

**UJI KINERJA SERTA KETAHANAN *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) DENGAN KATALIS Pt-Co/C DAN Pt/C PADA *PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL* (PEMFC)**

**SKRIPSI**

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



**Oleh :**

**DEVI INDAH CHAIRANI**

**08031181823103**

**JURUSAN KIMIA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA  
2022**

## **HALAMAN PENGESAHAN**

### **UJI KINERJA SERTA KETAHANAN *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA)* DENGAN KATALIS Pt-Co/C DAN Pt/C PADA *PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)***

#### **SKRIPSI**

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

Oleh :

**DEVI INDAH CHAIRANI**

**08031181823103**

Inderalaya, 25 Juli 2022

Mengetahui,

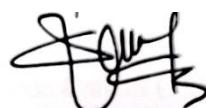
**Pembimbing I**



**Dr. Dedi Rohendi, M.T**

NIP. 196704191993031001

**Pembimbing II**



**Dra. Julinar, M.Si**

NIP. 196507251993032002

**Dekan FMIPA**



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

NIP. 197111191997021001

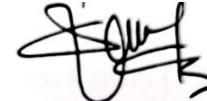
## HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi ini dengan judul “Uji Kinerja serta Ketahanan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan Katalis Pt-Co/C dan Pt/C pada *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC)”, telah dipertahankan dihadapan Tim Pengudi Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 19 Juli 2022 dan telah diperbaiki, diperiksa serta disetujui sesuai masukan yang diberikan.

Indralaya, 25 Juli 2022

Pembimbing:

1. **Dr. Dedi Rohendi, M.T**  
NIP. 196704191993031001
2. **Dra. Julinar, M.Si**  
NIP. 196507251993032002

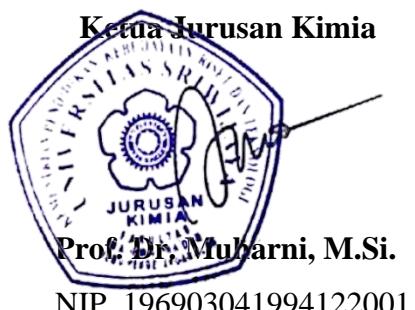
(  )  
(  )

Pengaji:

1. **Dr. Zainal Fanani, M.Si**  
NIP. 196708211995121001
2. **Nova Yuliasari, M.Si**  
NIP. 197307261999032001

(  )  
(  )

Mengetahui,



## **PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH**

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama Mahasiswa : Devi Indah Chairani

NIM : 08031181823103

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, 25 Juli 2022

Penulis



Devi Indah Chairani  
NIM. 08031181823103

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

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

Nama Mahasiswa : Devi Indah Chairani  
NIM : 08031181823103  
Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia  
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya (hak bebas royalty non-ekslusif (*non-exclusively royalty-free right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul : “Uji Kinerja serta Ketahanan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan Katalis Pt-Co/C dan Pt/C pada *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC)”. Dengan hak bebas royalty non-ekslusif 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, 25 Juli 2022

Yang menyatakan,



Devi Indah Chairani  
NIM. 08031181823103

## **HALAMAN PERSEMBAHAN**

*“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”*

**Q.S. Al Insyirah 94:5-6**

*“Jangan menyesali apapun yang terjadi dalam hidup kita, sekalipun banyak hal buruk yang kita alami, yakin semua bakal ada akhirnya”*

*Untuk kedua orang tua dan saudara/iku  
Sahabat-sahabatku  
Almamaterku  
Skripsi ini kupersembahkan untuk kalian*

*“Waktu yang singkat memiliki kenangan yang hebat”*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas ridho dan izin-Nya lah penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Uji Kinerja serta Ketahanan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan Katalis Pt-Co/C dan Pt/C pada *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC)” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains bidang kimia. Penulisan skripsi ini tidak luput dari bantuan, bimbingan, serta doa dari banyak pihak yang terlibat terutama Bapak Dr. Dedi Rohendi, M.T serta ibu Dra. Julinar, M.Si yang telah memberikan banyak kebaikan dan kemudahan kepada penulis selama ini. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Hermansyah, S.Si, M.Si, Ph.D selaku dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.
2. Ibu Prof. Dr. Muhamni, M.Si selaku ketua jurusan Kimia dan bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si selaku sekretaris jurusan Kimia.
3. Bapak Dr. Zainal Fanani, M.Si dan Ibu Nova Yuliasari, M.Si selaku dosen penguji sidang sarjana dan Bapak Dr. Ady Mara, M.Si selaku dosen pembahas seminar hasil.
4. Kak Iin dan mbak Novi selaku admin jurusan kimia yang telah membantu proses administrasi serta semua dosen dan karyawan yang tidak dapat disebutkan satu persatu, yang telah banyak memberikan ilmu selama penulis mengemban dunia perkuliahan.
5. Papa dan Mama yang telah memberikan *support*, semangat, mendoakan serta selalu ada disisi penulis dari awal penulis memulai sampai penulis menyelesaikan bangku perkuliahan.
6. Saudara/i kandung penulis yaitu bang Deny dan kak Putri yang banyak sekali memberikan semangatnya, membantu urusan materi maupun tenaga, serta Lala yang menjadi *partner* bersenang-senang dikala penulis mengalami kesulitan.
7. Keluarga besar Hamdan Rosnida, terima kasih banyak atas dukungan dan doa yang diberikan kepada penulis.

