

**UJI KINERJA MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA) DENGAN
KATALIS Pd/C PADA LAJU ALIR GAS HIDROGEN DAN
SUHU STEK PEMFC BERVARIASI**

SKRIPSI

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



CHRISTY ANGGUNNITA

08031181823001

JURUSAN KIMIA

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

2022

HALAMAN PENGESAHAN

UJI KINERJA MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA) DENGAN KATALIS Pd/C PADA LAJU ALIR GAS HIDROGEN DAN SUHU STEK PEMFC BERVARIASI

SKRIPSI

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

Oleh :

CHRISTY ANGGUNNITA
08031181823001

Indralaya, 14 Maret 2022

Mengetahui,



Dekan FMIPA
Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP. 197111191997021001

Pembimbing

Dr. Dedi Rohendi, M.T
NIP. 196704191993031001

HALAMAN PERSETUJUAN

Makalah tugas akhir Christy Anggunnita / 08031181823001 dengan judul “Uji Kinerja Membrane Electrode Assembly (MEA) dengan Katalis Pd/C pada Laju Alir Gas Hidrogen dan Suhu Stek PEMFC Ber variasi” yang telah diseminarkan di hadapan Tim Penguji Seminar Hasil Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 6 Januari 2022 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, 14 Maret 2022

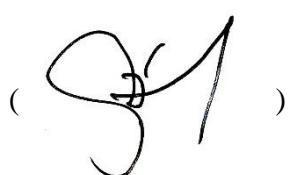
Ketua :

1. **Dr. Dedi Rohendi, M.T**
NIP. 196704191993031001



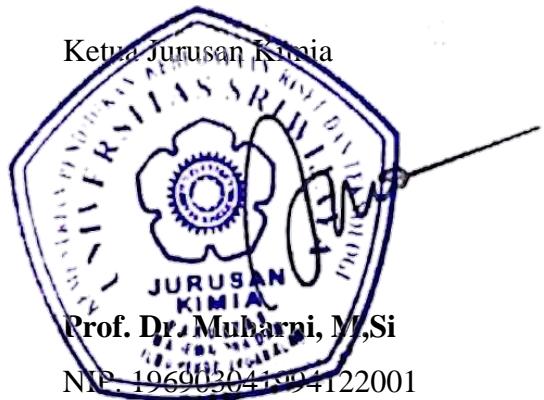
Penguji :

1. **Dr. Hasanudin, M.Si**
NIP. 197205151997021003
2. **Dr.rer.nat. Risfidian Mohadi, M.Si**
NIP. 197711272005011003



Dekan FMIPA
Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP. 197111191997021001

Mengetahui,



Ketua Jurusan Kimia
Prof. Dr. Muhamni, M.Si
NIP. 196903041994122001

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama Mahasiswa : Christy Anggunnita

NIM : 08031181823001

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 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, 14 Maret 2022

Penulis



Christy Anggunnita

NIM. 08031181823001

HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama Mahasiswa : Christy Anggunnita
NIM : 08031181823001
Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “Uji Kinerja *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan Katalis Pd/C pada Laju Alir Gas Hidrogen dan Suhu Stek PEMFC Bervariasi”. Dengan hak bebas royalty non-eksclusive 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, 14 Maret 2022

Yang menyatakan,



Christy Anggunnita

NIM. 08031181823001

HALAMAN PERSEMBAHAN

“Apapun yang menjadi takdirmu, akan mencari jalannya untuk menemukanmu” (Ali bin Abi Thalib).

Jangan pernah berkata “tidak mungkin” karena semua bisa terjadi atas izin Allah SWT.

“maa wadda’aka robbuka wa maa qolaa” Sesungguhnya Allah tidak pernah meninggalkanmu dan tidak pernah membencimu (QS. Ad-Duha : 3).

Ketika kamu lelah dan semakin ingin menyerah ketahuilah bahwa sesungguhnya pertolongan Allah SWT hanya berjarak antara kening dan sajadah, maka jangan pernah engkau meninggalkan sholat.

Dan Tuhanmu berfirman, “Berdoalah kepada-Ku niscaya akan aku perkenankan baagimu”. Sesungguhnya orang-orang yang sombang tidak mau menyembah-Ku akan masuk ke Neraka Jahanam dalam keadaan hina dina (QS. Ghafir : 60).

Skripsi ini sebagai tanda syukurku kepada:

- ✓ Allah SWT
- ✓ Nabi Muhammad SAW

Dan kupersembahkan kepada:

- ✓ Mama, papa dan kakakku tersayang yang selalu mendoakan, memberikan support dengan penuh dan penyemangat hidupku
- ✓ Seluruh keluarga besarku dari mama dan papa
- ✓ Pembimbing tugas akhir penelitian dan skripsi Bapak Dr. Dedi Rohendi, M.T
- ✓ Seluruh dosen FMIPA Universitas Sriwijaya
- ✓ Almamaterku (Universitas Sriwijaya)

