

**PENGUJIAN KINERJA MEA DENGAN KATALIS Pt-Co/C DAN Pt/C
PADA PEMFC DENGAN LAJU ALIR GAS HIDROGEN YANG
BERVARIASI**

SKRIPSI

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



Oleh:

DINA YUNIARTI

08031182025004

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

2024

HALAMAN PENGESAHAN
PENGUJIAN KINERJA MEA DENGAN KATALIS Pt-Co/C DAN Pt/C
PADA PEMFC DENGAN LAJU ALIR GAS HIDROGEN YANG
BERVARIASI

SKRIPSI

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

Diusulkan oleh :
DINA YUNIARTI
08031182025004

Indralaya, 4 Maret 2024

Dosen Pembimbing



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

Mengetahui,
Dekan FMIPA



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

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi Dina Yuniarti (08031182025004) dengan judul “Pengujian Kinerja MEA Dengan Katalis Pt-Co/C dan Pt/C Pada PEMFC dengan Laju Alir Gas Hidrogen yang Bervariasi” telah diseminarkan dihadapan Tim Penguji Seminar Hasil Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 29 Januari 2024 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, 18 Maret 2024

Ketua :

1. **Dra. Fatma, MS.**

NIP. 196207131991022001

()

Sekretaris :

1. **Dr. Widia Purwaningrum, M.Si.**

NIP. 197304031999032001

()

Pembimbing :

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

NIP. 196704191993031001

()

Penguji :

1. **Dr. Ady Mara, M.Si.**

NIP. 196404301990031003

()

2. **Dr. Suheryanto, M.Si.**

NIP. 196006251989031006

()

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 dibawah ini:

Nama Mahasiswa : Dina Yuniarti
NIM : 08031182025004
Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia

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

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

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya,

Indaralaya, 18 Maret 2024

Yang menyatakan,



HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama Mahasiswa : Dina Yuniarti
NIM : 08031182025004
Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia
Jenis Karya Ilmiah : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya "hak bebas royalti non-eksklusif" (*non-exclusively royalty-free right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul "Pengujian Kinerja MEA Dengan Katalis Pt-Co/C dan Pt/C Pada PEMFC dengan Laju Alir Gas Hidrogen yang Bervariasi". Dengan hak bebas royalti non-eksklusif ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih, edit/memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tugas akhir atau skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya.

Indralaya, 18 Maret 2024

Yang menyatakan,



Dina Yuniarti

NIM. 08031182025004

HALAMAN PERSEMBAHAN

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

“ Sesungguhnya jika kamu bersyukur, pasti kami akan menambah (nikmat) kepadamu, dan jika kamu mengingkari (nikmat-ku), maka sesungguhnya azab-ku sangat pedih ”

(QS. 14:7)

"Selalu ada harga dalam sebuah proses. Nikmati saja lelah-lelah itu. Lebarakanlah lagi rasa sabar itu. Semua yang kau investasikan untuk menjadikan dirimu serupa yang kau impikan. Mungkin tidak akan selalu lancar. Tapi, gelombang-gelombang itu nanti bisa kau ceritakan.

(Boy Chandra)

“Dan bersabarlah kamu, sesungguhnya janji Allah adalah benar”

(QS. 30:60)

Skripsi ini sebagai bentuk tanda syukur kepada Allah SWT dan Nabi Muhammad SAW. Dan ku persembahkan untuk kedua orang tua, pembimbingku, sahabatku dan alamamaterku

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, kita memujinya dan memohon ampunan dan meminta pertolongan kepada-Nya dan pada akhirnya penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul: “Pengujian Kinerja MEA Dengan Katalis Pt-Co/C dan Pt/C Pada PEMFC dengan Laju Alir Gas Hidrogen yang Bervariasi”. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Kimia Universitas Sriwijaya.

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

1. Bapak Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya.
2. Ibu Prof. Muharni, M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
3. Bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si. selaku Sekretaris Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
4. Bapak Ady Mara, M.Si. dan Bapak Dr. Suheryanto, M.Si. selaku dosen pembahas seminar hasil dan penguji sidang sarjana.
5. Bapak Dasril Basri, M.Si selaku dosen Pembimbing Akademik
6. Seluruh Dosen FMIPA Kimia Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu, mendidik, dan membimbing selama masa kuliah.
7. Kepada ,Mbak Novi dan Kak Cosiin selaku Admin Jurusan Kimia yang telah banyak membantu dalam semua proses administrasi selama perkuliahan.