8. Vira Febriyanti sahabatku sejak SMA, tempat penulis bisa meluapkan segala keluh kesah maupun permasalahan yang sedang menimpa penulis, tempat menceritakan semua hal-hal baik yang terjadi, tempat penulis bisa bertukar pemikiran tentang segala hal dalam kehidupan penulis, *support system* penulis, nasehat maupun semangat dari kamu mampu membuat penulis menjadi lebih tegar. Terima kasih untuk selalu ada buat penulis, *I love you more than you know* sahabat terbaikku selamanya
9. Rolis Sulistiawati, untuk semangatmu, nasehatmu, kasih sayangmu, bantuanmu dan kamu yang tidak pernah meninggalkan penulis dalam kondisi apapun, penulis sangat bersyukur untuk hal itu. Jessica Ajeng Putri, berbagi kisah dan mengutarakan pikiran bersama kamu adalah hal yang sangat menyenangkan, kenangan baik maupun permasalahan yang udah kita lalui menjadi momen penting dalam hidup penulis. Nurisa Layla Imtihana, menjalankan keseharian yang berat dalam dunia perkuliahan dengan tawa dan kisah yang kita lewati membuat semua hal menjadi semakin lebih ringan. Ade Dwi Nanda, segala hal positif dan ucapan bijak yang kamu berikan menuntun penulis berjalan ke arah yang tepat, memberikan pemikiran lebih luas dan terbuka tentang segala hal yang penulis jalani. Segala hal yang kita semua alami dan kita rasakan selama 4 tahun ini, menjadi sesuatu yang berharga dan tidak akan pernah terlupakan. Penulis berharap persahabatan ini tetap terjalin selamanya. Untuk keempat sahabatku, maaf dan terima kasih banyak.
10. Suteja, seseorang yang sangat baik dan selalu ada dikala penulis membutuhkan bantuan. Tempat penulis bisa menceritakan segala hal, entah itu hal buruk maupun hal baik. Tempat penulis bertanya ketika penulis kehilangan arah, yang selalu menenangkan penulis saat penulis merasa jemu. Memberikan banyak masukan, nasehat dan mengingatkan penulis disaat penulis melakukan kesalahan. Memberikan tebengan layo-palembang walau penulis tau kamu pasti capek. Kamu adalah orang yang sangat berarti buat penulis, sahabat yang menyenangkan.

11. Mahdi, sejak sekelompok dengan kamu waktu praktikum KD I sampai sekarang kita masih sahabatan, kamu yang selalu mau mendengarkan curhatan, kesedihan serta cerita kebahagiaan penulis dan juga sudah mau merespon segala hal tidak penting yang penulis ceritakan ke kamu, memberikan semangat dan nasehat, membantu penulis dikala penulis kebingungan, terima kasih dan maaf banget telah sangat merepotkan kamu. Iqbal Surya Maulana, teman cowo pertamaku di jurusan kimia. Mengenal dan bersahabat dengan kamu mengajarkanku banyak hal, tentang kamu yang menghilang dari jurusan, tentang kamu yang menunjukkan kalau dunia tidak terbatas pada lingkungan perkuliahan saja, kamu yang membantuku belajar walau sampai subuh, kamu yang selalu merespon curhatanku tentang beratnya dunia yang kualami, terima kasih dan maaf.
12. Kak Dwi, mentor penulis yang sangat baik dan lembut hatinya, terima kasih banyak kak untuk ilmu yang kakak berikan, untuk semangat yang kakak kasih kepada penulis dan maaf telah banyak merepotkan kakak. Kak Reka, terima kasih banyak untuk nasehat yang kakak berikan dan segala bantuan yang penulis terima dari kakak. Kak Icha, untuk segala keceriaan kakak, info promo yang kakak berikan kepada penulis, terima kasih banyak kak.
13. Qurotul Aini, Iren Martha, Agesta, Nurhidayah, Maria Ulfa, Igam Aini Utami, Rahmawati, teman-teman seperjuangan sejak maba sampai sekarang, kita hebat sudah melewati segala rintangan dalam dunia perkuliahan, penulis sangat bersyukur dan berterima kasih sudah diberikan kesempatan mengenal dan berteman dengan kalian. Untuk kisah dan kenangan yang udah kita lewati bersama, terima kasih banyak.
14. Rafly Anada Lafatah, mantan *partner* hidup yang kukenal sejak Juni 2021. Kamu hadir dikeadaan penulis yang sangat kacau, membawa keceriaan dan kebahagiaan. Masa semester akhir merupakan masa yang sangat berat buat penulis, dengan hadirnya kamu saat itu memberikan perasaan *up and down* tetapi tetap menjadi kenangan indah dan pelajaran berharga. Kamu harus tau kamu orang yang hebat dan orang yang menyenangkan, penulis bersyukur bisa dapat mengenal kamu lebih jauh.