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur hanyalah milik Allah SWT yang memberikan hidayah, iman, islam, kesehatan, dan pertolongan kepada hambanya dalam setiap aktivitas yang dilakukan. Sholawat beserta salam selalu kita kirimkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah membuat kita mengenal nikmat islam dan ilmu pengetahuan seperti saat ini. Atas dasar inilah akhirnya penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi yang berjudul "Uji Kinerja Membrane Electrode Assembly (MEA) dengan Katalis Pd/C pada Laju Alir Gas Hidrogen dan Suhu Stek PEMFC Bervariasi". Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains bidang kimia pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam 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 **Dr. Dedi Rohendi, M.T** yang telah banyak memberikan bimbingan, bantuan, motivasi, saran dan petunjuk kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan nikmat, rahmat serta keberkahan dan rasa puji syukur yang begitu besar aku panjatkan kepadanya.
2. Bapak Hermansyah, Ph.D selaku Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya
3. Ibu Prof. Dr. Muhamni, M.Si selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya
4. Bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si selaku sekretaris Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya
5. Bapak Dr. Dedi Rohendi, M.T selaku dosen Pembimbing Akademik dan Pembimbing tugas akhir, terimakasih telah banyak membantu,

mengajarkan dan membimbing dalam penulisan skripsi dengan rasa sabar yang begitu besar dan terimakasih banyak atas segala yang telah bapak berikan.

6. Bapak Dr. Hasanudin, M.Si dan Dr.rer.nat. Risfidian Mohadi, M.Si selaku pembahas dan penguji sidang sarjana.
7. Seluruh Dosen FMIPA Kimia Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu, mendidik dan membimbing selama masa kuliah.
8. Mama dan papa, beribu kata aku ucapkan terimakasih banyak berkat usaha, perjuangan, doa, semangat, support yang tiada henti hingga aku bisa mencapai titik ini dan selalu mengkuatkanku agar aku tidak pindah jurusan. Sehat selalu Mama Papa, sayang Mama Papa selalu.
9. Kakakku terkeren sepanjang tahun, terimakasih banyak kak yang selalu direpotkan dalam hal mengantar jemputku selama aku kecil hingga sekarang dan menjadi tempat pelindungku dikala aku takut terimakasih. Ayuk maya, terimakasih banyak telah memberikan doa, support dan selalu mau direpotkan dalam hal apapun. Semangat mencari rezeki, jadikan aku rich aunty ya.
10. Keluarga besar Ahmad Lamio dan Boinah yang selalu memberikan doa, support dan semangat yang tiada henti, terimakasih banyak untuk segala hal.
11. Muhammad Dafa Alhaq, *u are my best person for me*. Terimakasih banyak telah mendoakanku, memberikan dukungan, semangat dan canda tawamu yang selalu menjadi penyemangatku. Semangat dalam segala hal dafa dan sukses selalu untukmu, Nci.
12. Ibu dan ayah, terimakasih banyak ibu ayah telah mendoakanku dan memberikanku dukungan dalam bentuk apapun itu terimakasih dan teruntuk Faris, Filza, Ajyad, Fia dan Rasty adik-adikku, yang telah memberikan kebahagian, canda tawa, penyemangatku dan selalu dirindukan terimakasih banyak, yuk Nci.
13. Kak Dwi Hawa, aku tanpamu butiran debu kak terimakasih banyak atas ilmu yang telah engkau berikan kepadaku, yang selalu sabar dan sangat

baik dengan Cici yang penuh kekurangan dan selama penulisan skripsi banyak kurangnya Cici minta maaf kak. Beribu kata aku ucapkan, terimakasih banyak kak berkat ilmu, dukungan, bantuan dan doa yang telah kakak berikan kepadaku. Terimakasih telah mendengarkan curahan hati Cici tentang *circle* perkuliahan ini dan memberikan Cici nasehat. Sehat selalu kak, semoga keberkahan selalu mendatangimu, semangat terus kak Wik. Jangan lupakan adikmu yang paling aneh dan comel ini ya kak!.

14. Kak Chamel, yang selalu memberitahu kalau ada voucher terimakasih banyak kak itu sangat membantuku dalam menghabiskan uang wkwk. Terimakasih banyak kak chamel yang telah mengajariku, membantuku dan memberikan dukungan, semangat terus kak Cha.
15. Kak Reka, yang selalu memberikan tumpangan ketika pulang terimakasih banyak kak itu sangat mengurangi ongkosku kak wkwk. Terimakasih kak telah mengajariku tentang laju reaksi akan kukenang selalu kak, yang selalu membantuku dan memberikanku dukungan dalam bentuk apapun itu terimakasih kak, semangat terus kak Rek.
16. Kak Yuni yang paling berisik. Canda tawamu sangat berkesan kak wkw, kata-katamu, tingkahmu dan segala tentangmu akan selalu kurindukan. Terimakasih banyak kak telah mengajariku, memberitahu catatan belajarmu dan selalu memberikanku dukungan penuh. Jangan pernah lupakan kenangan kita tiap hari sabtu siang ya kak, itu sangat berarti bagiku. Semangat mencari cuan kak, Cicay.
17. Annash Nabila dan Putri Sari, adik asuh 19 dan 20. Terimakasih atas dukungan yang kalian berikan dan selalu memberitahuku tentang hal di indralaya. Semangat belajar.
18. KKN Fakultas Kencur terimakasih banyak telah memberikanku warna-warni kehidupan yang penuh canda tawa. Heru, Ikhsan, Erik, Rifdah, Lala, Ragil, Tyas, Manda senang bertemu kalian, begitu singkat 21 hari tapi kenangan yang telah kita lalui tidak begitu singkat. Sayang kalian, semangat menulis skripsi teman-teman.