8. Kak Dwi Hawa Yulianti selaku mentor skripsi Dina yang telah sabar dalam membimbing, mengingatkan dan membanu proses penyelesaian tugas akhir ini. Semoga kakak sehat dan sukses selalu
9. Kak icha dan Kak reka yang selalu membantu dan berbagi ilmunya kepada penulis dalam penyelesaian tugas akhir. Terimakasih sudah menjadi kakak-kakak yang baik.
10. Bapak dan Ibu yang selalu mendukung penuh segala kegiatan selama kuliah, mendoakan serta memberikan semangat hingga saat ini dan seterusnya, serta keluarga besar ku yang selalu memeberikan dukungannya.
11. Tim Podcast untuk Putri, Sera, Shinta, Alifia, Rafly, dan Adelvin yang telah menjadi patner main, ngerjain tugas, suka maupun duka intinya kaliah partner terbaik selama masa kuliah hingga seterusnya.
12. Tim PUR Fuel Cell & Hidrogen 2020 untuk Hawa, Putri, eno, Msy, Lamria, Theresia dan Syakira atas kerjasama, bantuan dan dukungannya selama penelitian.
13. Putri Sari Wahyuningsih selaku partner terbaik meskipun sedikit keras kepala. Patner kos, Kerja Praktik, KKN, penelitian, seminar, cerita, suka duka dan banyak lagi yang tidak bisa diceritakan. Terimakasih sudah menjadi partner yang baik hati. Semoga sukses selalu dimanapun berada.
14. Tim KKN 98 UNSRI untuk Putri, Alya, Niak, Hanifah, Nurul, Mira, Irfan, Farid, Ichwan, dan Harlin yang sudah menjadi partner terbaik dan memberikan warna selama semester akhir.
15. Teman-teman seperjuangan Kimia 2020 yang tidak bisa disebutkan satu persatu atas bantuan, semangat dan kenangannya semasa kuliah.
16. Seluruh pihak yang terlibat dalam penelitian maupun penulisan yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih dkungan dan bantuannya selama penelitian.

Semua bimbingan, ilmu, bantuan, masukan dan motivasi yang telah diberikan kepada penulis semoga menjadi amal shaleh dan mendapatkan pahala yang setimpal dari Allah Subhanahu Wata'ala. Dengan kerendahan hati, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih banyak kekurangan dan kesalahan, sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari pembaca. Penulis menyadari

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

Indralaya, 18 Maret 2024

Penulis

SUMMARY

PERFORMANCE TESTING OF MEA WITH Pt-Co/C AND Pt/C CATALYST IN PEMFC WITH VARYING HYDROGEN GAS FLOW RATES

Dina Yuniarti, supervised by Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D

Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Sriwijaya University

xvi + 58 pages, 9 figures, 2 tables, 7 appendices.

The performance testing of a Membrane Electrode Assembly (MEA) with Pt-Co/C catalysts in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) under varying hydrogen gas flow rates has been conducted. The MEA consists of electrodes comprising an anode and a cathode involving Pt/C and Pt-Co/C catalysts. The electrodes were characterized using X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM), and electrochemical property analyses employing the Cyclic Voltammetry (CV) and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) methods. Additionally, MEA performance was evaluated based on I-V and I-P curves with the influence of varying hydrogen gas flow rates at 100, 200, 300, and 400 mL/minute. XRD characterization results revealed diffraction peaks for PTFE at $2\theta = 18.9^\circ$, Pt at $2\theta = 40.79^\circ$, cobalt at $2\theta = 42.9^\circ$, carbon at $2\theta = 26.674^\circ$ and $2\theta = 54.3^\circ$, with SEM results indicating the percentage composition of each element in the Pt-Co/C catalyst on the electrode as follows C 39.6% wt, Co 18.5% wt, and Pt 39.2% wt. Analysis results showed a Specific Surface Area (ECSA) of $0.7236 \text{ m}^2/\text{g}$ for Pt-Co/C and $1.133 \text{ m}^2/\text{g}$ for Pt/C, while the conductivity values were $13.07 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ for Pt-Co/C and $10.48 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ for Pt/C. The maximum MEA performance was achieved at a flow rate of 100 mL/minute, with a power density of 3.4 mW/cm^2 at a current density of 8.461 mA/cm^2 .

Keywords: Pt-Co/C Catalyst, MEA, PEMFC, electrode characterization, performance test

Citation: 67 (2010-2024)

RINGKASAN

PENGUJIAN KINERJA MEA DENGAN KATALIS Pt-Co/C DAN Pt/C PADA PEMFC DENGAN LAJU ALIR GAS HIDROGEN YANG BERVARIASI

Dina Yuniarti, dibimbing oleh Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas
Sriwijaya

xvi + 58 halaman, 9 gambar, 2 tabel, 7 lampiran.