15. Anindita Zahara, teman yang kukenal sejak belum datang ke Indralaya, yang menemani penulis daftar ulang sampai sekarang kita ditakdirkan menjadi *partner* Tugas Akhir. Mengenal kamu dengan segala tingkah laku yang memusingkan, Anin yang selalu tidak sabaran, hidupnya juga terlalu dibawa santai, terima kasih banyak untuk semua yang sudah kita lewati bersama. Eko Afrizal, *partner* tim Pt-Co/C, teman berantemku selama penelitian, yang sudah banyak membantu mengurus penulis dan Anin yang sangat merepotkan ini, terima kasih banyak. Ayok dikit lagi S.Si, semangat.
16. Yessi adek asuhku yang selalu mendengarkan curhatan penulis, memberikan penulis semangat dan memberikan kebahagiaan juga dalam kehidupan perkuliahan penulis sejak penulis mengenal kamu, terima kasih banyak. Neneng dan Lia, dua sejoli menggemaskan yang selalu heboh dengan keceriannya, kalian sangat lucu dan menyenangkan, terima kasih banyak. Kartika, Gatri, Annash, Yollan, adik-adikku angkatan 2019 yang cantik dan baik sekali hatinya, terima kasih banyak untuk kebaikan dan semangat yang kalian berikan untuk penulis. Semangat menempuh dunia Tugas Akhir dan ditunggu kabar baiknya.
17. Adihyaksa Dharma Seda, adikku tersayang. Walau kita baru mengenal kurang lebih 1 tahun belakangan ini, kamu sangat memberikan kesan yang berarti. Kamu yang selalu sabar dan memberikan masukan disaat penulis stres, segala curhatan dan kesedihan penulis selalu kamu Dengarkan. Adik ambis yang menyenangkan, terima kasih banyak.
18. Puputri Alda, dan Putri Sartika Sari. Kedua sahabatku yang sudah lama sekali penulis tidak bertemu kalian, terima kasih banyak untuk segalanya. Penulis sangat bersyukur bisa memiliki kalian, semangat untuk kita di dunia yang sangat keras ini. Suatu saat harus main bareng lagi ya.
19. BIGAL, sahabat-sahabatku sejak SMA terima kasih banyak untuk *support* yang kalian berikan. Semangat untuk kita semua yang masih berjuang dalam kehidupan ini, semoga kita bisa segera dipertemukan lagi tetapi harus *full team* yak.

20. Tere, Dilla, Shinta, Syakira, Erida, Pithri, untuk adik-adik Angkatan 2020 yang sangat menggemarkan, terima kasih banyak sudah memberikan kesan dan warna dalam perkuliahan penulis. Semangat selalu untuk kalian, masih ada 2 tahun lagi menuju S.Si, yang kuat yah di kimia.
21. Anas, Jepri, Maul, Agung, kalian hadir memberikan kebahagiaan kepada penulis di akhir masa perkuliahan penulis yang sangat membuat sengsara ini dengan canda tawa dan tingkah lucu kalian. Terima kasih banyak untuk kalian dan semangat untuk Tugas Akhir kalian, ditunggu kabar baiknya. Terutama Anas, maaf ya penulis sering merepotkan dengan selalu curhat tentang kesedihan, *support* dan kalimat bijak dari kamu kemarin benar-benar sangat berarti.
22. Tim PUR kloter 1 (Igam,Fatma,Cici,Ilyas,Balqis,Irma,Anin,Sandi,Delima, Marya,Sabrina) dan Tim PUR kloter 2 (Ade, Dinda, Eko, Suteja, Martha, Nadia,Prima,Gifar,Keke), kalian semua orang-orang hebat yang mampu melewati tekanan selama semester akhir ini, terima kasih banyak untuk bantuan dan semangat yang kalian berikan. Tetap semangat sampai akhir.
23. BPH Kabinet Konstelasi Cita, pengalaman yang penulis lewati selama menjadi pengurus bersama rekan-rekan seperjuangan adalah pengalaman berharga yang belum tentu penulis dapatkan di lain waktu. Terima kasih untuk kenangan indahnya terutama *partner* kebendaharaanku, Aini dan Rahma.
24. Teman-teman Angkatan 2018 yang tidak dapat disebutkan satu persatu, senang bisa mengenal kalian semua. Terima kasih untuk segala hal yang kita lewati bersama.
25. Kakak-kakak Angkatan 2015, 2016, dan 2017, terima kasih untuk ilmu yang banyak sekali penulis dapatkan dari kalian.
26. Adik-adik Angkatan 2019 dan 2020 lainnya, penulis bersyukur bisa lebih mengenal kalian sebagai praktikan saat menjadi koas kalian ataupun saat menjadi asisten kalian. Tetap semangat di kimia.
27. Untuk semua pihak maupun orang-orang yang penulis kenal, terima kasih banyak.

28. Terakhir, untuk diriku Devi Indah Chairani. Ketika kamu membaca skripsi ini beberapa tahun kemudian, kamu harus tau dititik ini, kamu adalah perempuan yang sangat hebat, kamu kuat, kamu tabah dan kamu berusaha bertahan ditengah kesedihan dan penderitaan. Walau sekarang kamu masih belum bisa tertawa lepas, belum merasa bahagia sepenuhnya, tapi kamu selalu percaya setiap luka pasti ada sembahnya. Semoga bisa kutemukan senyum penuh rasa syukur dalam diri kamu dimasa depan nanti.

Penulis menyadari masih banyak terdapat kekurangan dalam karya tulis ini serta jauh dari kata sempurna, sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca. Penulis ucapkan terima kasih, semoga karya tulis ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi kepada orang-orang yang membutuhkan.

