunakan Variasi Konsentrasi Metanol	75
Lampiran 12.	Data Hasil Uji Daya Tahan MEA.....	78
Lampiran 13.	Gambar Alat dan Bahan Penelitian.....	80

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) merupakan tipe perangkat elektrokimia yang utamanya memanfaatkan metanol sebagai bahan bakar. Komponen kunci penyusun DMFC terletak pada *Membrane Electrode Assembly* (MEA) (Joghee *et al.*, 2015). Secara umum, MEA tersusun atas membran elektrolit yang diapit oleh dua elektroda yakni anoda dan katoda tempat berlangsungnya reaksi elektrokimia. Komponen-komponen penyusun MEA sangat penting dalam meningkatkan kinerja *fuel cell* (Zainoodin *et al.*, 2015). Oleh karena itu, perlu perhatian khusus agar proses elektrokimia yang terjadi berlangsung optimal dan mempunyai daya tahan terhadap rapat arus yang tinggi (Rohendi *et al.*, 2013).

Kerapatan arus listrik (*current density*) yang dihasilkan menentukan kinerja MEA dari suatu *fuel cell* (Rohendi *et al.*, 2015). Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai rapat arus listrik dalam *fuel cell* adalah distribusi pada lapis katalis (Vasile *et al.*, 2017). Katalis yang umum digunakan pada *fuel cell* adalah katalis platinum (Hartmann *et al.*, 2013). Namun, pada katalis platinum ditemukan kendala yang dihadapi yakni lambatnya kinetika reaksi reduksi oksigen yang mengakibatkan kinerja dan efisiensi sel rendah (Alia *et al.*, 2013) (Dehghani *et al.*, 2021). Salah satu cara untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan menggunakan katalis yang mampu mempercepat kinetika reaksi reduksi oksigen (Tian *et al.*, 2018). Beberapa penelitian mengembangkan katalis berbasis palladium sebagai alternatif katalis platinum. Hal ini dikarenakan katalis palladium dinilai memiliki potensi yang serupa bahkan lebih baik daripada katalis platinum dalam mereduksi oksigen (Wang *et al.*, 2021).

Bahan berbasis palladium menarik untuk diteliti sebagai katalis alternatif karena sifatnya yang sebanding dengan platinum (Gómez *et al.*, 2016). Palladium dan platinum, keduanya merupakan anggota unsur golongan platina dalam tabel periodik dan memiliki sifat kimia yang serupa seperti stabil di lingkungan udara dan mudah membentuk paduan dengan logam lain (Wang *et al.*, 2021). Meskipun keduanya memiliki sifat yang serupa, katalis palladium diklaim memiliki sifat toleran terhadap metanol yang lebih tinggi daripada katalis berbasis platinum (Shao,

2011) dan sangat toleran terhadap keracunan karbon monoksida dalam reaksi elektrokimia (Nguyen *et al.*, 2011). Katalis berbasis palladium menunjukkan puncak oksidasi metanol yang lebih rendah dibandingkan katalis berbasis platinum (Neergat *et al.*, 2011). Adanya puncak oksidasi metanol yang tinggi pada katalis platinum menyebabkan arus pada katoda bergeser ke arah negatif dan juga menyebabkan nilai potensial katoda menurun. Dengan demikian, katalis berbasis palladium cenderung menunjukkan selektivitas pada reaksi reduksi oksigen yang lebih baik daripada katalis berbasis platinum (Wang *et al.*, 2021).