19. Pemegang tahta Purun, Rama, Kak Herdi, Debi, Kak Deni, Kak Beni, Dea, Rara, Tilma, Yuda dan yang lainnya. Terimakasih banyak yang selalu membantu, memberikan semangat dan selalu siap siaga ada untuk kami selama KKN. Canda tawa kalian akan selalu dirindukan, semangat dalam segala hal dan terimakasih banyak atas segala bantuan kalian dalam bentuk apapun itu. Gek kito maen lagi yeh cik eimm.
20. Teruntuk besti yang paling keren, Anti Ingriana dan Indriana Ishma. Terimakasih banyak berkat dukungan kalian aku bisa sampai dititik ini, terimakasih selalu mendengarkan segala curahan hati dan selalu menghiburku dalam segala hal. Semangat mencari rezeki dan sukses selalu.
21. Kak Ory Adelia layaknya bidadari begitu lembut, baik hatinya dan tempat teraman untuk berbagi cerita di Kimia. Terimakasih banyak kak, yang dari awal bertanya tentang penelitian hingga aku bisa sampai dititik ini. Maaf jika aku sering merepotkanmu kak, yang tiba-tiba chat menanyakan sesuatu dan selalu sabar merespon semua pertanyaanku. Sehat selalu kak, semangat mencari rezeki, sukses selalu Qahera.
22. Kak Vadia terkeren. Terimakasih banyak atas bantuanmu yang sangat membantuku yang selalu sabar memberitahuku tentang penelitian. Maaf kalau cici banyak salah sama kakak. Semangat terus kak vad, sukses selalu. Kak Resti, Kak Indra, Kak Enggi terimakasih banyak kak atas bantuannya. Semangat dan sukses selalu buat kalian.
23. Ilyas, terimakasih banyak telah membantuku membuka gas, membuka stek, mengajariku dan memberitahuku tentang penelitian. Semangat yas sedikit lagi, teruslah membucin jangan diambil hati perkataan oranglain. Salam pejuang LDR.
24. Fatmawati si kece yang sangat tidak ramah bintang satu wkwk. Terimakasih banyak fatma telah berjuang bersama hingga mencapai titik ini. Sadar kan fat kemarin nangis sekarang insyaallah sudah bisa tertawa dengan lepas. Jangan lupakan segala hal gils yang pernah dilakuin bersama fat. Semangat mencari rezeki dan sukses untukmu.

25. Purgeng Igam, Ade Dwi, Delima, Sandi, Anin, Devi, Dindasll, Ade Marisa, Prima, Marya, Sabrina, Ghifar, Imam, Eko, Nadia, Keke dan yang lain tidak bisa disebutkan satu persatu. Terimakasih banyak telah membantu, memberikan dukungan dan hiburan selama penelitian. Semangat terus buat kalian dan sukses selalu.
26. Staff TU Jurusan Kimia Mbak Novi dan Kak Chosuin yang membantu dalam menyelesaikan administrasi selama perkuliahan, penjadwalan serta pemberkasan.
27. Teruntuk diriku sendiri yang selalu nangis, terimakasih banyak sudah mau kuat sejauh ini, terimakasih untuk selalu sabar dalam segala hal dengan cobaan yang terus berdatangan. Terimakasih banyak untuk selalu rela, ikhlas dan tabah dalam menerima segala hal. Kamu bisa dan kamu mampu. Orang lain mengecilkanmu tapi Allah mengangkat derajatmu setinggi mungkin. *Love yourself as you are!*.
28. Dan terakhir, terimakasih kepada siapapun itu yang telah mengukir kenangan dihidupku, memberikan pelajaran yang begitu berarti dan membuatku menjadi lebih dewasa.

Semoga bimbingan, ilmu, bantuan, dan masukan yang telah diberikan kepada penulis menjadi amal shaleh dan pahala yang setimpal dari Allah SWT. Semoga bantuan kalian menjadi kemudahan dalam menjalankan kehidupan yang dirahmati Allah SWT. Dengan kerendahan hati, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih banyak kekurangan dan kesalahan, sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari pembaca. Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua serta pengembangan ilmu kimia di masa yang akan datang.

Indralaya, 14 Maret 2022
Penulis

SUMMARY

PERFORMANCE TEST OF MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA) WITH Pd/C CATALYST ON GAS HYDROGEN FLOW RATE AND VARIED PEMFC STACK TEMPERATURES

Christy Anggunnita : Supervised by Dr. Dedi Rohendi, M.T
Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Science, Sriwijaya University
xix + 55 pages, 2 tables, 13 pictures, 6 appendices

Membrane Electrode Assembly (MEA) performance test study with Pd/C catalyst on gas flow rate and varied PEMFC stack temperature has been conducted. The making of Pd/C catalyst electrodes was carried out by the spraying method. MEA was made by combining two Pd/C electrodes on both sides of the anode and cathode using the Nafion-212 membrane. The resulting MEA was characterized using the Cyclic Voltammetry (CV) method and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS).

MEA performance testing was conducted based on the I-V curve and I-P curve with variations in gas flow rate and stack temperature of the PEMFC. The results obtained from the measurement of catalyst activity based on ECSA calculations for MEA Pd/C were 442.54 g/cm^2 , while the results of the MEA test using the EIS method, the electrical conductivity value obtained for MEA Pd/C was $2.02 \times 10^{-7} \text{ S/cm}$. MEA Pd/C performance test on gas flow rate variation obtained optimum gas flow rate of 300 mL/minute with current density 9.6 mA/cm^2 and maximum power density which resulted in the amount of 3.95 mW/cm^2 . MEA Pd/C performance test with stack temperature variation obtained the best operational temperature at 40°C with current density 9.6 mA/cm^2 and maximum power density 3.97 mW/cm^2 .

