

**PENGARUH TEMPERATUR *HUMIDIFIER* DAN LAJU ALIR
HIDROGEN TERHADAP KINERJA MEA PADA PEMFC
MENGUNAKAN KATALIS Pt/C DAN Pd-Co/C**

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

SKRIPSI



**NIKEA RY ANJELI
08031181823099**

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

2022

HALAMAN PENGESAHAN

**PENGARUH TEMPERATUR *HUMIDIFIER* DAN LAJU ALIR
HIDROGEN TERHADAP KINERJA MEA PADA PEMFC DENGAN
KATALIS Pt/C DAN Pd-Co/C**

SKRIPSI

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

Oleh :

NIKEA RY ANJELI

08031181823099

Indralaya, September 2022

Telah disetujui

Pembimbing



Dr. Dedi Rohendi, M.T.

NIP. 196704191993031001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

NIP. 197111191997021001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi dengan judul “Pengaruh Temperatur *Humidifier* dan Laju Alir Hidrogen terhadap Kinerja MEA pada PEMFC dengan Katalis Pt/C dan Pd-Co/C” telah diseminarkan dihadapan Tim Penguji Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 5 September 2022 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, September 2022

Ketua:

1. Nova Yuliasari, M.Si.

NIP. 197307261999032001

()

Pembimbing:

1. Dr. Dedi Rohendi, M.T.

NIP. 196704191993031001

()

Penguji:


1. Dr. Zainal Fanani, M.Si.

NIP. 196708211995121001


()

2. Prof. Dr. Muharni, M.Si.

NIP. 196903041994122001

()

Mengetahui,


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


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

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa : Nikea Ry Anjeli

NIM : 08031181823099

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 dipublikasi maupun 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 benar.

Indralaya, September 2022

Penulis,



Nikea Ry Anjeli

NIM. 08031181823019

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

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

Nama mahasiswa : Nikea Ry Anjeli
NIM : 08031181823099
Fakultas/Jurusan : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam/Kimia
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “hak bebas royalti non-eksklusif” (*non-exclusively royalty-free right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul: “Pengaruh Temperatur *Humidifier* dan Laju Alir Hidrogen terhadap Kinerja MEA pada PEMFC dengan Katalis Pt/C dan Pd-Co/C”. 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.

Indralaya, September 2022

Penulis,



Nikea Ry Anjeli

NIM. 08031181283099

HALAMAN PERSEMBAHAN

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.”

(94:5)

“Ya Allah jadikanlah aku hamba-Mu yang diberkahi di mana pun aku berada, alirkan lah kebaikan dari perantara dua tanganku, dan jadikanlah aku perantara manfaat buat Islam dan kaum Muslimin.”

(Dr. dr. Abdullah Al-Jarullah)

“Kau akan berhasil dalam setiap pelajaran, dan kau harus percaya akan berhasil, dan berhasillah kau; anggap semua pelajaran mudah, dan semua akan menjadi mudah; jangan takut pada pelajaran apa pun, karena ketakutan itu sendiri kebodohan awal yang akan membodohkan semua.”

(Pramoedya Ananta Toer)

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

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur hanyalah milik Allah SWT dan pada akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Pengaruh Temperatur *Humidifier* dan Laju Alir Hidrogen terhadap Kinerja MEA pada PEMFC dengan Katalis Pt/C dan Pd-Co/C”. Skripsi ini dibuat sebagai persyaratan agar dapat memperoleh gelar sarjana sains pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Kimia Universitas Sriwijaya.

Dalam hal ini, penulis sangat berterima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak **Dr. Dedi Rohendi, M.T.** yang telah banyak membantu, memberikan bimbingan, motivasi, saran dan petunjuk, kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih telah diberikan kesempatan untuk belajar banyak hal baru dan seru di PUR *Fuel Cell* dan Hidrogen. Semoga bapak sehat, sukses selalu dan diberkahi Allah SWT. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Sriwijaya sebagai Lembaga Pendidik yang mendidik penulis hingga mencapai gelar sarjana sains. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Dedi Rohendi, M.T. selaku kepala laboratorium PUR *Fuel Cell* dan Hidrogen UNSRI sekaligus pembimbing tugas akhir penulis. Terima kasih yang sebesar-besarnya untuk setiap bantuan baik material maupun moril, bimbingan, waktu dan kesabaran yang bapak berikan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya..
3. Ibu Prof. Dr. Muharni, M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
4. Ibu Prof. Dr. Elfita, M.Si. selaku dosen pembimbing akademik.
5. Bapak Dr. Zainal Fanani, M.Si, Dr. Suheryanto, M.Si. dan Ibu Prof. Dr. Muharni, M.Si selaku dosen pembahas dan penguji seminar hasil dan sidang sarjana.