Katalis berbasis palladium mampu mengembangkan kinerja katalitik reaksi reduksi oksigen dibandingkan dengan katalis platinum (Wang *et al.*, 2021). Untuk mengoptimalkan penggunaan katalis palladium, maka dilakukan perpaduan pada katalis palladium dengan logam transisi lainnya (Karim and Kamarudin, 2013). Manfaat yang diperoleh dari perpaduan antara logam adalah integrasi elemen logam dapat secara efektif meningkatkan aktivitas reduksi oksigen karena efek geometrik atau sifat elektroniknya (Gilroy *et al.*, 2016). Efek geometrik dikaitkan dengan terbentuknya pusat reaktif katalitik baru sebagai hasil dari pembentukan paduan antara komponen logam. Sementara untuk sifat elektroniknya dapat berubah karena pembentukan ikatan hetero-logam yang diinginkan untuk meningkatkan reaksi reduksi oksigen (Gilroy *et al.*, 2016). Penggabungan komponen logam yang beragam juga akan mengubah kekuatan adsorpsi oksigen (Sanij *et al.*, 2021).

Studi mengenai perpaduan katalis palladium dengan logam lainnya telah diteliti oleh Xu *et al.*, (2013) yang melakukan paduan katalis palladium dan nikel dengan menerapkan metode *one-step mild dealloying* untuk mensintesis katalis Pd-Ni homogen. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa aktivitas reaksi reduksi oksigen yang unggul dengan aktivitas spesifik dan massa yang lebih tinggi dibandingkan dengan katalis Pt/C (Xu *et al.*, 2013). Secara khusus, nikel memberikan aktivitas katalitik yang lebih tinggi sebagai katalis yang dipadukan dengan palladium pada elektroda *fuel cell* (Ahmed and Jeon, 2014). Hal ini dikarenakan penyisipan nikel membantu dalam peningkatan luas permukaan aktif katalis sehingga aktivitas katalitik dapat meningkat (Sanij and Gharibi, 2018). Pengamatan mengenai aktivitas katalitik palladium-nikel dan palladium tunggal telah dilakukan oleh Rosario *et al.*, (2014) dan hasil penelitiannya membuktikan

bahwa katalis palladium-nikel mengalami peningkatan aktivitas dan keracunan katalis yang lebih rendah dibandingkan dengan palladium tunggal. Xu (2014) menjelaskan bahwa nikel berkontribusi untuk meningkatkan toleransi keracunan dalam reaksi elektrokimia *fuel cell*. Nikel memiliki sifat tahan terhadap efek keracunan dalam reaksi elektrokimia alkohol, dan sumber daya yang melimpah, serta nikel telah diteliti secara intensif sebagai alternatif paduan dengan palladium (Liu *et al.*, 2014).