Keywords : PEMFC, Pd/C, Stack Temperature, CV, EIS

Citations : 55 (2006 - 2021)

RINGKASAN

UJI KINERJA MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA) DENGAN KATALIS Pd/C PADA LAJU ALIR GAS HIDROGEN DAN SUHU STEK PEMFC BERVARIASI

Christy Anggunnita : Dibimbing oleh Dr. Dedi Rohendi, M.T
Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya
xix + 55 halaman, 2 tabel, 13 gambar, 6 lampiran

Studi uji kinerja *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan katalis Pd/C pada laju alir gas hidrogen dan suhu stek PEMFC bervariasi telah dilakukan. Pembuatan elektroda dengan katalis Pd/C dilakukan dengan metode *spraying*. MEA dibuat dengan menggabungkan dua elektroda Pd/C pada kedua sisi anoda dan katoda menggunakan membran nafion-212. MEA yang dihasilkan tersebut dikarakterisasi menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS).

Pengujian kinerja MEA dilakukan berdasarkan kurva I-V dan kurva I-P dengan variasi laju alir gas hidrogen dan suhu stek pada *stack* PEMFC. Hasil yang diperoleh dari pengukuran aktivitas katalis berdasarkan perhitungan ECSA untuk MEA Pd/C sebesar $442,54 \text{ g/cm}^2$. Sementara hasil pengujian MEA dengan metode EIS didapatkan nilai konduktivitas listrik untuk MEA Pd/C sebesar $2,02 \times 10^{-7} \text{ S/cm}$. Uji kinerja MEA Pd/C pada variasi laju alir gas hidrogen diperoleh laju alir gas hidrogen optimum sebesar 300 mL/menit dengan densitas arus $9,6 \text{ mA/cm}^2$ dan densitas daya maksimum yang dihasilkan sebesar $3,95 \text{ mW/cm}^2$. Uji kinerja MEA Pd/C dengan variasi suhu stek didapatkan suhu operasional terbaik pada suhu 40°C dengan densitas arus $9,6 \text{ mA/cm}^2$ dan densitas daya maksimum sebesar $3,97 \text{ mW/cm}^2$.

Kata kunci : PEMFC, Pd/C, Suhu Stek, CV, EIS

Kutipan : 55 (2006 – 2021)

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
SUMMARY.....	xii
RINGKASAN.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xviii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Masalah.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. <i>Fuel Cell</i>	4
2.2. Jenis <i>Fuel Cell</i>	5
2.3. <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)</i>	6
2.4. Bagian Penyusun PEMFC.....	8
2.4.1. Membrane Electrode Assembly (MEA)	8
2.4.2. Elektroda.....	9
2.4.3. Gasket.....	10
2.4.4. Plat bipolar.....	10
2.4.5. Membran nafion.....	11

2.4.6. <i>End plate</i>	12
2.5. Lapisan Katalis.....	12
2.5.1. Katalis palladium (Pd)	13
2.6. Metode Pembuatan MEA.....	13
2.6.1. Metode <i>spraying</i>	13
2.7. Karakterisasi MEA.....	13
2.7.1. Penentuan nilai ECSA dengan metode CV.....	13
2.7.2. Penentuan konduktivitas listrik dengan metode EIS.....	14
2.8 Kurva Polarisasi.....	15
2.9. Faktor Penentu Kinerja MEA.....	15
2.9.1. Laju alir gas hidrogen.....	15
2.9.2. Suhu stek.....	16

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

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 Percobaan.....	17
3.3.1. Pembuatan GDL.....	17
3.3.2. Pembuatan elektroda Pd/C.....	18
3.3.3. Pembuatan MEA.....	18
3.4. Karakterisasi MEA.....	18
3.4.1. Penentuan nilai ECSA dengan metode CV.....	18
3.4.2. Pengukuran konduktivitas listrik dengan metode EIS.....	19
3.5. Pengujian Kinerja MEA pada PEMFC.....	19
3.5.1. Pengujian kinerja MEA variasi laju alir gas hidrogen....	19
3.5.2. Pengujian kinerja MEA variasi suhu stek.....	19
3.6. Analisis Data.....	20
3.6.1. Metode CV.....	20
3.6.2. Metode EIS.....	20

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pembuatan MEA.....	22
4.2. Karakterisasi MEA.....	23
4.2.1.Karakterisasi MEA menggunakan metode CV.....	23
4.2.1.Karakterisasi MEA menggunakan metode EIS.....	25
4.3.1.Pengujian kinerja MEA variasi laju alir gas hidrogen....	26
4.3.1.Pengujian kinerja MEA variasi suhu stek.....	29
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan.....	33
5.2. Saran.....	33
DAFTAR PUSTAKA.....	34
LAMPIRAN.....	40
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	55

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Mekanisme prinsip kerja fuel cell.....	5
Gambar 2. Skema kerja pada sistem PEMFC.....	8
Gambar 3. Bagian penyusun PEMFC.....	8
Gambar 4. Mekanisme GDL dalam sistem PEMFC.....	10
Gambar 5. Plat bipolar.....	11
Gambar 6. Struktur membran nafion.....	12
Gambar 7. Hasil foto permukaan (a) GDL menggunakan mikroskop digital perbesaran 1600x (b) elektroda Pd/C menggunakan mikroskop digital perbesaran 1600x (c) MEA menggunakan kamera biasa.....	23
Gambar 8. Kurva voltammogram pada MEA Pd/C.....	24
Gambar 9. Kurva nyquist dari MEA Pd/C.....	25
Gambar 10. Nilai OCV pada variasi laju alir gas hidrogen.....	27
Gambar 11. Kurva polarisasi laju alir gas hidrogen (a) kurva I-V (b) kurva I-P.....	28
Gambar 12. Nilai OCV pada variasi suhu stek.....	30
Gambar 13. Kurva polarisasi suhu stek (a) kurva I-V (b) kurva I-P.....	31