Palembang, 25 Juli 2022

Penulis

## SUMMARY

### **PERFORMANCE AND DURABILITY TEST ON THE *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA)* USING CATALYST Pt-Co/C PADA PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)**

Devi Indah Chairani, supervised by Dr. Dedi Rohendi M.T dan Dra. Julinar, M.Si  
Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Sriwijaya University  
xix + 52 Pages, 8 Pictures, 7 Attachments

The research about has been carried out on performance and durability tests on the Membrane Electrode Assembly (MEA) using 40% Pt-Co/C electrodes at the anode and 12.5% Pt/C electrodes at the cathode in PEMFC has been done. MEA consists of electrodes and electrolyte membrane in the form of Nafion 212 membrane. The electrodes are made by spraying catalyst layer onto the surface of the gas diffusion layer (GDL), the resulting two electrodes are then fixed to the Nafion 212 membrane. MEA was characterized using cyclic voltammetry (CV) method to determine the site active electrochemistry in MEA by observing the value of electrochemical surface area (ECSA) used and electrical conductivity in MEA. Based on the characterization results, the ECSA value was  $60.032 \text{ cm}^2/\text{mg}$  and the electrical conductivity value was  $1.47 \times 10^{-6} \text{ S/cm}$  which produced I-V curve and I-P. Performance test showed the power density value was  $10.7568 \text{ mW/cm}^2$  and the optimum current density value was  $33.2 \text{ A/cm}^2$ . Endurance test on MEA for 6 hours showed that the initial voltage of 0.242 V dropped to 0.210 V with a difference of 0.032 V.

Keywords : Pt-Co/C, *Membrane Electrode Assembly (MEA)*, *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*

Citations : 60 (2009-2022)

## **RINGKASAN**

### **UJI KINERJA SERTA KETAHANAN *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA)* DENGAN KATALIS Pt-Co/C PADA PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)**

Devi Indah Chairani, dibimbing oleh Dr. Dedi Rohendi M.T dan Dra. Julinar, M.Si Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya  
xix + 52 Halaman, 8 Gambar, 7 Lampiran

Telah dilakukan penelitian mengenai uji kinerja dan uji ketahanan pada *Membrane Electrode Assembly (MEA)* menggunakan elektroda Pt-Co/C 40% pada anoda dan elektroda Pt/C 12,5% pada katoda dalam PEMFC. MEA terdiri dari elektroda dan membran elektrolit berupa membran nafion 212. Elektroda dibuat dengan menyemprotkan lapisan katalis keatas permukaan *Gas Diffusion Layer (GDL)*, kedua elektroda yang dihasilkan kemudian ditempelkan ke sisi membran nafion 212. MEA dikarakterisasi menggunakan metode *cyclic Voltammetry (CV)* untuk mengetahui situs aktif elektrokimia pada MEA dengan melihat nilai *Electrochemical Surface Area (ECSA)* dan menggunakan metode *Electrode Impedance Spectroscopy (EIS)* untuk mengetahui nilai konduktivitas elektrik pada MEA. Berdasarkan hasil karakterisasi, didapatkan nilai ECSA sebesar 60,032 cm<sup>2</sup>/mg dan nilai konduktivitas elektrik sebesar  $1,47 \times 10^{-6}$  S/cm. Uji kinerja pada MEA dilakukan dengan mengukur tegangan sel pada kondisi beban bervariasi yang menghasilkan kurva I-V dan I-P. Uji kinerja menunjukkan nilai densitas daya optimum sebesar 10,7568 mW/cm<sup>2</sup> dan densitas arus arus optimum sebesar 33,2 mA/cm<sup>2</sup>. Uji ketahanan pada MEA selama 6 jam menunjukkan tegangan awal sebesar 0,242 V yang mengalami penurunan menjadi 0,210 V dengan selisih sebesar 0,032 V.

Kata Kunci : Pt-Co/C, *Membrane Electrode Assembly (MEA)*, *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*

Situs : 60 (2009-2022)

## DAFTAR ISI

<b>COVER .....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vii</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>xiii</b>
<b>RINGKASAN .....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xviii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Fuel Cell .....	4
2.2 Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) .....	6
2.3 Komponen Penyusun PEMFC .....	7
2.3.1 Membrane Electrode Assembly (MEA) .....	7
2.3.1.1 <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL) .....	8
2.3.1.2 <i>Catalyst Layer</i> (CL).....	9
2.3.1.3 Membran Elektrolit Nafion .....	11
2.3.2 Plat Bipolar.....	12
2.3.3 Gasket .....	132
2.3.4 End Plate.....	13
2.4 Platina.....	14

2.5	Kobalt.....	15
2.6	Karakterisasi Membrane Electrode Assembly (MEA) .....	15
	2.6.1 <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV).....	15
	2.6.2 Pendekatan <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS) .....	16
2.7	Kurva Polarisasi .....	17
<b>BAB III</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>18</b>
3.1	Waktu dan Tempat .....	37
3.2	Alat dan Bahan.....	18
	3.2.1 Alat .....	37
	3.2.2 Bahan.....	18
3.3	Prosedur Penelitian.....	37
	3.3.1 Pembuatan Elektroda.....	37
	3.3.2 Pembuatan MEA (Membrane Electrode Assembly) .....	19
	3.3.3 Karakterisasi Membrane Electrode Assembly (MEA).....	38
	3.3.3.1 Pengujian Sifat Elektrokimia Menggunakan Metode Cyclic Voltammetry (CV).....	38
	3.3.3.2 Pengukuran Konduktivitas Elektrik Metode EIS .....	20
	3.3.4 Uji Kinerja dan Daya Tahan MEA .....	20
	3.3.5 Analisis Data .....	40
	3.3.5.1 Analisis <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV).....	40
	3.3.5.2 Analisis <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS) .....	40
	3.3.5.3 Analisis Kinerja dan Daya Tahan MEA .....	40
<b>BAB IV</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>23</b>
4.1	Elektroda Pt-Co/C dan Pt/C serta MEA.....	23
4.2	Karakteristik MEA.....	24
	4.2.1 Nilai ECSA dari Metode <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV) .....	24
	4.2.2 Nilai konduktivitas Elektrik dari Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS) .....	25
4.3	Kinerja Membrane Electrode Assembly (MEA).....	27
	4.3.1 Kurva I-V pada <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA) .....	27
	4.3.2 Kurva I-P pada <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA) .....	28