6. Seluruh dosen Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya yang telah mendidik dan memberikan ilmunya selama masa kuliah.
7. Kedua orang tua juga Tiara Salma dan Ahmad Dzaky yang telah memberikan bantuan, doa dan dukungan tulusnya untuk penulis selama menempuh masa kuliah.
8. Untuk *MAMONG* (Agesta, Alfina, Azizah, Dinta, Dwi dan Siti), terima kasih mong sudah hadir menyertai langkah, diantara semua kemungkinan seperti tempat, waktu, orang dan kejadian yang terjadi dihidup penulis, bisa bertumbuh bersama kalian adalah salah satu hal yang paling penulis kagumi dan syukuri.
9. Mentor Penelitian Kak Dwi Hawa, kakak mentor bukan sembarang mentor *wkwk*. Terima kasih atas bantuan dan ilmu yang kakak berikan. Terima kasih juga sudah menjadi teman diskusi segala hal. Semoga Allah balas kebaikan kakak dan kabulkan impian-impian kakak yang luar biasa aamiin. Untuk Kak Icha dan Kak Reka, terima kasih juga atas bantuan dan ilmunya kak. Semoga Allah balas kebaikan kakak-kakak sekalian.
10. Teman seperjuangan penelitian Prima dan Suteja (PNS Team), ayuk akuu Adinda dan Ade M, Iren dan Kak Nadia, juga Eko dan Ghifar, terima kasih telah siap siaga dimintai bantuan selama proses penelitian. Terima kasih *guys* atas masa *haha-hihi* yang kita tempuh, semoga kebaikan menyelimuti kalian dimana pun kalian berada.
11. Untuk diriku sendiri, *you did so well ke!. Just remember that you are enough, and you are everything that you need, always.*

Demikianlah semoga tulisan ini dapat bermanfaat dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, terutama pada bidang *fuel cell*.

Indralaya, September 2022

Penulis

SUMMARY

EFFECT OF HUMIDIFIER TEMPERATURE AND HYDROGEN FLOW RATE ON MEA PERFORMANCE ON PEMFC USING Pt/C AND Pd-Co/C CATALYST

Nikea Ry Anjeli: Supervised by Dr. Dedi Rohendi, M.T

Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Sriwijaya University
xv + 51 pages, 13 pictures, 2 tables, 9 appendices.

Research on the effect of humidifier temperature and hydrogen gas flow rate on MEA performance of PEMFC has been done. This study used MEA with Pt/C catalyst at the anode and Pd-Co/C at the cathode. The MEA was characterized using the Cyclic Voltammetry (CV) method to determine the Electrochemical Active Surface Area (ECSA) and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) to determine the conductivity value. Then the MEA performance test was carried out based on the I-V and I-P curves on variations in humidifier temperature and hydrogen gas flow rate. Characterization and performance tests were carried out on PEMFC single stack. The results of the MEA characterization of Pt/C and Pd-Co/C with the CV method obtained an ECSA value of $1.8 \text{ cm}^2/\text{g}$. Meanwhile, using the EIS method, the conductivity value is $3.85 \times 10^{-9} \text{ S/cm}$. The MEA humidifier temperature performance test obtained the best operating temperature at $40 \text{ }^\circ\text{C}$ with a power density of 3.192 mW/cm^2 at a current density of 12 mA/cm^2 and the MEA performance test with variations in the hydrogen flow rate was the best at a flow rate of 200 mL/min with a power density of 3.192 mW/cm^2 at a current density of 12 mA/cm^2 .