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 1. Pengaruh laju alir gas hidrogen terhadap kinerja MEA Pd/C.....	21
Tabel 2. Pengaruh suhu stek terhadap kinerja MEA Pd/C.....	21

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Skema kerja.....	41
Lampiran 2. Perhitungan nilai ECSA karakterisasi CV.....	46
Lampiran 3. Perhitungan nilai konduktivitas listrik karakterisasi EIS.....	48
Lampiran 4. Tabel data hasil pengolahan variasi laju alir gas hidrogen.....	49
Lampiran 5. Tabel data hasil pengolahan variasi suhu stek.....	51
Lampiran 6. Gambar alat penelitian.....	53

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini keperluan sumber energi sangat mengandalkan sumber energi bahan bakar fosil. Dengan adanya pemakaian bahan bakar fosil secara berkelanjutan maka akan menyebabkan ketersediaan bahan bakar energi fosil menjadi sedikit bahkan semakin jarang ditemukan (Gimba *et al.*, 2015). Dengan adanya kondisi ini maka diperlukan solusi efektif untuk memperoleh sumber energi alternatif yang bersifat ramah lingkungan, salah satunya menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar (Wahyuni, Hakim and Hasrita, 2016). Hidrogen dapat dimanfaatkan menjadi sumber energi alternatif terbarukan karena ketersediannya berlimpah di bumi, suplai hidrogen yang dihasilkan pada aplikasi *fuel cell* sangat bersih karena hanya menimbulkan uap air sebagai emisinya dan energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan lebih lanjut (Hashim *et al.*, 2018). Gas hidrogen akan menghasilkan energi listrik jika direaksikan dengan gas oksigen yang menggunakan rangkaian alat *fuel cell* (Ma’aruf and Widiharsa, 2016).

Fuel cell merupakan alat kimia berbasis reaksi elektrokimia yang mengkonversikan energi kimia menjadi energi listrik dengan produk sampingnya berupa air. Sistem *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) merupakan sistem pengkonversi energi listrik yang sering digunakan karena memiliki efisiensi yang tinggi dan dapat beroperasi pada suhu yang relatif rendah. Salah satu komponen penyusun pada sistem PEMFC yang dapat mempengaruhi kinerja daya hantar listrik yaitu *Membrane Electrode Assembly* (MEA) (Bandlamudi *et al.*, 2018). MEA tersusun atas dua elektroda berupa anoda dan katoda yang terletak pada kedua sisi membran elektrolit berupa membran nafion-212 (Rohendi *et al.*, 2016).

Umumnya sistem PEMFC menggunakan katalis Pd/C. Katalis Pd/C memiliki aktivitas katalis yang baik terhadap nilai ECSA, dapat memberikan kinerja MEA yang optimum berdasarkan variasi yang digunakan dan ketersediaannya berlimpah di bumi (Meng, Zeng and Xie, 2015). Metode penempatan katalis pada elektroda

ada beberapa macam, diantaranya metode *Spraying*, metode *Catalyst Coated Membrane* (CCM) dan metode Doktor *Blade*. Namun metode yang sering digunakan adalah metode *spraying* karena relatif mudah untuk diaplikasikan dengan hasil yang memuaskan dan tidak merusak permukaan elektroda. Metode *spraying* dapat mendistribusikan lapisan katalis ke seluruh permukaan elektroda secara optimal (Rohendi *et al.*, 2016).

Ada parameter lain yang dapat mempengaruhi kinerja MEA pada PEMFC antara lain laju alir gas hidrogen dan suhu stek yang bervariasi (Salam *et al.*, 2020). Variasi laju alir gas hidrogen dapat meningkatkan proses distribusi proton yang akan menghasilkan kinerja terbaik (Gerteisen *et al.*, 2012). Variasi suhu yang digunakan dapat mempengaruhi kelembaban pada membran berupa uap air. Jika uap air yang disuplai telah stabil maka proton yang terdistribusi akan menjadi optimum dan menghasilkan kinerja terbaik (Alberto, Riascos and Pereira, 2010). Kinerja PEMFC dapat dilihat dari kurva polarisasi berupa kurva I-V dan I-P yang menunjukkan hubungan antara tegangan dan densitas arus (Thosar *et al.*, 2019).

Berdasarkan penjelasan ini, dilakukan proses pembuatan dan karakterisasi MEA yang menggunakan katalis Pd/C pada membran nafion-212 dengan metode *spraying*. Dalam penelitian ini digunakan satu jenis MEA dengan katalis Pd/C pada kedua sisi anoda dan katoda. Karakterisasi MEA meliputi metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan metode *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS). MEA yang dihasilkan selanjutnya diuji kinerjanya dengan menggunakan alat *single stack* (stek tunggal) pada laju alir gas hidrogen dan suhu stek bervariasi. Variasi laju alir gas hidrogen yang dilakukan sebesar 100 mL/menit, 200 mL/menit, 300 mL/menit dan 400 mL/menit. Sementara variasi suhu stek yang digunakan berupa suhu ruang, 40°C, 60°C dan 80°C.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana sifat elektrokimia MEA dengan elektroda yang mengandung katalis Pd/C yang menggunakan karakterisasi metode CV dan EIS ?