4.4 Daya Tahan pada Membrane Electrode Assembly (MEA).....	29
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>32</b>
5.1 Kesimpulan .....	32
5.2 Saran.....	32
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>33</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>39</b>

## **DAFTAR GAMBAR**

Gambar 1. Skema kerja fuel cell .....	5
Gambar 2. Komponen penyusun PEMFC.....	6
Gambar 3 a) GDL ; b) Elektroda Pt-Co/C ; c) Elektroda Pt/C.....	23
Gambar 4. Kurva Voltammogram MEA.....	24
Gambar 5. Kurva <i>Nyquist</i> MEA Pt/C dan Pt-Co/C.....	26
Gambar 6. Kurva I-V MEA .....	27
Gambar 7. Kurva I-P MEA .....	29
Gambar 8. Kurva pengaruh waktu kinerja terhadap MEA .....	30

## **DAFTAR LAMPIRAN**

<b>Lampiran 1. Skema Kerja.....</b>	<b>40</b>
<b>Lampiran 2. Perhitungan Komponen Elektroda .....</b>	<b>41</b>
<b>Lampiran 3. Perhitungan Nilai ECSA .....</b>	<b>43</b>
<b>Lampiran 4. Perhitungan nilai konduktivitas listrik.....</b>	<b>46</b>
<b>Lampiran 5. Data hasil uji kinerja MEA.....</b>	<b>48</b>
<b>Lampiran 6. Data Hasil Uji Daya Tahan pada MEA .....</b>	<b>49</b>
<b>Lampiran 7. Bahan dan Alat Penelitian .....</b>	<b>50</b>

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Energi merupakan salah satu kebutuhan pokok manusia dimana energi biasanya dihasilkan dari bahan bakar fosil. Namun bahan bakar fosil semakin lama semakin berkurang dan tidak dapat diperbaharui, sehingga dicari alternatif lain yaitu dengan penggunaan bahan bakar berupa hidrogen melalui perangkat alat bernama *fuel cell*. *Fuel cell* merupakan sel elektrokimia yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik (Wisojodharso, Arti and Dewi, 2012). *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang menjanjikan untuk konversi energi terbarukan dan berkelanjutan dengan bahan bakar berupa hidrogen yang menghasilkan energi yang ramah lingkungan dengan hasil akhir berupa air sehingga teknologi ini diharapkan dapat menjadi sumber energi yang efisien serta bebas polutan dan memiliki densitas energi yang tinggi dibandingkan dengan sumber energi konvensional lainnya (Majlan *et al.*, 2018). PEMFC terdiri dari beberapa komponen seperti *Membrane Electrode Assembly* (MEA), plat bipolar, gasket dan *end plate* (plat penutup) (Lamy *et al.*, 2011)

*Membrane Electrode Assembly* (MEA) merupakan inti dari PEMFC. MEA termasuk komponen yang paling penting karena dibuat dengan menggabungkan beberapa bagian seperti kertas karbon yang mengandung katalis, larutan nafion, dan zat hidrofobik serta membran elektrolit polimer (Huah *et al.*, 2020). Platinum (Pt) digunakan sebagai bahan dalam lapisan katalis pada penelitian ini karena merupakan elektrokatalis yang sangat konduktif serta memiliki aktivitas katalitik yang tinggi dan stabilitas kimia yang sangat baik dalam mereduksi oksigen dan mengoksidasi hidrogen pada pengoperasian PEMFC (Lim *et al.*, 2021). Namun katalis platina merupakan katalis yang sangat mahal, sehingga diperlukan paduan berupa logam lain untuk mengurangi biaya dalam penggunaan Pt. Melalui paduan logam transisi seperti V, Cr, Ti, Fe, Co, dan Ni dengan Pt, paduan berbasis Pt menunjukkan aktivitas elektrokatalitik yang lebih tinggi pada reaksi reduksi

oksidasi dan memiliki ketahanan terhadap oksidasi yang lebih baik daripada Pt murni (Hsu *et al.*, 2013). Berdasarkan studi literatur Ohyagi and Sasaki (2013) yang menggunakan katalis Pt-Co/C komersial dengan komposisi Pt 47% dan Co 4,7% serta loading katalis 0,4 mg/cm<sup>2</sup> menunjukkan bahwa katalis Pt-Co/C memiliki aktivitas katalitik yang tinggi dan daya tahan pada pengujian terhadap tegangan yang baik. Karbon ditambahkan kedalam paduan katalis Pt-Co sebagai *support* karena memiliki struktur yang berpori, luas permukaan dan konduktivitas yang tinggi serta stabilitas kimia dan termal yang baik (Prithi *et al.*, 2021).