Pengujian kinerja MEA dengan katalis Pt-Co/C pada PEMFC dengan laju alir gas hidrogen yang bervariasi telah dilakukan. MEA tersusun dari elektroda terdiri dari anoda dan katoda yang melibatkan katalis Pt/C dan Pt-Co/C. Elektroda dikarakterisasi menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscope* (SEM) serta analisis sifat elektrokimia menggunakan metode *Cyclic Voltametry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS). Selain itu, kinerja MEA juga dilakukan berdasarkan kurva I-V dan I-P dengan pengaruh laju alir gas hidrogen yang divariasikan 100, 200, 300 dan 400 mL/menit. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan puncak difraksi PTFE pada $2\theta = 18,9^\circ$, Pt pada $2\theta = 40,79^\circ$, cobalt pada $2\theta = 42,9^\circ$, karbon pada $2\theta = 26,674^\circ$ dan $2\theta = 54,3^\circ$ dengan hasil SEM yang menunjukkan persentase masing-masing unsur dari katalis pada elektroda Pt-Co/C, C 39,6% wt, Co 18,5% wt, dan Pt 39,2% wt. Hasil analisis menunjukkan nilai ECSA sebesar $0,7236 \text{ m}^2/\text{g}$ (Pt-Co/C) dan $1,133 \text{ m}^2/\text{g}$ (Pt/C) sementara nilai konduktivitas sebesar $13,07 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ (Pt-Co/C) dan $10,48 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ (Pt/C). Kinerja maksimum MEA dicapai pada laju alir 100 mL/menit dengan densitas daya sebesar $3,4 \text{ mW/cm}^2$ pada nilai densitas arus sebesar $8,461 \text{ mA/cm}^2$.

Kata kunci : Katalis Pt-Co/C, MEA, PEMFC, karakterisasi elektroda, uji kinerja

Sitasi : 67 (2010-2024)

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN	i
HALAMAN PERSETUJUAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iii
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
SUMMARY	ix
RINGKASAN	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Fuel Cell	4
2.2 Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)	5
2.3 Komponen Penyusun PEMFC	6
2.3.1 Membrane Electrode Assembly (MEA)	6
2.3.1.1 Gas Diffusion Layer (GDL).....	6
2.3.1.2 Catalyst Layer (CL)	7
2.3.1.3 Membran Nafion.....	7
2.3.2 Pelat Bipolar	8
2.3.3 Gasket	8
2.3.4 End Plate	8
2.4 Katalis Pt-Co/C.....	9
2.5 Metode Sonokimia.....	9

2.6	Karakterisasi Elektroda.....	10
2.6.1	<i>X-ray diffraction</i> (XRD)	10
2.6.2	<i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	10
2.6.3	<i>Cyclic voltammetry</i> (CV).....	10
2.6.4	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS).....	11
2.6.5	Kurva Polarisasi.....	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		13
3.1	Waktu dan Tempat	13
3.2	Alat dan Bahan	13
3.2.1	Alat.....	13
3.2.2	Bahan	13
3.3	Prosedur Percobaan.....	13
3.3.1	Pembuatan Katalis Pt-Co/C	13
3.3.2	Pembuatan GDL	14
3.3.3	Pembuatan Elektroda	15
3.3.4	Karakterisasi Elektroda.....	15
3.3.4.1	<i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	15
3.3.4.2	<i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	15
3.3.4.4	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS).....	16
3.3.5	Pembuatan MEA.....	16
3.3.6	Pengujian kinerja MEA dengan katalis Pt-Co/C pada PEMFC	16
3.4	Analisis Data.....	17
3.4.1	Analisis Data Pengaruh Variasi Laju Alir Hidrogen	17
3.4.2	Analisis CV	18
3.4.3	Analisis EIS	18
3.4.4	Analisis Kinerja MEA	19
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		20
4.1	Karakterisasi Elektroda.....	20
4.1.1	Karakterisasi Elektroda dengan Metode <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) ...	20
4.1.2	Karakterisasi Elektroda dengan Metode <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	21
4.1.3	Karakterisasi Elektroda dengan Metode <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)..	22
4.1.4	Karakterisasi Elektroda dengan Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	24

4.2 Uji Kinerja MEA	25
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	28
5.1 Kesimpulan	28
5.2 Saran	28
DAFTAR PUSTAKA.....	29
LAMPIRAN.....	36
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	57