2. Bagaimana pengaruh laju alir gas hidrogen dan suhu stek yang bervariasi terhadap kinerja MEA dengan katalis Pd/C yang dibuat dengan metode *spraying* dalam *single stack* PEMFC ?

1.3. Tujuan Masalah

1. Melakukan karakterisasi dari aktivitas katalis MEA dengan elektroda yang mengandung katalis Pd/C menggunakan metode CV dan melakukan pengukuran konduktivitas listrik dengan metode EIS.
2. Mengetahui kinerja MEA dalam *single stack* (stek tunggal) PEMFC dengan katalis Pd/C pada variasi laju alir gas hidrogen dan variasi suhu stek.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk memberikan informasi tentang pengaruh laju alir gas hidrogen dan suhu stek, terhadap kinerja MEA Pd/C menggunakan metode *spraying* pada *single stack* PEMFC yang dapat digunakan dalam penerapan sumber energi alternatif terbarukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alberto, L., Riascos, M. and Pereira, D. D. (2010) ‘Controlling operating temperature in pem fuel cells’, *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 4(2004), pp. 137–146.
- Alhabib, A., Gunawan, R. and Sitorus, S. (2014) ‘Penggunaan Monomer Nafion Sebagai Pembawa Proton (H⁺) Dengan Metode Teori Fungsi Kerapatan’, 12(November), pp. 42–44.
- Aristov, N. and Habekost, A. (2015) ‘Cyclic Voltammetry - A Versatile Electrochemical Method Investigating Electron Transfer Processes’, *World Journal of Chemical Education*, Vol. 3, 2015, Pages 115-119, 3(5), pp. 115–119. doi: 10.12691/wjce-3-5-2.
- Ates, M. (2011) ‘Review study of electrochemical impedance spectroscopy and equivalent electrical circuits of conducting polymers on carbon surfaces’, *Progress in Organic Coatings*, 71(1), pp. 1–10. doi: 10.1016/j.porgcoat.2010.12.011.
- Bandlamudi, V. et al. (2018) ‘Study On Electrode Carbon Corrosion Of High Temperature proton Exchange Membrane Fuel Cell’, *Materials Today: Proceedings*, 5(4), pp. 10602–10610. doi: 10.1016/j.matpr.2017.12.393.
- Baroutaji, A. et al. (2016) ‘Materials in PEM Fuel Cells’, in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, pp. 1–30. doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.04006-6.
- Basuli, U. et al. (2012) ‘Properties and degradation of the gasket component of a proton exchange membrane fuel cell\‐A review’, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12(10), pp. 7641–7657. doi: 10.1166/jnn.2012.6627.
- Bonifácio, R. N., Neto, A. O. and Linardi, M. (2013) ‘High Performance Carbon Supported Palladium Catalyst in Anodes of Proton Exchange Membrane Fuel Cell .’, 8, pp. 159–167.
- Bredar, A. R. C. et al. (2020) ‘Electrochemical Impedance Spectroscopy of Metal Oxide Electrodes for Energy Applications’, *ACS Applied Energy Materials*, 3(1), pp. 66–98. doi: 10.1021/acsaem.9b01965.
- Chang, B. Y. and Park, S. M. (2010) ‘Electrochemical impedance spectroscopy’, *Annual Review of Analytical Chemistry*, 3(1), pp. 207–229. doi: 10.1146/annurev.anchem.012809.102211.
- Destyorini, F. et al. (2018) ‘Properties and performance of gas diffusion layer PEMFC derived from coconut coir’, *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 50(3), pp. 409–419. doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2018.50.3.7.

- Dey, T. *et al.* (2019) ‘Study of PEM Fuel Cell End Plate Design by Structural’, *Journal of Energy*, 2019, pp. 1–11.
- Farag, H. A. A. *et al.* (2011) ‘Natural gas dehydration by desiccant materials’, *Alexandria Engineering Journal*, 50(4), pp. 431–439. doi: 10.1016/j.aej.2011.01.020.
- Gerteisen, D. *et al.* (2012) ‘Effect of operating conditions on current density distribution and high frequency resistance in a segmented PEM fuel cell’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(9), pp. 7736–7744. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.02.024.
- Gimba, I. D. *et al.* (2015) ‘Theoretical Energy and Exergy Analyses of Direct Methanol Fuel Cell’, *Advances in Materials Science and Applications*, 4(3), pp. 63–75. doi: 10.5963/amsa0403001.
- Gouws, S. (2012) ‘Voltammetric Characterization Methods for the PEM Evaluation of Catalysts’, *Electrolysis*, (July). doi: 10.5772/48499.
- Hashim, S. S. *et al.* (2018) ‘Perovskite-based proton conducting membranes for hydrogen separation: A review’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(32), pp. 15281–15305. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.06.045.
- Hawa Yulianti, D. *et al.* (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), pp. 139–142. doi: 10.24845/ijfac.v4.i3.139.
- Hou, Y. *et al.* (2012) ‘An investigation of characteristic parameter variations of the polarization curve of a proton exchange membrane fuel cell stack under strengthened road vibrating conditions’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(16), pp. 11887–11893. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.05.030.
- Hsieh, C. Te *et al.* (2013) ‘Pulse microwave synthesis of palladium catalysts on graphene electrodes for proton exchange membrane fuel cells’, *Electrochimica Acta*, 98, pp. 39–47. doi: 10.1016/j.electacta.2013.03.039.
- Irmawati, Y. and Andachiar Oemry, I. (2012) ‘Effect of Hot Pressing Temperature on The Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Based on Gas Diffusion Electrode Carbon Paper and Carbon Cloth’, *Indonesian Journal of Materials Science*, (April), pp. 85–90.
- Kahraman, H. and Orhan, M. F. (2017) ‘Flow field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: Analysis & modeling’, *Energy Conversion and Management*, 133, pp. 363–384. doi: 10.1016/j.enconman.2016.10.053.
- Kannan, A., Kabza, A. and Scholte, J. (2015) ‘Long term testing of start-stop cycles on high temperature PEM fuel cell stack’, *Journal of Power Sources*, 277, pp.