Kinerja MEA bergantung pada banyak faktor, diantaranya kinerja pada *gas diffusion layer* (GDL) dan kinerja *catalyst layer* (CL) serta proses pembuatan elektroda dan MEA. Pada penelitian ini akan dilakukan pembuatan MEA pada PEMFC dengan menggunakan paduan katalis antara Platina dan Kobalt sebagai anoda dan katalis Pt/C komersial sebagai katoda. Karakterisasi MEA adalah tahap yang sangat penting untuk menilai tingkat kesesuaian MEA yang akan digunakan. MEA dikarakterisasi menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk menghitung area aktif elektrokimia pada MEA dan metode *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) untuk mengkarakterisasi impedansi elektrokimia pada MEA dan untuk melihat karakteristik elektrik pada MEA. MEA juga diuji kinerja dan ketahanannya pada sel tunggal *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) terhadap tegangan pada arus tertentu selama 6 jam. Penelitian sebelumnya (Nugraha, 2019) telah melakukan uji kinerja terhadap MEA Pt-Co/C pada *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) yang menunjukkan nilai kerapatan daya pada MEA sebesar 2,6 mW/cm<sup>2</sup> pada saat tegangan sebesar 0,478 V dan arus sebesar 7,4 mA/cm<sup>2</sup>, tetapi pada penelitian sebelumnya tidak dilakukan uji ketahanan terhadap MEA pada sel tunggal DMFC. Penggunaan DMFC dapat menghasilkan CO<sub>2</sub> yang menyebabkan adanya polutan sehingga pada penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan MEA dengan kinerja dan ketahanan yang baik pada PEMFC sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi yang efisien serta bebas polutan dengan hasil akhir berupa air.

## 1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana hasil karakterisasi *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan katalis Pt-Co/C dan Pt/C pada elektroda?
2. Bagaimana hasil uji kinerja dan ketahanan yang dilakukan terhadap *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan katalis Pt-Co/C dan Pt/C pada sel tunggal PEMFC?

### **1.3. Tujuan Penelitian**

1. Membuat *Membrane Electrode Assembly* (MEA) menggunakan elektroda Pt-Co/C pada anoda dan elektroda Pt/C pada katoda dan melakukan karakterisasi menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan metode *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS).
2. Menguji kinerja dan ketahanan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) menggunakan elektroda Pt-Co/C di anoda dan elektroda Pt/C di katoda pada sel tunggal PEMFC.

### **1.4. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pembuatan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) menggunakan elektroda Pt-Co/C pada anoda dan elektroda Pt/C pada katoda, karakterisasi *Membrane Electrode Assembly* (MEA) pada sel tunggal PEMFC dan uji kinerja serta ketahanan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan menggunakan elektroda Pt-Co/C dan elektroda Pt/C pada sel tunggal PEMFC sehingga dapat diterapkan dalam pengoperasian PEMFC.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aiyejina, A. and Sastry, M. K. S. (2012) ‘PEMFC flow channel geometry optimization: A review’, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 9(1). doi: 10.1115/1.4005393.
- Arenas, L. F. et al. (2020) ‘Effect of airbrush type on sprayed platinum and platinum-cobalt catalyst inks: Benchmarking as PEMFC and performance in an electrochemical hydrogen pump’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(51), pp. 27392–27403. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.292.
- Ashok, A. et al. (2019) ‘Influence of fuel ratio on the performance of combustion synthesized bifunctional cobalt oxide catalysts for fuel cell application’, *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 436–445. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.111.
- Bonifácio, R. N. et al. (2011) ‘Catalyst layer optimization by surface tension control during ink formulation of membrane electrode assemblies in proton exchange membrane fuel cell’, *Journal of Power Sources*, 196(10), pp. 4680–4685. doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.01.010.
- Branco, C. M., El-kharouf, A. and Du, S. (2020) *Materials for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFCs): Electrolyte Membrane, Gas Diffusion Layers and Bipolar Plates, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/b978-0-12-815732-9.00011-5.
- Chen, M. et al. (2020) ‘Research progress of catalyst layer and interlayer interface structures in membrane electrode assembly (MEA) for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system’, *eTransportation*, 5, p. 100075. doi: 10.1016/j.etrans.2020.100075.
- Chi, B. et al. (2018) ‘Tuning hydrophobic-hydrophilic balance of cathode catalyst layer to improve cell performance of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) by mixing polytetrafluoroethylene (PTFE)’, *Electrochimica Acta*, 277, pp. 110–115. doi: 10.1016/j.electacta.2018.04.213.
- Chong, L. et al. (2018) ‘Ultralow-loading platinum-cobalt fuel cell catalysts derived from imidazolate frameworks’, *Science*, 362(6420), pp. 1276–1281. doi: 10.1126/science.aau0630.
- Dey, T. et al. (2019) ‘Study of PEM Fuel Cell End Plate Design by Structural’, 2019.
- Farid, I. et al. (2019) ‘Low loaded platinum (Pt) based binary catalyst electrode for PEMFC by plasma co-sputtered deposition method’, *Materials Chemistry and Physics*, 236(June), p. 121796. doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.121796.
- Fox, E. B. and Colon-Mercado, H. R. (2010) ‘Effect of pretreatment on Pt-Co/C