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Diagram Operasi Fuel Cell (Bargal <i>et al.</i> , 2020).....	4
Gambar 2. Difraktogram Elektroda Pt-Co/C Sintesis.....	20
Gambar 3. Hasil Perbesaran dan Ketebalan SEM (a) Perbesaran 1000x (b) Perbesaran 5000x (c) Perbesaran 10000x (d) Ketebalan Elektroda Pt-Co/C.....	21
Gambar 4. Spektrum EDX untuk elektroda Pt-Co/C Sintesis.....	22
Gambar 5. Kurva Voltammogram (a) Elektroda Pt-Co/C sintesis (b) Elektroda Pt/C Komersial.....	23
Gambar 6. Kurva Nyquist (a) Elektroda Pt-Co/C Sintesis (b) Elektroda Pt/C Komersial.....	24
Gambar 7. Nilai OCV Laju Alir Gas Hidrogen.....	25
Gambar 8. Kurva Polarisasi MEA dengan Katalis Pt-Co/C di Anoda dan Pt/C di katoda pada Laju Alir Gas Hidrogen Bervariasi.....	26
Gambar 9. Kurva Hubungan Densitas Arus Terhadap Densitas Daya dari MEA dengan Katalis Pt-Co/C di Anoda dan Pt/C di Katoda.....	27

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Komposisi Bahan Sintesis Katalis	13
Tabel 2. Data Pengukuran Pengaruh Laju Alir Hidrogen	17

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Skema Kerja.....	37
Lampiran 2. Perbandingan Massa Pt dan Co pada Pt-Co/C.....	40
Lampiran 3. Perhitungan Pembuatan Elektroda.....	41
Lampiran 4. Tabel dan Kurva Perhitungan Nilai ECSA Karakterisasi CV	43
Lampiran 5. Perhitungan Nilai Konduktivitas dari Pengukuran EIS	47
Lampiran 6. Tabel Data Hasil Variasi Laju Alir Gas Hidrogen.....	49
Lampiran 7. Gambar Alat dan Bahan Penelitian	54

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fuel cell merupakan alat yang mengubah energi kimia pada bahan bakar menjadi energi listrik. Efisiensi energi yang dihasilkan dari *fuel cell* sebesar 60 % lebih tinggi dibandingkan metode pembakaran secara konvensional yang biasanya digunakan dalam bidang elektronik, pembangkit listrik, serta aplikasi lainnya. Salah satu jenis *fuel cell* yang banyak dikembangkan dan memiliki kinerja yang lebih tinggi yaitu *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) (Fan *et al.*, 2021). PEMFC sebagai konverter daya yang ramah lingkungan dan telah banyak digunakan dalam otomotif dan portabel yang ramah lingkungan (Sun *et al.*, 2022). Umumnya, PEMFC terdiri dari *membrane electrode assembly* (MEA) dan pelat bipolar (Sim *et al.*, 2021). Secara khusus, MEA merupakan komponen utama dari PEMFC yang diintegrasikan untuk menghasilkan daya (Fan *et al.*, 2021).

Membrane electrode assembly (MEA) terdiri dari *polymeric exchange membrane*, *catalyst layer* dan *gas diffusion layer* digunakan pada setiap sisi anoda dan katoda (Olabi *et al.*, 2022). Dalam MEA, elektroda berperan untuk suplai reaktan, transpor proton dan elektron, manajemen air dan panas, dan reaksi elektrokimia (Tellez-Cruz *et al.*, 2021), elektroda terdiri dari *gas diffusion layer* dan *catalyst layer* (Majlan *et al.*, 2018). *Catalyst layer* menjadi tempat terjadinya reaksi elektrokimia pada *fuel cell* (Tawalbeh *et al.*, 2022). Adapun syarat katalis yang digunakan harus mempunyai aktivitas katalitik yang tinggi seperti platina (Pt) (Lim *et al.*, 2021).

Platina merupakan komponen terpenting dalam elektrokatalis PEMFC (Molmen *et al.*, 2021), yang memiliki konduktivitas (Lim *et al.*, 2021), aktivitas katalitik yang tinggi (Tawalbeh *et al.*, 2022) dan stabilitas yang baik (Tellez-Cruz *et al.*, 2021). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa paduan platina dengan logam transisi yang didukung oleh matriks karbon dapat meningkatkan aktivitas katalitik. Salah satunya berupa paduan antara platina (Pt) dan cobalt (Co) yaitu katalis Pt-Co/C. (Samad *et al.*, 2018).