Keywords : PEMFC, Humidifier Temperature, Hydrogen Gas Flow Rate

Citation : 51 (2006-2022)

RINGKASAN

PENGARUH TEMPERATUR *HUMIDIFIER* DAN LAJU ALIR HIDROGEN TERHADAP KINERJA MEA PADA PEMFC MENGUNAKAN KATALIS Pt/C DAN Pd-Co/C

Nikea Ry Anjeli: Dibimbing oleh Dr. Dedi Rohendi, M.T.

Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya
xv + 51 halaman, 13 gambar, 2 tabel, 6 lampiran

Penelitian pengaruh temperatur *humidifier* dan laju alir gas hidrogen terhadap kinerja MEA pada PEMFC telah dilakukan. Penelitian ini menggunakan MEA dengan katalis Pt/C di anoda dan Pd-Co/C di katoda. MEA tersebut dikarakterisasi menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk mengetahui *Electrochemical Active Surface Area* (ECSA) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) untuk menentukan nilai konduktivitas. Kemudian dilakukan uji kinerja MEA berdasarkan kurva I-V dan I-P pada variasi temperatur *humidifier* dan laju alir gas hidrogen. Karakterisasi dan uji kinerja dilakukan pada PEMFC *stack* tunggal. Hasil karakterisasi MEA Pt/C dan Pd-Co/C dengan metode CV didapatkan nilai ECSA sebesar 1,8 cm²/g. Sedangkan, menggunakan metode EIS didapatkan nilai konduktivitas sebesar 3,85 × 10⁻⁹ S/cm. Uji kinerja MEA pada temperatur *humidifier* bervariasi didapatkan temperatur operasional terbaik pada temperatur 40 °C dengan densitas daya sebesar 3,192 mW/cm² pada densitas arus 12 mA/cm² dan uji kinerja MEA dengan variasi laju alir hidrogen terbaik berada pada laju alir 200 mL/menit dengan densitas daya sebesar 3,192 mW/cm² pada densitas arus 12 mA/cm².

Kata kunci : PEMFC, Temperatur *Humidifier*, Laju Alir Gas Hidrogen

Sitasi : 51 (2006-2022)

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
SUMMARY.....	ix
RINGKASAN.....	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)	4
2.2 Komponen Penyusun PEMFC.....	5
2.2.1 <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA).....	5
2.2.2 Pelat Bipolar.....	7
2.2.3 Gasket	7
2.2.4 <i>End Plate</i>	8
2.3 Katalis Pd-Co/C dan Pt/C.....	8
2.4 Instrumen Karakterisasi	9
2.4.1 <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	9
2.4.2 <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	10
2.5 Kurva Polarisasi.....	11
2.6 Pengaruh Kondisi Operasi Terhadap Kinerja PEMFC	12
2.6.1 Temperatur <i>Humidifier</i>	12
2.6.2 Laju Alir Hidrogen	13

BAB III	METODOLOGI PENELITIAN.....	15
3.1	Waktu dan Tempat.....	15
3.2	Alat dan Bahan	15
3.2.1	Alat	15
3.2.2	Bahan	15
3.3	Prosedur Penelitian	15
3.3.1	Pembuatan <i>Gas Difussion Layer</i> (GDL).....	15
3.3.2	Pembuatan Katalis Pd-Co/C.....	16
3.3.3	Pembuatan Elektroda Pd-Co/C.....	16
3.3.4	Pembuatan MEA	17
3.3.5	Karakterisasi MEA	17
3.3.6	Pengujian Kinerja MEA pada PEMFC dengan Pengaruh Temperatur <i>Humidifier</i> dan Laju Alir	17
3.4	Analisa Data	18
3.4.1	Analisis Karakterisasi MEA PEMFC	18
3.4.2	Analisis Data Pengaruh Temperatur <i>Humidifier</i> dan Laju Alir Hidrogen	20
3.4.2.2	Laju Alir Hidrogen	20
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	22
4.1.	Karakterisasi MEA	22
4.1.1.	Karakterisasi MEA Menggunakan <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	22
4.1.2.	Karakterisasi MEA Menggunakan <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	23
4.2.	Uji Kinerja MEA	25
4.2.1	Uji Kinerja MEA pada Variasi Temperatur <i>Humidifier</i> ..	25
4.2.2	Uji Kinerja MEA pada Variasi Laju Alir Gas Hidrogen ..	28
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	31
5.1.	Kesimpulan.....	31
5.2.	Saran	31
	DAFTAR PUSTAKA.....	32
	LAMPIRAN	37
	DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	51