- cathode catalysts for the oxygen reduction reaction', *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(8), pp. 3280–3286. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.01.078.
- Gómez, M. A. et al. (2022) 'Electrodes based on nafion and epoxy-graphene composites for improving the performance and durability of open cathode fuel cells, prepared by electrospray deposition', *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(29), pp. 13980–13989. doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.02.146.
- Gra-, H. P. et al. (2015) 'Author ' s Accepted Manuscript', *Nano Energy*. doi: 10.1016/j.nanoen.2015.06.031.
- Han, D., Tsipoaka, M. and Shanmugam, S. (2021) 'A modified cathode catalyst layer with optimum electrode exposure for high current density and durable proton exchange membrane fuel cell operation', *Journal of Power Sources*, 496(March), p. 229816. doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.229816.
- Herden, S. et al. (2017) 'In-plane structuring of proton exchange membrane fuel cell cathodes: Effect of ionomer equivalent weight structuring on performance and current density distribution', *Journal of Power Sources*, 355, pp. 36–43. doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.04.051.
- Hsu, S. P. et al. (2013) 'The effect of Mn addition on the promotion of oxygen reduction reaction performance for PtCo/C catalysts', *Electrochimica Acta*, 105, pp. 180–187. doi: 10.1016/j.electacta.2013.04.138.
- Huah, L. B. et al. (2020) 'Comparison of catalyst-coated membranes and catalyst-coated substrate for PEMFC membrane electrode assembly: A review', *Chinese Journal of Chemical Engineering*. doi: 10.1016/j.cjche.2020.07.044.
- Job, N. et al. (2015) 'Design of Pt / Carbon Xerogel Catalysts for PEM Fuel Cells', pp. 40–57. doi: 10.3390/catal5010040.
- Jung, J. et al. (2020) 'Effect of the fabrication condition of membrane electrode assemblies with carbon-supported ordered PtCo electrocatalyst on the durability of polymer electrolyte membrane fuel cells', *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(57), pp. 32834–32843. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.053.
- Jung, W. S. and Popov, B. N. (2017) 'New Method to Synthesize Highly Active and Durable Chemically Ordered fct-PtCo Cathode Catalyst for PEMFCs', *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(28), pp. 23679–23686. doi: 10.1021/acsami.7b04750.
- Ke, Y. et al. (2021) 'A critical review on surface-pattern engineering of nafion membrane for fuel cell applications', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145(March), p. 110860. doi: 10.1016/j.rser.2021.110860.
- Knights, S. (2012) *Operation and durability of low temperature fuel cells*,

- Polymer electrolyte membrane and direct methanol fuel cell technology: Volume 1: Fundamentals and performance of low temperature fuel cells.* Woodhead Publishing Limited. doi: 10.1533/9780857095473.2.137.
- Kocha, S. S. (2015) *Electrochemical Degradation : Electrocatalyst and Support Durability, Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation*. Elsevier Inc. doi: 10.1016/B978-0-12-386936-4.10003-X.
- Lamy, C. et al. (2011) ‘Do not forget the electrochemical characteristics of the membrane electrode assembly when designing a Proton Exchange Membrane Fuel Cell stack’, *Electrochimica Acta*, 56(28), pp. 10406–10423. doi: 10.1016/j.electacta.2011.05.098.
- Lee, H. et al. (2012) ‘Application of TGA techniques to analyze the compositional and structural degradation of PEMFC MEAs’, *Polymer Degradation and Stability*, 97(6), pp. 1010–1016. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.03.016.
- Li, B. et al. (2010) ‘Effect of metal particle size and Nafion content on performance of MEA using Ir-V/C as anode catalyst’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(11), pp. 5528–5538. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.03.022.
- Lim, B. H. et al. (2021) ‘Comparison of catalyst-coated membranes and catalyst-coated substrate for PEMFC membrane electrode assembly: A review’, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 33, pp. 1–16. doi: 10.1016/j.cjche.2020.07.044.
- Lin, R. et al. (2012) ‘Electro-catalytic activity of enhanced CO tolerant cerium-promoted Pt/C catalyst for PEM fuel cell anode’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(5), pp. 4648–4656. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.021.
- Liu, L. et al. (2021) ‘Revisiting Nafion membranes by introducing ammoniated polymer with norbornene to improve fuel cell performance’, *Journal of Power Sources*, 506(October 2020), p. 230164. doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.230164.
- Liu, R. et al. (2021) ‘Performance optimization of ultra-low platinum loading membrane electrode assembly prepared by electrostatic spraying’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(17), pp. 10457–10467. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.127.
- Maggio, G. et al. (2016) ‘ScienceDirect Study of a Solid Oxide Fuel Cell fed with n-dodecane reformate . Part I: Endurance test’, 1, pp. 2–8. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.02.119.
- Majlan, E. H. et al. (2018) ‘Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89(December 2017), pp. 117–134. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.007.