Kinerja MEA dipengaruhi oleh laju alir gas hidrogen, dimana laju alir gas hidrogen sebagai pengontrol utama. Menambah atau mengurangi laju aliran hidrogen dengan arus tertentu, berpengaruh terhadap hasil kinerja *fuel cell* (Malik *et al.*, 2020). Kinerja MEA dengan laju alir 700 mL/menit tanpa variasi laju alir telah dilakukan oleh Kumar (2018) dengan densitas daya sebesar $0,27 \text{ W/cm}^2$. Uji kinerja MEA dengan laju alir 200 mL/menit juga telah dilakukan oleh Afrizal (2022) dengan densitas daya sebesar $0,0063 \text{ mW/cm}^2$. Berdasarkan latar belakang di atas, penelitian mengenai pengaruh laju alir gas hidrogen terhadap kinerja MEA dengan katalis Pt-Co/C perlu dilakukan menggunakan variasi laju alir gas hidrogen 100, 200, 300 dan 400 mL/menit. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan pengujian kinerja MEA menggunakan katalis Pt-Co/C pada PEMFC dengan laju alir gas hidrogen bervariasi. Penggunaan laju alir bervariasi untuk melihat pengaruh laju alir terhadap kinerja MEA, dan penggunaan laju alir yang relatif lebih rendah dimaksudkan untuk mengurangi penggunaan gas hidrogen tetapi, dengan densitas daya yang tetap tinggi. Sementara itu, karakterisasi elektroda Pt-Co/C dapat dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction (XRD)*, *Scanning Electron Microscope (SEM)*, *Cyclic Voltammetry (CV)* dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana hasil karakterisasi elektroda dengan katalis Pt-Co/C menggunakan XRD dan SEM?
2. Bagaimana hasil ECSA dan konduktivitas listrik pada elektroda dengan katalis Pt-Co/C yang disintesis?
3. Bagaimana pengujian kinerja MEA dengan katalis Pt-Co/C pada PEMFC dengan laju alir gas hidrogen yang bervariasi?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui hasil karakterisasi elektroda dengan katalis Pt-Co/C menggunakan XRD dan SEM.
2. Mengetahui hasil ECSA dan konduktivitas listrik pada elektroda dengan katalis Pt-Co/C yang disintesis.

3. Menentukan pengaruh laju alir gas hidrogen yang bervariasi terhadap kinerja MEA dengan katalis Pt-Co/C pada PEMFC.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini untuk mendapatkan informasi mengenai hasil pengujian kinerja MEA dengan katalis Pt-Co/C dengan laju alir gas hidrogen yang bervariasi dari MEA pada PEMFC.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Rasheed, R. K., & Chan, S. H. (2015). Experimental investigation of open circuit voltage during start-up process of HT-PEMFC. *Electrochimica Acta*, *186*, 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.10.157>
- Ahmed, A., & S.O, Y. (2019). Development of Sump Gasket Sheet from Groundnut Shell Composite. *International Journal of Mechanical Engineering*, *6*(9), 11–21. <https://doi.org/10.14445/23488360/ijme-v6i9p103>
- Ao, Y., Laghrouche, S., & Depernet, D. (2022). Diagnosis of proton exchange membrane fuel cell system based on adaptive neural fuzzy inference system and electrochemical impedance spectroscopy. *Energy Conversion and Management*, *256*(January), 115391. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115391>
- Asghari, S., Shahsamandi, M. H., & Ashraf Khorasani, M. R. (2010). Design and manufacturing of end plates of a 5 kW PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, *35*(17), 9291–9297. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.135>
- Askaripour, H. (2019). Effect of operating conditions on the performance of a PEM fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *144*, 118705. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118705>
- Ban, F. Y., Majid, S. R., Huang, N. M., & Lim, H. N. (2012). Graphene oxide and its electrochemical performance. *International Journal of Electrochemical Science*, *7*(5), 4345–4351. [https://doi.org/10.1016/s1452-3981\(23\)19543-5](https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)19543-5)
- Bargal, M. H. S., Abdelkareem, M. A. A., Tao, Q., Li, J., Shi, J., & Wang, Y. (2020). Liquid cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks: A detailed survey. *Alexandria Engineering Journal*, *59*(2), 635–655. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.02.005>
- Barton, D. J., Nguyen, D. T., Perea, D. E., Stoerzinger, K. A., Lumagui, R. M., Lambeets, S. V., Wirth, M. G., & Devaraj, A. (2024). Towards quantitative analysis of deuterium absorption in ferrite and austenite during electrochemical charging by comparing cyclic voltammetry and cryogenic transfer atom probe tomography. *International Journal of Hydrogen Energy*, *50*, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.256>
- Behavior, E., Mena, C. D., & Guizani, M. (2019). *Use of Cyclic Voltammetry to Describe the Microbial Fuel Cell*. *Energies*, *12*, 1-15. <https://doi.org/10.3390/en12183532>
- Cao, F., Ding, R., Rui, Z., Wang, X., Meng, Z., Zhang, B., Dong, W., Li, J., Liu, J., & Jiang, X. (2023). Advances in Low Pt Loading Membrane Electrode Assembly for Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Molecules*, *28*(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/molecules28020773>
- Chattot, R., Mirolo, M., Martens, I., Kumar, K., Martin, V., Gasmi, A., Dubau, L., Maillard, F., Castanheira, L., & Drnec, J. (2023). Beware of cyclic