Berdasarkan uraian diatas, katalis palladium yang mengandung nikel dapat dipertimbangkan untuk penelitian lebih lanjut. Pada penelitian ini, katalis paduan palladium-nikel yang didukung oleh karbon (Pd-Ni/C) disintesis menggunakan metode impregnasi dan dilakukan variasi rasio massa palladium terhadap nikel. Penelitian ini mengacu pada literatur (Sanij and Gharibi, 2018) yang telah berhasil mensintesis katalis Pd-Ni/C dan memperoleh aktivitas katalitik yang cukup baik sehingga cocok diaplikasikan pada DMFC.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana aktivitas katalitik dan sifat konduktivitas dari elektroda dengan variasi rasio massa katalis Pd:Ni?
2. Bagaimana kinerja yang dihasilkan oleh MEA dengan variasi rasio massa katalis dan variasi konsentrasi metanol pada DMFC stek tunggal?
3. Bagaimana ketahanan MEA dengan rasio massa katalis terbaik dan konsentrasi metanol terbaik pada DMFC stek tunggal?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menentukan aktivitas katalitik dan nilai konduktivitas terbaik dari elektroda dengan variasi rasio massa katalis Pd:Ni.
2. Menentukan rasio massa katalis dan konsentrasi metanol terbaik berdasarkan hasil uji kinerja MEA pada DMFC stek tunggal.
3. Melakukan uji ketahanan MEA dengan rasio massa katalis dan konsentrasi metanol terbaik pada DMFC stek tunggal.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan informasi mengenai perkembangan penggunaan katalis Pd-Ni/C yang dibuat menggunakan metode impregnasi pada MEA untuk DMFC serta diharapkan MEA yang telah dibuat mampu menghasilkan kinerja dan ketahanan yang baik pada DMFC stek tunggal.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, M. S., & Jeon, S. (2014). Highly active graphene-supported Ni_xPd_{100-x} binary alloyed catalysts for electro-oxidation of ethanol in an alkaline media. *ACS Catalysis*, *4*(6), 1830–1837. <https://doi.org/10.1021/cs500103a>
- Alia, S. M., Jensen, K., Contreras, C., Garzon, F., Pivovar, B., & Yan, Y. (2013). Platinum coated copper nanowires and platinum nanotubes as oxygen reduction electrocatalysts. *ACS Catalysis*, *3*(3), 358–362. <https://doi.org/10.1021/cs300664g>
- Bahrami, H., & Faghri, A. (2013). Review and advances of direct methanol fuel cells: Part II: Modeling and numerical simulation. *Journal of Power Sources*, *230*, 303–320. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.12.009>
- Bamos, G., Bebelis, S., Kondarides, D. I., & Verykios, X. (2017). Comparison of the Activity of Pd–M (M: Ag, Co, Cu, Fe, Ni, Zn) Bimetallic Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction. *Topics in Catalysis*, *60*(15–16), 1260–1273. <https://doi.org/10.1007/s11244-017-0795-z>
- Berrueta, A., San Martín, I., Sanchis, P., & Ursúa, A. (2019). Lithium-ion batteries as distributed energy storage systems for microgrids. In *Distributed Energy Resources in Microgrids: Integration, Challenges and Optimization*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817774-7.00006-5>
- Braz, B. A., Oliveira, V. B., & Pinto, A. M. F. R. (2020). Experimental evaluation of the effect of the anode diffusion layer properties on the performance of a passive direct methanol fuel cell. *Energies*, *13*(19). <https://doi.org/10.3390/en13195198>
- Brinkman, L., Bulfin, B., & Steinfeld, A. (2021). Thermochemical Hydrogen Storage via the Reversible Reduction and Oxidation of Metal Oxides. *Energy and Fuels*, *35*(22), 18756–18767. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02615>
- C. Xu, Y. Liu, Q. H. and H. D. (2013). Nanoporous PdNi Alloy as Highly Active and Methanol-Tolerant Electrocatalyst towards Oxygen Reduction Reaction. *J. Mater. Chem. C*, *3*(207890), 10715–10722. <https://doi.org/10.1039/b000000x>
- Carvalho, L. L., Colmati, F., & Tanaka, A. A. (2017). Nickel–palladium electrocatalysts for methanol, ethanol, and glycerol oxidation reactions. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(25), 16118–16126. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.124>
- Chatterjee, S., & Sengupta, K. (2020). Carbon-based electrodes for direct methanol fuel cells. In *Direct Methanol Fuel Cell Technology* (pp. 135–176). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819158-3.00006-9>
- Climent, V., & Feliu, J. M. (2018). Cyclic voltammetry. In *Encyclopedia of*

Interfacial Chemistry: Surface Science and Electrochemistry. Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.10764-4>