- 312–316. doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.11.115.
- Kheirmand, M. and Asnafi, A. (2011) ‘Analytic parameter identification of proton exchange membrane fuel cell catalyst layer using electrochemical impedance spectroscopy’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(20), pp. 13266–13271. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.08.088.
- Lee, D., Woo, J. and Gil, D. (2017) ‘Cathode / anode integrated composite bipolar plate for high-temperature PEMFC’, *Composite Structures*, 167, pp. 144–151. doi: 10.1016/j.compstruct.2017.01.080.
- Liu, Z., Zhang, X. and Hong, L. (2009) ‘Physical and electrochemical characterizations of nanostructured Pd/C and PdNi/C catalysts for methanol oxidation’, *Electrochemistry Communications*, 11(4), pp. 925–928. doi: 10.1016/j.elecom.2009.02.030.
- Ma’aruf, H. M. and Widiharsa, F. A. (2016) ‘Fuel Cell sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif Pengisi’, *Jurnal Teknik Mesin*, 12(1), pp. 45–54.
- Ma, S. et al. (2021) ‘Fuel cell-battery hybrid systems for mobility and off-grid applications: A review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135(February 2020). doi: 10.1016/j.rser.2020.110119.
- Mahreni (2010) ‘Aplikasi membran nanokomposit sebagai elektrolit sel bahan bakar hidrogen pada proton exchange membrane fuel cell’, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 12(1), pp. 52–58.
- Maiyalagan, T. and Pasupathi, S. (2010) *Components for PEM fuel cells: An overview*, *Materials Science Forum*. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.657.143.
- Majlan, E. H. et al. (2018) ‘Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89(June 2017), pp. 117–134. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.007.
- Mardle, P. and Du, S. (2017) ‘Materials for PEMFC Electrodes’, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2020, pp. 1–13. doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.09260-2.
- Mardwita, Bustan, M. D. and Haryati, S. (2016) ‘Studi Pengaruh Ukuran Partikel Ruthenium dalam Katalis Ru/Al₂O₃ pada Reaksi Hidrogenasi Karbon Monoksida’, *Jurnal Teknik Kimia*, 22(4), pp. 61–68.
- Maulana, M. I., Syahbanu, I. and Harlia (2017) ‘Sintesis dan Karakterisasi Material Konduktif Film Komposit Polipirol (PPy)/Selulosa Bakteri’, *Jkk*, 6(3), pp. 11–18. Available at: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jkkmipa/article/view/22258>.

- Mekhilef, S., Saidur, R. and Safari, A. (2012) ‘Comparative study of different fuel cell technologies’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), pp. 981–989. doi: 10.1016/j.rser.2011.09.020.
- Meng, H., Zeng, D. and Xie, F. (2015) ‘Recent development of Pd-based electrocatalysts for proton exchange membrane fuel cells’, *Catalysts*, 5(3), pp. 1221–1274. doi: 10.3390/catal5031221.
- Nguyen, T. N. and Dinh, C. T. (2020) ‘Gas diffusion electrode design for electrochemical carbon dioxide reduction’, *Chemical Society Reviews*, 49(21), pp. 7488–7504. doi: 10.1039/d0cs00230e.
- O’Hayre, R. P. (2017) *Fuel cells for electrochemical energy conversion, EPJ Web of Conferences*. doi: 10.1051/epjconf/201818900011.
- Ogungbemi, E. et al. (2021) ‘Selection of proton exchange membrane fuel cell for transportation’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(59), pp. 30625–30640. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.147.
- Ong, B. C. et al. (2016) ‘Applications of graphene nano-sheets as anode diffusion layers in passive direct methanol fuel cells (DMFC)’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(14), pp. 9252–9261. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.094.
- Park, S., Lee, J. W. and Popov, B. N. (2012) ‘A review of gas diffusion layer in PEM fuel cells: Materials and designs’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(7), pp. 5850–5865. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.12.148.
- Prykhodko, Y. et al. (2021) ‘Progress in hybrid composite Nafion®-based membranes for proton exchange fuel cell application’, *Chemical Engineering Journal*, 409, p. 127329. doi: 10.1016/j.cej.2020.127329.
- Pujiastuti, S. and Onggo, H. (2016) ‘Effect of various concentration of sulfuric acid for Nafion membrane activation on the performance of fuel cell’, *AIP Conference Proceedings*, 1711. doi: 10.1063/1.4941639.
- Qin, C. et al. (2016) ‘Proton exchange membrane fuel cell reversal: A review’, *Catalysts*, 6(12), pp. 1–21. doi: 10.3390/catal6120197.
- Rabbani, A. and Rokni, M. (2013) ‘Effect of nitrogen crossover on purging strategy in PEM fuel cell systems’, *Applied Energy*, 111, pp. 1061–1070. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.06.057.
- Randviir, E. P. and Banks, C. E. (2013) *Electrochemical Impedance Spectroscopy - an overview, Anal. Methods.* Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/electrochemical-impedance-spectroscopy>.