- voltammetry! Measurement artefact in accelerated stress test of fuel cell cathode revealed by operando X-ray diffraction. *Journal of Power Sources*, 555(November 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232345>
- Chen, J., Ou, Z., Chen, H., Song, S., Wang, K., & Wang, Y. (2021). Recent developments of nanocarbon based supports for PEMFCs electrocatalysts. *Chinese Journal of Catalysis*, 42(8), 1297–1326. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(20\)63736-6](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(20)63736-6)
- Choi, S. R., Kim, D. Y., An, W. Y., Choi, S., Park, K., Yim, S. D., & Park, J. Y. (2022). Assessing the degradation pattern and mechanism of membranes in polymer electrolyte membrane fuel cells using open-circuit voltage hold and humidity cycle test protocols. *Materials Science for Energy Technologies*, 5, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.12.001>
- Coguplugil, Z. K., Akin, M., Bayat, R., Bekmezci, M., Karimi-Maleh, H., Javadi, A., & Sen, F. (2023). Synthesis and characterization of Pt/ZnO@SWCNT/Fe₃O₄ as a powerful catalyst for anodic part of direct methanol fuel cell reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(55), 21285–21293. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.238>
- Dafalla, A. M., Wei, L., Habte, B. T., Guo, J., & Jiang, F. (2022). Membrane Electrode Assembly Degradation Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A Review. *Energies*, 15(23), 1–26. <https://doi.org/10.3390/en15239247>
- Fili, M. H., Habibnia, M., & Ghasemi Tamami, P. (2017). Modeling and experimental study on the sealing gasket of proton exchange membrane fuel cells. *Iranian Journal of Hydrogen & Fuel Cell*, 3(3), 213–220. https://ijhfc.irost.ir/article_416.html
- Ganeshbabu, M., Priya, J. S., Manoj, G. M., Puneeth, N. P. N., Shobana, C., Shankar, H., & Selvan, R. K. (2023). Photocatalytic degradation of fluoroquinolone antibiotics using chitosan biopolymer functionalized copper oxide nanoparticles prepared by facile sonochemical method. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253(P4), 127027. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127027>
- Hack, J., Heenan, T. M. M., Iacoviello, F., Mansor, N., Meyer, Q., Shearing, P., Brandon, N., & Brett, D. J. L. (2018). A Structure and Durability Comparison of Membrane Electrode Assembly Fabrication Methods: Self-Assembled Versus Hot-Pressed. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(6), F3045–F3052. <https://doi.org/10.1149/2.0051806jes>
- Hao, D., Shen, J., Hou, Y., Zhou, Y., & Wang, H. (2016). An Improved Empirical Fuel Cell Polarization Curve Model Based on Review Analysis. *International Journal of Chemical Engineering*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/4109204>
- Imtiaz, T., Ahmed, A., Sahadat Hossain, M. D., & Faysal, M. (2020). Microstructure analysis and strength characterization of recycled base and sub-base materials using scanning electron microscope. *Infrastructures*, 5(9).