- Corpuz, A. R., Olson, T. S., Joghee, P., Pylypenko, S., Dameron, A. A., Dinh, H. N., O'Neill, K. J., Hurst, K. E., Bender, G., Gennett, T., Pivovar, B. S., Richards, R. M., & O'Hayre, R. P. (2012). Effect of a nitrogen-doped PtRu/carbon anode catalyst on the durability of a direct methanol fuel cell. *Journal of Power Sources*, 217, 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.06.012>
- Das, S., Dutta, K., Nessim, G. D., & Kader, M. A. (2020). Introduction to direct methanol fuel cells. *Direct Methanol Fuel Cell Technology*, 1(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819158-3.00001-x>
- de Oliveira, P. da S. P., Andrea, V., Santiago, E. I., Lopes, T., de Andrade, D. A., & Linardi, M. (2019). A Reliability-Based Strategy for the Analysis of Single Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Energy and Power Engineering*, 11(08), 303–319. <https://doi.org/10.4236/epe.2019.118019>
- Dehghani Sanij, F., Balakrishnan, P., Su, H., Khotseng, L., & Xu, Q. (2021). Fabrication of polyoxometalate-modified palladium-nickel/reduced graphene oxide alloy catalysts for enhanced oxygen reduction reaction activity. *RSC Advances*, 11(62), 39118–39129. <https://doi.org/10.1039/d1ra06936e>
- Dehghani Sanij, F., & Gharibi, H. (2018). Preparation of bimetallic alloyed palladium-nickel electro-catalysts supported on carbon with superior catalytic performance towards oxygen reduction reaction. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 538(August 2017), 429–442. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.11.009>
- Del Rosario, J. A. D., Ocon, J. D., Jeon, H., Yi, Y., Lee, J. K., & Lee, J. (2014). Enhancing role of nickel in the nickel-palladium bilayer for electrocatalytic oxidation of ethanol in alkaline media. *Journal of Physical Chemistry C*, 118(39), 22473–22478. <https://doi.org/10.1021/jp411601c>
- Deraz, N. M. (2018). comparative jurisprudence of catalysts preparation methods: I. precipitation and impregnation methods. J. Ind. Environ. Chem., vol. 2, no. 1, pp. 19–21, 2018. The comparative jurisprudence of catalysts preparation methods: I. precipitation and impregnati. *Journal of Industrial and Environmental Chemistry*, 2(1), 19–21.
- 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>
- Gannon, W. J. F., & Dunnill, C. W. (2020). Apparent disagreement between cyclic voltammetry and electrochemical impedance spectroscopy explained by time-domain simulation of constant phase elements. *International Journal of*

- Hydrogen Energy*, 45(43), 22383–22393.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.029>
- Garrick, T. R., Moylan, T. E., Carpenter, M. K., & Kongkanand, A. (2017). Editors' Choice—Electrochemically Active Surface Area Measurement of Aged Pt Alloy Catalysts in PEM Fuel Cells by CO Stripping. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(2), F55–F59.
<https://doi.org/10.1149/2.0381702jes>
- Ghotkar, R., & Milcarek, R. J. (2022). Modeling of the Kinetic Factors in Flame-Assisted Fuel Cells. *Sustainability (Switzerland)*, 14(7).
<https://doi.org/10.3390/su14074121>
- Gilroy, K. D., Ruditskiy, A., Peng, H. C., Qin, D., & Xia, Y. (2016). Bimetallic nanocrystals: Syntheses, properties, and applications. *Chemical Reviews*, 116(18), 10414–10472. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00211>
- Gómez, J. C. C., Moliner, R., & Lázaro, M. J. (2016). Palladium-based catalysts as electrodes for direct methanol fuel cells: A last ten years review. *Catalysts*, 6(9). <https://doi.org/10.3390/catal6090130>
- Guy, O. J., & Walker, K. A. D. (2016). Graphene Functionalization for Biosensor Applications. In *Silicon Carbide Biotechnology: A Biocompatible Semiconductor for Advanced Biomedical Devices and Applications: Second Edition* (Second Edi). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802993-0.00004-6>
- Hartmann, P., Zamel, N., & Gerteisen, D. (2013). Position dependent analysis of membrane electrode assembly degradation of a direct methanol fuel cell via electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Power Sources*, 241, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.041>
- Hawa Yulianti, D., 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>
- Jayakumar, A., Madheswaran, D. K., & Kumar, N. M. (2021). A critical assessment on functional attributes and degradation mechanism of membrane electrode assembly components in direct methanol fuel cells. *Sustainability (Switzerland)*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/su132413938>
- Joghee, P., Malik, J. N., Pylypenko, S., & O'Hayre, R. (2015). A review on direct methanol fuel cells—In the perspective of energy and sustainability. *MRS Energy & Sustainability*, 2(1). <https://doi.org/10.1557/mre.2015.4>
- Kamarudin, M. Z. F., Kamarudin, S. K., Masdar, M. S., & Daud, W. R. W. (2013). Review: Direct ethanol fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*,