- Rezaei Niya, S. M. and Hoofar, M. (2013) ‘Study of proton exchange membrane fuel cells using electrochemical impedance spectroscopy technique - A review’, *Journal of Power Sources*, 240, pp. 281–293. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.04.011.
- Rohendi, D. et al. (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), pp. 9431–9437. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.03.093.
- Rohendi, D. et al. (2015) ‘Effects of temperature and backpressure on the performance degradation of MEA in PEMFC’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), pp. 10960–10968. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.161.
- Rohendi, D. et al. (2016) ‘Comparison of The Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Electrodes with Different Carbon Powder Content and Methods of Manufacture’, *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 1(3), pp. 61–66. doi: 10.24845/ijfac.v1.i3.61.
- Rohendi, D. et al. (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). doi: 10.1088/1742-6596/1282/1/012065.
- Rohendi, D., Rachmat, A. and Syarif, N. (2018) ‘Fabrication and Characterization of Pt-Co/C Catalyst for Fuel Cell Electrode’, *Journal of Physics: Conference Series*, 1095(1), pp. 0–5. doi: 10.1088/1742-6596/1095/1/012007.
- Sadeghi, S. and Baniasad Askari, I. (2020) ‘Performance and economic investigation of a combined phosphoric acid fuel cell/organic Rankine cycle/electrolyzer system for sulfuric acid production; Energy-based organic fluid selection’, *International Journal of Energy Research*, 44(4), pp. 2704–2725. doi: 10.1002/er.5073.
- Safitri, I. A. et al. (2016) ‘Uji Kinerja Smart Gried Fuel Cell Tipe Proton Exchange Membran (PEM) Dengan Penmbahan Hidrogen’, *Jurnal Ilmiah Inovasi*, 16(1). doi: 10.25047/jii.v16i1.2.
- Salam, M. A. et al. (2020) ‘Effect of Temperature on the Performance Factors and Durability of Proton Exchange Membrane of Hydrogen Fuel Cell: A Narrative Review’, *Material Science Research India*, 17(2), pp. 179–191. doi: 10.13005/msri/170210.
- San Martín, J. I. et al. (2010) ‘Performance analysis of a PEM fuel cell’, *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(8), pp. 735–740. doi: 10.24084/repqj08.456.

- Sandford, C. *et al.* (2019) ‘A synthetic chemist’s guide to electroanalytical tools for studying reaction mechanisms’, *Chemical Science*, 10(26), pp. 6404–6422. doi: 10.1039/c9sc01545k.
- Sharaf, O. Z. and Orhan, M. F. (2014) ‘An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, pp. 810–853. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.012.
- Shiva Kumar, S. *et al.* (2018) ‘Phosphorus-doped graphene supported palladium (Pd/PG) electrocatalyst for the hydrogen evolution reaction in PEM water electrolysis’, *International Journal of Green Energy*, 15(10), pp. 558–567. doi: 10.1080/15435075.2018.1508468.
- Thosar, A. U. *et al.* (2019) ‘Comprehensive analytical model for polarization curve of a PEM fuel cell and experimental validation’, *Chemical Engineering Science*, 206, pp. 96–117. doi: 10.1016/j.ces.2019.05.022.
- Wahyuni, S., Hakim, L. and Hasfita, F. (2016) ‘Pemanfaatan Limbah Kaleng Minuman Aluminium sebagai Penghasil Gass Hidrogen menggunakan Katalis Natrium Hidroksida (NaOH)’, *Teknologi Kimia Unimal*, 5(1), pp. 92–104.
- Wu, F. *et al.* (2018) ‘Degradation of silicone rubbers as sealing materials for proton exchange membrane fuel cells under temperature cycling’, *Polymers*, 10(5). doi: 10.3390/polym10050522.
- Wulandari, R. *et al.* (2016) ‘Penentuan Kapasitanasi Spesifik Karbon Aktif Tempurung Kemiri (Alleurites mollucana) Hasil Modifikasi Dengan HNO₃, H₂SO₄, dan H₂O₂ Menggunakan Metode Cyclic Voltammetry’, *Jurnal Indonesia*, pp. 1–10. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/77629397.pdf>.
- Zhang, Jianlu *et al.* (2006) ‘PEM fuel cell open circuit voltage (OCV) in the temperature range of 23 °C to 120 °C’, *Journal of Power Sources*, 163(1 SPEC. ISS.), pp. 532–537. doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.09.026.
- Zhang, Jianlu *et al.* (2013) *Design and Fabrication of PEM Fuel Cell MEA, Single Cell, and Stack, Pem Fuel Cell Testing and Diagnosis*. doi: 10.1016/b978-0-444-53688-4.00002-4.
- Zhu, Y., Zhu, W. H. and Tatarchuk, B. J. (2014) ‘Performance comparison between high temperature and traditional proton exchange membrane fuel cell stacks using electrochemical impedance spectroscopy’, *Journal of Power Sources*, 256, pp. 250–257. doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.049.