<https://doi.org/10.3390/INFRASTRUCTURES5090070>

- Iwata, H., Hayashi, Y., Hasegawa, A., Terayama, K., & Okuno, Y. (2022). Classification of scanning electron microscope images of pharmaceutical excipients using deep convolutional neural networks with transfer learning. *International Journal of Pharmaceutics: X*, 4(August), 100135. <https://doi.org/10.1016/j.ijpx.2022.100135>
- Julinawati, Marlina, Rosnani Nasution, & Sheilatina. (2015). Applying Sem-Edx Techniques To Identify Types of Mineral of Jades (Giok) Takengo Fyng theon, Aceh. *Jurnal Natural*, 15(2), 45–48.
- Karadeniz, S., & Ayas, N. (2024). Microwave-assisted synthesis of Pt/C catalyst at high temperatures for PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.147>
- Kumar, P. R., Suryawanshi, P. L., Gumfekar, S. P., Bhanvase, B. A., & Sonawane, S. (2018). Sonochemical synthesis of Pt-Co/C electrocatalyst for PEM fuel cell applications. *Surfaces and Interfaces*, 12(July 2017), 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.04.002>
- Kumari, Y. A. S. J. P., Padmaja, K., & Kumari, P. R. (2018). A fuel cell and its applications. *AIP Conference Proceedings*, 1992(06), 6–10. <https://doi.org/10.1063/1.5047980>
- Lee, D., Lim, J. W., Nam, S., Choi, I., & Lee, D. G. (2015). Gasket-integrated carbon/silicone elastomer composite bipolar plate for high-temperature PEMFC. *Composite Structures*, 128, 284–290. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.063>
- Li, D., Qi, R., & Zhang, L. Z. (2019). Electrochemical impedance spectroscopy analysis of V–I characteristics and a fast prediction model for PEM-based electrolytic air dehumidification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(36), 19533–19546. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.011>
- Lim, B. H., Majlan, E. H., Tajuddin, A., Husaini, T., Wan Daud, W. R., Mohd Radzuan, N. A., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.07.044>
- Liu, S., Hua, S., Lin, R., Wang, H., Cai, X., & Ji, W. (2022). Improving the performance and durability of low Pt-loaded MEAs by adjusting the distribution positions of Pt particles in cathode catalyst layer. *Energy*, 253, 124201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124201>
- Liu, W., Xie, Y., Liu, J., Jie, X., Gu, J., & Zou, Z. (2012). Experimental study of proton exchange membrane fuel cells using Nafion 212 and Nafion 211 for portable application at ambient pressure and temperature conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(5), 4673–4677. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.04.233>
- Lorwanishpaisarn, N., Sae-Oui, P., Sirisinha, C., & Siriwong, C. (2023). A new

- approach to the epoxidation of natural rubber through a sonochemical method. *Industrial Crops and Products*, 197(March), 116629. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116629>
- Majlan, E. H., Rohendi, D., Daud, W. R. W., Husaini, T., & Haque, M. A. (2018). Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89(December 2017), 117–134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.007>
- Malik, F. R., Tieqing, Z., & Kim, Y. B. (2020). Temperature and hydrogen flow rate controls of diesel autothermal reformer for 3.6 kW PEM fuel cell system with autoignition delay time analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(53), 29345–29355. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.208>
- Meyer, Q., Zeng, Y., & Zhao, C. (2019). Electrochemical impedance spectroscopy of catalyst and carbon degradations in proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 437(May), 226922. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.226922>
- Modanloo, V., Alimirzalloo, V., & Elyasi, M. (2020). Investigation on forming of titanium bipolar plates using micro-stamping process. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 33(2), 344–349. <https://doi.org/10.5829/IJE.2020.33.02B.20>
- Mohamed, R., Gouws, S., & Ferg, E. (2012). Characterization of Pt catalysts for PEM fuel cells. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 555(January 2022), 149–157. <https://doi.org/10.1080/15421406.2012.635509>
- Mølmen, L., Eiler, K., Fast, L., Leisner, P., & Pellicer, E. (2021). Recent advances in catalyst materials for proton exchange membrane fuel cells. *APL Materials*, 9(4). <https://doi.org/10.1063/5.0045801>
- Mylarappa, M., Chandruvasan, S., Harisha, K. S., Kantharaju, S., & Kumar, S. G. P. (2023). Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers Development of Coriander Honey loaded CeO₂ for cyclic voltammetry, chemical sensor, dye purification, and antioxidant properties. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 152(August), 105174. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105174>
- Nguyen, H. L., Han, J., Nguyen, X. L., Yu, S., Goo, Y.-M., & Le, D. D. (2021). Review of the Durability of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell in Long-Term Operation: Main Influencing Parameters and Testing Protocols. *Energies*, 14, 1-34. <https://doi.org/10.3390/en14134048>
- Olabi, A. G., Wilberforce, T., Alanazi, A., Vichare, P., Sayed, E. T., Maghrabie, H. M., Elsaied, K., & Abdelkareem, M. A. (2022). Novel Trends in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. In *Energies* (Vol. 15, Issue 14). <https://doi.org/10.3390/en15144949>
- P.S., J., & Sutrave, D. S. (2018). A Brief Study of Cyclic Voltammetry and Electrochemical Analysis. *International Journal of ChemTech Research*, 11(9), 77–88. <https://doi.org/10.20902/ijctr.2018.110911>