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Komponen Penyusun MEA (Ridlo, 2020)	5
Gambar 2. Struktur Kimia Membran Nafion (Branco <i>et al.</i> , 2022).	6
Gambar 3. Kurva voltamogram (Choudhary <i>et al.</i> , 2017)..	10
Gambar 4. Plot Nyquist (Niya & Hoorfar, 2013).	11
Gambar 5. Kurva Polarisasi.....	12
Gambar 6. Kondisi kelembapan pada membran (Chang <i>et al.</i> , 2018).	13
Gambar 7. Kurva Voltammogram MEA Pt/C dan Pd-Co/C.....	22
Gambar 8. Plot <i>Nyquist</i> hasil karakterisasi MEA Pt/C dan Pd-Co/C.	24
Gambar 9. Kurva tegangan terhadap densitas arus (I-V) untuk MEA Pt/C (Anoda) dan Pd-Co/C (Katoda) pada variasi temperatur <i>humidifier</i> ..	25
Gambar 10. Tegangan pada berbagai variasi temperatur humidifier pada 4 mA/cm ² (Polarisasi aktivasi), 12 mA/cm ² (Polarisasi ohmik) dan 20 mA/cm ² (Polarisasi transfer massa).	26
Gambar 11. Kurva densitas daya terhadap densitas arus MEA Pt/C (Anoda) dan Pd-Co/C (Katoda) pada berbagai variasi temperatur <i>humidifier</i>	27
Gambar 12. Kurva polarisasi laju alir hidrogen (a) Kurva I-V (b) Kurva I-P.....	29

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Data Pengukuran Pengaruh Temperatur <i>Humidifier</i>	20
Tabel 2. Data Pengukuran Pengaruh Laju Alir Hidrogen.....	21

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Skema Kerja.....	38
Lampiran 2. Perhitungan Massa Katalis	41
Lampiran 3. Perhitungan <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)	42
Lampiran 4. Perhitungan Elektroda	43
Lampiran 5. Perhitungan Nilai ECSA Karakterisasi <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV) MEA	44
Lampiran 6. Perhitungan Nilai Konduktivitas Karakterisasi <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	47
Lampiran 7. Tabel Data Hasil Pengolahan Variasi Temperatur Humidifier	48
Lampiran 8. Tabel Data Hasil Pengolahan Variasi Laju Alir Hidrogen	49
Lampiran 9. Gambar Alat dan Bahan Penelitian	50

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Hidrogen merupakan salah satu sumber utama energi bersih yang merupakan unsur paling melimpah di alam semesta. Ketika gas hidrogen dioksidasi secara elektrokimia dalam sistem *fuel cell* akan menghasilkan produk samping berupa air tanpa mengeluarkan karbon dioksida (Manke *et al.*, 2012). *Fuel cell* merupakan perangkat konversi energi yang mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi listrik (Fan, Tu and Hwa, 2021).

Salah satu jenis *fuel cell* yang menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). Proses oksidasi hidrogen yang terjadi pada PEMFC akan melepas proton yang selanjutnya mengalir ke katoda melalui membran sedangkan elektron menuju kawat konduktor lalu dihasilkan energi listrik (Ridlo, 2020). PEMFC dipilih karena memiliki efisiensi konversi energi yang tinggi, pengoperasian yang hening, rendah emisi dan menggunakan temperatur yang rendah (Pan *et al.*, 2021). Pada sistem PEMFC, komponen diintegrasikan untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan, antara lain pelat bipolar, pelat pengumpul arus dan *Membrane Electrode Assemblies* (MEA) (Lim *et al.*, 2021).

MEA tersusun atas elektroda yang terdiri dari katoda dan anoda (Wicaksono *et al.*, 2021). Sifat elektrokimia dari elektroda dapat mempengaruhi kinerja MEA yang diketahui dengan cara mengukur aktivitas katalitiknya melalui analisis *Cyclic Voltammetry* (CV) berdasarkan nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA) (Shahgaldi *et al.*, 2019) kemudian konduktivitas elektrik diketahui dengan melakukan analisis *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) (Taghiabadi *et al.*, 2019). Nilai ECSA dan konduktivitas listrik yang besar menunjukkan kinerja elektroda yang baik (Yulianti *et al.*, 2019).