38(22), 9438–9453. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.059>

- Karim, N. A., & Kamarudin, S. K. (2013). An overview on non-platinum cathode catalysts for direct methanol fuel cell. *Applied Energy*, *103*, 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.031>
- Koroglu, E. O., Yoruklu, H. C., Demir, A., & Ozkaya, B. (2018). Scale-up and commercialization issues of the MFCs: Challenges and implications. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Microbial Electrochemical Technology: Sustainable Platform for Fuels, Chemicals and Remediation*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00023-6>
- Kumar, P., Dutta, K., Das, S., & Kundu, P. P. (2014). An overview of unsolved deficiencies of direct methanol fuel cell technology: Factors and parameters affecting its widespread use. *International Journal of Energy Research*, *38*(11), 1367–1390. <https://doi.org/10.1002/er.3163>
- Lian, Y., Zhang, W., Ding, L., Zhang, X., Zhang, Y., & Wang, X. dong. (2018). Nanomaterials for Intracellular pH Sensing and Imaging. In *Novel Nanomaterials for Biomedical, Environmental and Energy Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814497-8.00008-4>
- Lin, H. L., & Wang, S. H. (2014). Nafion/poly(vinyl alcohol) nano-fiber composite and Nafion/poly(vinyl alcohol) blend membranes for direct methanol fuel cells. *Journal of Membrane Science*, *452*, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.09.039>
- Liu, G., Li, X., Wang, M., Wang, M., Kim, J. Y., Woo, J. Y., Wang, X., & Lee, J. K. (2016). A study on anode diffusion layer for performance enhancement of a direct methanol fuel cell. *Energy Conversion and Management*, *126*, 697–703. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.067>
- Liu, H., Koenigsmann, C., Adzic, R. R., & Wong, S. S. (2014). Probing ultrathin one-dimensional Pd-Ni nanostructures as oxygen reduction reaction catalysts. *ACS Catalysis*, *4*(8), 2544–2555. <https://doi.org/10.1021/cs500125y>
- Lo Vecchio, C., Sebastián, D., Alegre, C., Aricò, A. S., & Baglio, V. (2018). Carbon-supported Pd and Pd-Co cathode catalysts for direct methanol fuel cells (DMFCs) operating with high methanol concentration. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, *808*, 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.02.042>
- Lu, X., Ahmadi, M., Disalvo, F. J., & Abruña, H. D. (2020). Enhancing the Electrocatalytic Activity of Pd/M (M = Ni, Mn) Nanoparticles for the Oxygen Reduction Reaction in Alkaline Media through Electrochemical Dealloying. *ACS Catalysis*, *10*(10), 5891–5898. <https://doi.org/10.1021/acscatal.9b05499>
- Luo, Y., Estudillo-Wong, L. A., Cavillo, L., Granozzi, G., & Alonso-Vante, N. (2016). An easy and cheap chemical route using a MOF precursor to prepare