- Middlemiss, L. A. *et al.* (2020) ‘Characterisation of batteries by electrochemical impedance spectroscopy’, *Energy Reports*, 6, pp. 232–241. doi: 10.1016/j.egyr.2020.03.029.
- Mo, J. *et al.* (2015) ‘Investigation of titanium felt transport parameters for energy storage and hydrogen/oxygen production’, *13th International Energy Conversion Engineering Conference*, (July). doi: 10.2514/6.2015-3914.
- Negara, V. S. I. and Astuti (2015) ‘Pengaruh Temperatur Sintering Karbon Aktif Berbasis Tempurung Kemiri Terhadap Sifat Listrik Anoda Baterai Litium’, *Fisika Unand*, 4(2), pp. 178–184.
- Ohyagi, S. and Sasaki, T. (2013) ‘Electrochimica Acta Durability of a PEMFC Pt – Co cathode catalyst layer during voltage cycling tests under supersaturated humidity conditions’, *Electrochimica Acta*, 102, pp. 336–341. doi: 10.1016/j.electacta.2013.04.060.
- Okonkwo, P. C. *et al.* (2021) ‘Nafion degradation mechanisms in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system: A review’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), pp. 27956–27973. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.032.
- Ortiz-Rivera, E., Salazar-Llinas, A. and Velez-Delgado, J. (2009) ‘An enriched undergraduate research experience based on the simulation, experiments, and theory of fuel cells’, *Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE*, (November). doi: 10.1109/FIE.2009.5350772.
- Pak Hoe, L. *et al.* (2018) ‘Polyol synthesis of reduced graphene oxide supported platinum electrocatalysts for fuel cells: Effect of Pt precursor, support oxidation level and pH’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(35), pp. 16998–17011. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.05.147.
- Pratama, R. P. *et al.* (2012) ‘Hidrogen Pada Sel Bahan Bakar Polymer Electrolyte Membrane Kapasitas 20 W’, *Jurnal Dinamis*, I(11), pp. 51–59.
- Prithi, J. A. *et al.* (2021) ‘ScienceDirect Functionalization of carbons for Pt electrocatalyst in PEMFC’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(34), pp. 17871–17885. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.186.
- Ratschow, A. D., Bermúdez Agudelo, M. C. and Hampe, M. J. (2021) ‘Three-dimensional model for stacks of tubular high temperature proton exchange membrane fuel cells incorporating a thin layer approach for the membrane electrode assembly’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(21), pp. 11926–11939. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.042.
- Ruiz, N. *et al.* (2013) ‘Low Pt loading amorphous alloys applied as anodes and the effect of different proton exchange membranes for PEMFCS’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(36), pp. 16269–16275. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.10.016.
- 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.
- Sapkota, P. et al. (2020) 'Planar polymer electrolyte membrane fuel cells: Powering portable devices from hydrogen', *Sustainable Energy and Fuels*, 4(2), pp. 439–468. doi: 10.1039/c9se00861f.
- Sarfraz, A. et al. (2022) 'Electrode Materials for Fuel Cells', *Encyclopedia of Smart Materials*, pp. 341–356. doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.11742-4.
- Sharaf, S. M. (2020) *Smart conductive textile, Advances in Functional and Protective Textiles*. LTD. doi: 10.1016/B978-0-12-820257-9.00007-2.
- Sierra, J. and Escobar, B. (2021) 'ScienceDirect Design , simulation and experimental characterization of a high-power density fuel cell', (xxxx), pp. 1–8. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.132.
- Singh, S. and Datta, J. (2021) 'Influence of Nafion template on the kinetics of anodic Pt based pluri-metallic catalyst for ethanol electro-oxidation', *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 882, p. 114974. doi: 10.1016/j.jelechem.2020.114974.
- Su, H. N. et al. (2010) 'High performance membrane electrode assembly with ultra-low platinum loading prepared by a novel multi catalyst layer technique', *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(19), pp. 10430–10436. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.06.070.
- Taghiabadi, M. M., Zhiani, M. and Silva, V. (2019) 'Effect of MEA activation method on the long-term performance of PEM fuel cell', *Applied Energy*, 242(August 2018), pp. 602–611. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.157.
- Tsotridis, G. et al. (2015) *EU HARMONISED TEST PROTOCOLS FOR PEMFC MEA TESTING IN SINGLE CELL CONFIGURATION FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS*. doi: 10.2790/54653.
- Umeda, M. et al. (2014) 'Electrochimica Acta Ex situ microelectrode study of cathode catalyst degraded by long-term endurance test in polymer electrolyte fuel cell', *Electrochimica Acta*, 128, pp. 259–264. doi: 10.1016/j.electacta.2013.10.026.
- Wang, M. et al. (2019) 'High-performance and durable cathode catalyst layer with hydrophobic C@PTFE particles for low-Pt loading membrane assembly electrode of PEMFC', *Energy Conversion and Management*, 191(February), pp. 132–140. doi: 10.1016/j.enconman.2019.04.014.
- Wisjodarmo, L. A., Arti, D. K. and Dewi, E. L. (2012) 'Pendahuluan

- Karakterisasi Grafit Matriks Polistiren Sebagai Material Untuk Separator Proton Exchange Membrane Fuel Cell', *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 14(2), pp. 103–107.
- Xing, S. et al. (2021) 'Effects of bolt torque and gasket geometric parameters on open-cathode polymer electrolyte fuel cells', *Applied Energy*, 303(July), p. 117632. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117632.
- Yoshino, T. (2018) *Chapter 11 - Electrical Conductivity Measurement, Magmas Under Pressure*. Elsevier Inc. doi: 10.1016/B978-0-12-811301-1.00011-3.
- Yu, Y. H., Lim, J. W. and Lee, D. G. (2015) 'Composite sandwich endplates with a compliant pressure distributor for a PEM fuel cell', *COMPOSITE STRUCTURE*, 119, pp. 505–512. doi: 10.1016/j.compstruct.2014.09.030.
- Zhang, S. et al. (2009) 'A review of accelerated stress tests of MEA durability in PEM fuel cells', 34, pp. 388–404. doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.10.012.
- Zhao, J., Tu, Z. and Chan, S. H. (2021) 'Carbon corrosion mechanism and mitigation strategies in a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC): A review', *Journal of Power Sources*, 488(December 2020), p. 229434. doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.229434.