Bagian elektroda yang mempengaruhi kinerja MEA adalah katalis. *Fuel cell* umumnya menggunakan platinum (Pt) dan paduannya sebagai katalis oksidasi hidrogen (Zhu *et al.*, 2019). Saat ini, para peneliti terus mencari alternatif terbaik

selain Pt, tanpa mengorbankan kinerja katalisnya dengan menggunakan katalis berbasis non-platinum dengan sifat katalis yang mirip dengan Pt misalnya Palladium (Pd) (Chandran & Ramaprabhu, 2018). Pd memiliki konfigurasi elektron yang mirip dengan Pt sehingga dianggap mampu mencapai aktivitas reaksi reduksi oksigen yang tinggi (Bae *et al.*, 2019). Tetapi, aktivitas katalitik Pd murni lima kali lebih kecil dari Pt. Oleh karena itu, para peneliti telah mencoba untuk meningkatkan aktivitas katalitik Pd dengan memasukkan logam transisi yang berbeda seperti Co, Fe, Ni, Cu, Mo, Bi, Ir, W (Chandran & Ramaprabhu, 2018).

Katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah palladium dan kobalt pada substrat karbon (Pd-Co/C). Serov *et al* (2010), telah melakukan penelitian dengan katalis Pd-Co/C yang menunjukkan nilai densitas daya yang sebanding dengan MEA komersial. Selain itu, Gharibi, Golmohammadi dan Kheirmand (2013), juga berhasil membuat katalis dengan memadukan palladium-kobalt berbasis karbon (Pd-Co/C) yang diketahui dapat memberikan kinerja yang lebih baik daripada elektroda yang hanya mengandung palladium.

Kinerja PEMFC juga dipengaruhi oleh temperatur *humidifier*. Membran pada PEMFC perlu dipertahankan tingkat hidrasinya agar dapat menghantarkan proton dengan baik. Tingkat kelembaban yang rendah dapat mempercepat proses degradasi membran yang mengakibatkan membran mengalami dehidrasi. Namun sebaliknya, kelembaban yang terlalu tinggi dapat menghambat pergerakan reaktan akibat pori-pori yang dihalangi oleh molekul air yang terbentuk (Chang *et al.*, 2018). Guvelioglu and Stenger (2007), melaporkan bahwa kelembaban dan laju alir adalah faktor yang dapat mempengaruhi kinerja *fuel cell*. Peningkatan laju alir hidrogen dapat meningkatkan suplai hidrogen/bahan bakar di anoda. Sementara itu, pengaturan kelembaban dimaksudkan agar MEA dapat terhidrasi optimum. Oleh karena itu, laju alir dan kelembaban harus dikontrol untuk mencegah kekeringan membran dan banjir pada elektroda.

Berdasarkan penjelasan di atas, dilakukan uji kinerja MEA dengan katalis Pt/C di anoda dan Pd-Co/C di katoda pada PEMFC terhadap temperatur *humidifier* dan laju alir hidrogen bervariasi.

1.2. Rumusan Masalah

Pada MEA, elektroda Pt/C terletak di anoda dan elektroda Pd-Co/C di katoda, selanjutnya MEA dirangkai pada PEMFC *stack* tunggal dan dilakukan uji kinerjanya pada PEMFC dengan variasi temperatur *humidifier* dan laju alir gas hidrogen. Permasalahan utama pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh temperatur *humidifier* dan laju alir gas terhadap kinerja MEA pada PEMFC *stack* tunggal berdasarkan kinerja I-V dan I-P.