- Pd-Cu electrocatalyst for efficient energy conversion cathodes. *Journal of Catalysis*, 338, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2016.03.001>
- Magar, H. S., Hassan, R. Y. A., & Mulchandani, A. (2021). *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): Principles, Construction, and Biosensing Applications*. October. <https://doi.org/10.3390/s21196578>
- Mahendra, A., & Supardi, Z. A. I. (2021). Sebuah Review: Spektroskopi Impedansi Elektrokimia Dan Aplikasinya Dalam Baterai Lithium-Ion. *Inovasi Fisika Indonesia*, 10(2), 59–67. <https://doi.org/10.26740/ifi.v10n2.p59-67>
- 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>
- Mallick, R. K., Thombre, S. B., Motghare, R. V., & Chillawar, R. R. (2016). Analysis of the clamping effects on the passive direct methanol fuel cell performance using electrochemical impedance spectroscopy. *Electrochimica Acta*, 215, 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.08.080>
- Matin, M. A., Jang, J. H., & Kwon, Y. U. (2014). PdM nanoparticles (M = Ni, Co, Fe, Mn) with high activity and stability in formic acid oxidation synthesized by sonochemical reactions. *Journal of Power Sources*, 262(March 2014), 356–363. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.03.109>
- Mehrabadi, B. A. T., Eskandari, S., Khan, U., White, R. D., & Regalbuto, J. R. (2017). A Review of Preparation Methods for Supported Metal Catalysts. In *Advances in Catalysis* (Vol. 61, Issue January). <https://doi.org/10.1016/bs.acat.2017.10.001>
- Munjewar, S. S., Thombre, S. B., & Mallick, R. K. (2017). A comprehensive review on recent material development of passive direct methanol fuel cell. *Ionics*, 23(1). <https://doi.org/10.1007/s11581-016-1864-1>
- Neergat, M., Gunasekar, V., & Rahul, R. (2011). Carbon-supported Pd-Fe electrocatalysts for oxygen reduction reaction (ORR) and their methanol tolerance. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 658(1–2), 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2011.04.016>
- Nguyen, S. T., Ling Tan, D. S., Lee, J. M., Chan, S. H., Wang, J. Y., & Wang, X. (2011). Tb promoted Pd/C catalysts for the electrooxidation of ethanol in alkaline media. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(16), 9645–9652. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.049>
- O'Hayre, R. P. (2017). Fuel cells for electrochemical energy conversion. *EPJ Web of Conferences*, 148, 1–16. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714800013>
- 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>
- Olabi, A. G., Wilberforce, T., Alanazi, A., Vichare, P., Sayed, E. T., Maghrabie, H. M., Elsaied, K., & Abdelkareem, M. A. (2022). Novel Trends in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. In *Energies* (Vol. 15, Issue 14). <https://doi.org/10.3390/en15144949>
- Ramkrishna Joshi, M. N. (2014). Development in Direct Methanol – Oxygen Fuel Cell (DMFC). *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 7(9), 24–26. <https://doi.org/10.9790/5736-07922426>
- Ramli, Z. A. C., & Kamarudin, S. K. (2018). Platinum-Based Catalysts on Various Carbon Supports and Conducting Polymers for Direct Methanol Fuel Cell Applications: a Review. *Nanoscale Research Letters*, 13. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2799-4>
- Rohendi, D., Majlan, E. H., Mohamad, A. B., Daud, W. R. W., Kadhum, A. A. H., & Shyuan, L. K. (2015). Effects of temperature and backpressure on the performance degradation of MEA in PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 10960–10968. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.161>
- 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. *IJFAC (Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry)*, 1(3), 61–66. <http://ijfac.unsri.ac.id>
- Rohendi, D., Majlan, E. H., Mohamad, A. B., Wan Daud, W. R., Hassan Kadhum, A. A., & Shyuan, L. K. (2013). Characterization of electrodes and performance tests on MEAs with varying platinum content and under various operational conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(22), 9431–9437. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.093>
- 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>
- Samimi, F., & Rahimpour, M. R. (2018). Direct Methanol Fuel Cell. In *Methanol: Science and Engineering*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63903-5.00014-5>
- Sani, F. D., Balakrishnan, P., Leung, P., Shah, A., Su, H., & Xu, Q. (2021). Advanced Pd-based nanomaterials for electro-catalytic oxygen reduction in fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(27),