1.3. Tujuan Penelitian

1. Menentukan nilai *Electrochemical Active Surface Area* (ECSA) menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan pengukuran konduktivitas elektrik menggunakan metode *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS).
2. Menguji kinerja MEA Pt/C dan Pd-Co/C pada berbagai variasi temperatur *humidifier* yaitu temperatur ruang (32 °C), 40, 60 dan 80 °C pada PEMFC *stack* tunggal.
3. Menguji kinerja MEA Pt/C dan Pd-Co/C pada berbagai variasi laju alir gas hidrogen yaitu 100, 200, 300 dan 400 mL/menit pada PEMFC *stack* tunggal.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat mengurangi penggunaan platina sebagai katalis pada PEMFC dengan mengganti katalis dengan paduan paladium dan kobalt pada substrat karbon yang diharapkan mampu meningkatkan kinerja PEMFC serta mengetahui kinerja PEMFC pada berbagai variasi temperatur *humidifier* dan laju alir hidrogen.

DAFTAR PUSTAKA

- Arroyo-Ramírez, L., Montano-Serrano, R., Luna-Pineda, T., Román, F. R., Raptis, R. G., and Cabrera, C. R. 2013. Synthesis and Characterization of Palladium and palladium-cobalt nanoparticles on vulcan XC-72R for the oxygen reduction reaction. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(22): 11603–11612.
- Babu, A. R. V., Kumar, P. M., and Rao, G. S. 2018. Parametric Study of The Proton Exchange Membrane Fuel Cell for Investigation of Enhanced Performance Used in Fuel Cell Vehicles. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4): 3953–3958.
- Bae, H. E., Park, Y. D., Kim, T. H., Lim, T., and Kwon, O. J. 2019. Carbon-caged palladium catalysts supported on carbon nanofibers for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 79: 431–436.
- Basuli, U., Jose, J., Lee, R. H., Yoo, Y. H., Jeong, K. U., Ahn, J. H., and Nah, C. 2012. Properties and degradation of the gasket component of a proton exchange membrane fuel cell\–A review. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12(10): 7641–7657.
- Beltrán-Gastélum, M., Salazar-Gastélum, M. I., Félix-Navarro, R. M., Pérez-Sicairos, S., Reynoso-Soto, E. A., Lin, S. W., Flores-Hernández, J. R., Romero-Castañón, T., Albarrán-Sánchez, I. L., and Paraguay-Delgado, F. 2016. Evaluation of PtAu/MWCNT (Multiwalled Carbon Nanotubes) electrocatalyst performance as cathode of a proton exchange membrane fuel cell. *Energy*, 109: 446–455.
- Branco, C. M., El-kharouf, A., and Du, S. 2022. Materials for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFCs): Electrolyte Membrane, Gas Diffusion Layers and Bipolar Plates. In *Encyclopedia of Smart Materials*. Elsevier Ltd.
- Brightman, E., Hinds, G., and O'Malley, R. 2013. In situ measurement of active catalyst surface area in fuel cell stacks. *Journal of Power Sources*, 242: 244–254.
- Chandran, P., and Ramaprabhu, S. 2018. Catalytic performance of non-platinum-based hybrid carbon hetero-structure for oxygen reduction and hydrogen oxidation reactions in proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 43(39): 18477–18487.
- Chang, Y., Qin, Y., Yin, Y., Zhang, J., and Li, X. 2018. Humidification strategy for polymer electrolyte membrane fuel cells – A review. *Applied Energy*. 230(July): 643–662.

- Chen, H., Zhao, X., Zhang, T., and Pei, P. 2019. The reactant starvation of the proton exchange membrane fuel cells for vehicular applications: A review. *Energy Conversion and Management*: 282–298.
- Cho, Y. H., Lim, J. W., Hee, Y. P., Namgee, J., Minjehn, A., Heeman, C and Yung, E. S. 2012. Performance of Membrane Electrode Assemblies Using Pd-Pt Alloy as Anode Catalyst in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 37(7): 5884.
- Choudhary, Y. S., Jothi, L., and Nageswaran, G. 2017. Electrochemical Characterization. In *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization* (Vol. 2). Elsevier Inc.
- Fan, L., Tu, Z., and Hwa, S. 2021. Recent development of hydrogen and fuel cell technologies : A review. *Energy Reports*, 7: 8421–8446.
- Farno, B. (2013). *PEM Fuel Cell: Theory and Practice*. Elsevier Academic Press.
- Fernandes, A. C., and Ticianelli, E. A. 2009. A performance and degradation study of Nafion 212 membrane for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 193(2), 547–554.
- Gani, R., Adawiyah, S. R., and Nur, A. 2021. Elektroplating Grafena-Polianilina pada Stainless Steel sebagai Elektroda pada Elektrolisis Air untuk Produksi Hidrogen. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 7(2): 109–120.
- Gharibi, H., Golmohammadi, F., and Kheirmand, M. 2013. Fabrication of MEA based on optimum amount of Co in PdxCo/C alloy nanoparticles as a new cathode for oxygen reduction reaction in passive direct methanol fuel cells. *Electrochimica Acta*, 89: 212–221.
- Giner Sanz, J. ., Ortega, E. ., and Herranz Perez, V. 2015. Optimization of the electrochemical impedance spectroscopy measurement parameters for PEM fuel cell spectrum determination. *Electrochimica Acta*, 174: 1290–1298.
- Guvelioglu, G. H., and Stenger, H. G. 2007. Flow rate and humidification effects on a PEM fuel cell performance and operation. *Journal of Power Sources*, 163(2): 882–891.
- Hartnig, C. 2012. Catalyst and membrane technology for low temperature fuel cells. In *Polymer electrolyte membrane and direct methanol fuel cell technology: Volume 1: Fundamentals and performance of low temperature fuel cells*. Woodhead Publishing Limited.
- Hawa Yulianti, D., Rohendi, D., Syarif, N., and 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.

- Hutchinson, A. J., Tokash, J. C., and Logan, B. E. 2011. Analysis of carbon fiber brush loading in anodes on startup and performance of microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 196(22), 9213–9219.
- Karvonen, S., Hottinen, T., Itonen, J., and Uusalo, H. 2008. Modeling of polymer electrolyte membrane fuel stack end plates. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 5(4), 1–9.
- Kaur, G. 2022. PEM Fuel Cells. In *Elsevier*.
- Kil, Ş., Özdemir, O. K., İnsel, M. A., and Sadıkoğlu, H. 2022. Computational modeling and experimental verification of cathode catalyst layer on PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Lim, B. H., Majlan, E. H., Tajuddin, A., Husaini, T., Wan Daud, W. R., Mohd Radzuan, N. A., and Haque, M. A. 2021. Comparison of Catalyst-Coated Membranes and Catalyst-Coated Substrate for PEMFC Membrane Electrode Assembly: A Review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 33, 1–16.
- Liu, Z., Chen, J., Chen, S., Huang, L., and Shao, Z. 2017. Modeling and Control of Cathode Air Humidity for PEM Fuel Cell Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 4751–4756.
- Manke, I., Kardjilov, N., and Hartnig, C. 2012. Neutron tomography for polymer electrolyte membrane fuel cell characterization. In *Polymer Electrolyte Membrane and Direct Methanol Fuel Cell Technology: In Situ Characterization Techniques for Low Temperature Fuel Cells*.
- Meku, E., Du, C., Sun, Y., Du, L., Wang, Y., and Yin, G. 2016. Electrocatalytic Activity and Stability of Ordered Intermetallic Palladium-Iron Nanoparticles toward Oxygen Reduction Reaction. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(3), F132–F138.
- Meng, H., Zeng, D., and Xie, F. 2015. Recent development of Pd-based electrocatalysts for proton exchange membrane fuel cells. *Catalysts*, 5(3), 1221–1274.
- Meyer, Q., Zeng, Y., and Zhao, C. 2019. Electrochemical Impedance Spectroscopy of Catalyst and Carbon Degradations in Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Journal of Power Sources*, 437, 1–11.
- Niya, S. M. R., and Hoorfar, M. 2013. Study of Proton Exchange Membrane Fuel Cell using Electrochemical Impedance Spectroscopy Technique - A Review. *Journal of Power Sources*, 240, 281–293.
- Okonkwo, P. C., Ben Belgacem, I., Emori, W., and 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.