14596–14627. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.185>

- 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>
- Shao, M. (2011). Palladium-based electrocatalysts for hydrogen oxidation and oxygen reduction reactions. *Journal of Power Sources*, 196(5), 2433–2444. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.10.093>
- Shrivastava, N. K., Thombre, S. B., & Chadge, R. B. (2016). Liquid feed passive direct methanol fuel cell: challenges and recent advances. *Ionics*, 22(1), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11581-015-1589-6>
- Shrivastava, N. K., Thombre, S. B., & Mallick, R. K. (2014). Effect of diffusion layer compression on passive DMFC performance. *Electrochimica Acta*, 149, 167–175. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.10.080>
- Tian, J., Wu, W., Tang, Z., Wu, Y., Burns, R., Tichnell, B., Liu, Z., & Chen, S. (2018). Oxygen reduction reaction and hydrogen evolution reaction catalyzed by Pd–Ru nanoparticles encapsulated in porous carbon nanosheets. *Catalysts*, 8(8), 1–15. <https://doi.org/10.3390/catal8080329>
- Vasile, N. S., Monteverde Videla, A. H. A., & Specchia, S. et al. (2017). Effects of the current density distribution on a single-cell DMFC by tuning the anode catalyst in layers of gradual loadings: Modelling and experimental approach. *Chemical Engineering Journal*, 322, 722–741. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.060>
- Walsh, F. C. (2013). Electrode reactions in metal finishing. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 69(pt 3), 107–110. <https://doi.org/10.1080/00202967.1991.11870904>
- Wang, L., Gao, H., Fang, H., Wang, S., & Sun, J. (2016). Effect of methanol on the electrochemical behaviour and surface conductivity of niobium carbide-modified stainless steel for DMFC bipolar plate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(33), 14864–14871. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.037>
- Wang, T., Chutia, A., Brett, D. J. L., Shearing, P. R., He, G., Chai, G., & Parkin, I. P. (2021). Palladium alloys used as electrocatalysts for the oxygen reduction reaction. *Energy and Environmental Science*, 14(5), 2639–2669. <https://doi.org/10.1039/d0ee03915b>
- Wu, C., Gong, S., Hu, S., & Ye, Z. (2020). Experimental Studies on the Performances of a Direct Methanol Fuel Cell with a Novel Integrated Ultrasonic Atomization Fuel Feeder. *Fuel Cells*, 20(2), 158–165. <https://doi.org/10.1002/fuce.201900147>

- Xia, Z., Zhang, X., Sun, H., Wang, S., & Sun, G. (2019). Recent advances in multi-scale design and construction of materials for direct methanol fuel cells. *Nano Energy*, 65(August), 104048. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104048>
- Xu, M. (2014). Electrocatalytic performance of Pd – Ni nanowire arrays electrode for methanol electrooxidation in alkaline media. *Rare Metals*, 33(1), 65–69. <https://doi.org/10.1007/s12598-013-0204-0>
- Yao, D., Yang, H., Chen, H., & Williams, P. T. (2018). Co-precipitation, impregnation and so-gel preparation of Ni catalysts for pyrolysis-catalytic steam reforming of waste plastics. *Applied Catalysis B: Environmental*, 239, 565–577. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.07.075>
- Yulianti, D. H., Rohendi, D., Syarif, N., & Rachmat, A. (2020). Characterization of electrode with various of Pt-Ru/C catalyst loading and the performance test of membrane electrode assembly (MEA) in passive direct methanol fuel cell (DMFC). *Key Engineering Materials*, 840 KEM, 558–565. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.840.558>
- Zago, M., Bisello, A., Baricci, A., Rabissi, C., Brightman, E., Hinds, G., & Casalegno, A. (2016). On the actual cathode mixed potential in direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources*, 325(April 2018), 714–722. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.06.093>
- Zainoodin, A. M., Kamarudin, S. K., Masdar, M. S., Daud, W. R. W., Mohamad, A. B., & Sahari, J. (2014). High power direct methanol fuel cell with a porous carbon nanofiber anode layer. *Applied Energy*, 113, 946–954. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.066>
- Zainoodin, A. M., Kamarudin, S. K., Masdar, M. S., Daud, W. R. W., Mohamad, A. B., & Sahari, J. (2015). Optimization of a porous carbon nanofiber layer for the membrane electrode assembly in DMFC. *Energy Conversion and Management*, 101, 525–531. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.014>