- Pan, M., Pan, C., Li, C., and Zhao, J. 2021. A review of membranes in proton exchange membrane fuel cells: Transport phenomena, performance and durability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141(January), 110771.
- Perez-Page, M., and Perez-Herranz, V. 2009. Effect of The Operation and Humidification Temperature on the Performance of a PEM Fuel Cell Stack. *ECS Transactions*, 25(1), 733–745.
- Rezaei Niya, S. M., and Hoorfar, M. 2013. Study of proton exchange membrane fuel cells using electrochemical impedance spectroscopy technique - A review. *Journal of Power Sources*, 240, 281–293.
- Ridlo, M. R. 2020. Perkembangan Riset MEA Untuk PEMFC. *Seminar Nasional SNPBS Ke-V*, 531–536.
- Rosli, R. E., Majlan, E. H., Wan Daud, W. R., and Hamid, S. A. A. 2012. Hydrogen rate manipulation of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack using feedback control system. *PECon 2012 - 2012 IEEE International Conference on Power and Energy, December*, 553–557.
- Scott, K. 2012. Membrane electrode assemblies for polymer electrolyte membrane fuel cells. In *Functional Materials for Sustainable Energy Applications*. Woodhead Publishing Limited.
- Serov, A., Nedoseykina, T., Shvachko, O., and Kwak, C. 2010. Effect of precursor nature on the performance of palladium-cobalt electrocatalysts for direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources*, 195(1), 175–180.
- Shahgaldi, S., Ozden, A., Li, X., and Hamdullahpur, F. 2019. A novel membrane electrode assembly design for proton exchange membrane fuel cells: Characterization and performance evaluation. *Electrochimica Acta*, 299, 809–819.
- 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), 602–611.
- Toshev, Y., Mandova, V., Boshkov, N., Stoychev, D., Petrov, P., Tsvetkova, N., Raichevski, G., Tsvetanov, C., Gabev, A., Velev, R., and Kostadinov, K. 2006. Protective coating of zinc and zinc alloys for industrial applications. In *4M 2006 - Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*. Woodhead Publishing Limited.
- Wang, B., Lin, R., Liu, D., Xu, J., and Feng, B. 2019. Investigation of the effect of humidity at both electrode on the performance of PEMFC using

- orthogonal test method. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(26), 13737–13743.
- Wang, Y., Ruiz Diaz, D. F., Chen, K. S., Wang, Z., and Adroher, X. C. 2020. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review. *Materials Today*, 32(xx), 178–203.
- Wicaksono, M. A., Noerochim, L., and Purniawan, A. 2021. Analisis Pengaruh Variasi Rasio Berat Nafion / Karbon pada Lapisan Katalis Membrane Electrode Assembly terhadap Performa. *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), 98–103.
- Wilberforce, T., El Hassan, Z., Ogungbemi, E., Ijaodola, O., Khatib, F. N., Durrant, A., Thompson, J., Baroutaji, A., and Olabi, A. G. 2019. A comprehensive study of the effect of bipolar plate (BP) geometry design on the performance of proton exchange membrane (PEM) fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111(6), 236–260.
- Wilberforce, T., Ijaodola, O., Khatib, F. N., Ogungbemi, E. O., El Hassan, Z., Thompson, J., and Olabi, A. G. 2019. Effect of humidification of reactive gases on the performance of a proton exchange membrane fuel cell. *Science of the Total Environment*, 688, 1016–1035.
- Wu, K., Wang, Z., Zhang, G., Fan, L., Zhu, M., Xie, X., Du, Q., Zu, B., and Jiao, K. 2022. Correlating electrochemical active surface area with humidity and its application in proton exchange membrane fuel cell modeling. *Energy Conversion and Management*, 251(May 2021), 114982.
- Yuan, X. Z., Nayoze-Coynel, C., Shaigan, N., Fisher, D., Zhao, N., Zamel, N., Gazdzicki, P., Ulsh, M., Friedrich, K. A., Girard, F., and Groos, U. 2021. A review of functions, attributes, properties and measurements for the quality control of proton exchange membrane fuel cell components. *Journal of Power Sources*, 491(3): 229540.
- Zhang, J., Zhang, H., Wu, J., and Zhang, J. 2013. PEM Fuel Cell Fundamentals. In *Pem Fuel Cell Testing and Diagnosis*.
- 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: 229434.
- Zhu, S., Ge, J., Liu, C., and Xing, W. 2019. Atomic-level dispersed catalysts for PEMFCs: Progress and future prospects. *EnergyChem*, 1(3): 100018.