- Qu, D., Malik, A., & Yu, H. C. (2022). Physics-based simulation of electrochemical impedance spectroscopy of complex electrode microstructures using smoothed boundary method. *Electrochimica Acta*, 432(April), 141141. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141141>
- Radestia Rahmah, D., Rohendi, D., Syarif, N., Rachmat, A., Sya'baniah, N. F., & Hawa Yulianti, D. (2021). Characterization of Electrode with Cu₂O-ZnO/C and Pt-Ru/C Catalyst for Electrochemical Reduction CO₂ to CH₃OH. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 6(1), 8–13. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v6.i1.08>
- Retnaningsih, L., Muliani, L., & Anggraini, P. N. (2016). Analisis Hasil Sintesis Serbuk TiO₂ / ZnO sebagai Lapisan Elektroda untuk Aplikasi Dye-sensitized Solar Cell. *Jurnal Elektronika Dan Telekomunikasi*, 15(2), 55. <https://doi.org/10.14203/jet.v15.55-59>
- Rodríguez-Proenza, C. A., Palomares-Báez, J. P., Chávez-Rojo, M. A., García-Ruiz, A. F., Azanza-Ricardo, C. L., Santoveña-Urbe, A., Luna-Bárceñas, G., Rodríguez-López, J. L., & Esparza, R. (2018). Atomic surface segregation and structural characterization of PdPt bimetallic nanoparticles. *Materials*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/ma11101882>
- Rohendi, D., Rachmat, A., & Syarif, N. (2018). Fabrication and Characterization of Pt-Co/C Catalyst for Fuel Cell Electrode. *Journal of Physics: Conference Series*, 1095(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1095/1/012007>
- Rountree, E. S., McCarthy, B. D., Eisenhart, T. T., & Dempsey, J. L. (2014). Evaluation of homogeneous electrocatalysts by cyclic voltammetry. *Inorganic Chemistry*, 53(19), 9983–10002. <https://doi.org/10.1021/ic500658x>
- Ruiz-Camacho, B., Martínez Álvarez, O., Rodríguez-Santoyo, H. H., López-Peréz, P. A., & Fuentes-Ramírez, R. (2015). Mono and bi-metallic electrocatalysts of Pt and Ag for oxygen reduction reaction synthesized by sonication. *Electrochemistry Communications*, 61, 5–9. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2015.09.023>
- Sapkota, P., Boyer, C., Dutta, R., Cazorla, C., & Aguey-Zinsou, K. F. (2020). Planar polymer electrolyte membrane fuel cells: Powering portable devices from hydrogen. *Sustainable Energy and Fuels*, 4(2), 439–468. <https://doi.org/10.1039/c9se00861f>
- Sarker, M., Rahman, M. A., Mojica, F., Mehrazi, S., Kort-Kamp, W. J. M., & Chuang, P. Y. A. (2021). Experimental and computational study of the microporous layer and hydrophobic treatment in the gas diffusion layer of a proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 509(May), 230350. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230350>
- Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 810–853. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.012>
- Shrotri, N., & Daletou, M. K. (2022). The Pt–Co alloying effect on the performance

- and stability of high temperature PEMFC cathodes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(36), 16235–16248. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.109>
- Shu, X., Yang, W., Yang, B., Wei, K., Punyawudho, K., & Liu, C. (2023). Research on EIS characterization and internal morphological changes of LIBs during degradation process. *Engineering Failure Analysis*, 155(October 2023), 107764. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107764>
- Sim, J., Kang, M., & Min, K. (2021). Effects of basic gas diffusion layer components on PEMFC performance with capillary pressure gradient. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(54), 27731–27748. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.205>
- Song, F., Wang, Q., & Wang, T. (2016). The effects of crystallinity on the mechanical properties and the limiting PV (pressure×velocity) value of PTFE. *Tribology International*, 93(November 2020), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.09.017>
- Sun, Y., Mao, L., He, K., Liu, Z., & Lu, S. (2022). Imaging PEMFC performance heterogeneity by sensing external magnetic field. *Cell Reports Physical Science*, 3(10), 101083. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.101083>
- Tawalbeh, M., Alarab, S., Al-Othman, A., & Javed, R. M. N. (2022). The Operating Parameters, Structural Composition, and Fuel Sustainability Aspects of PEM Fuel Cells: A Mini Review. *Fuels*, 3(3), 449–474. <https://doi.org/10.3390/fuels3030028>
- Tellez-Cruz, M. M., Escorihuela, J., Solorza-Feria, O., & Compañ, V. (2021). Proton exchange membrane fuel cells (Pemfcs): Advances and challenges. *Polymers*, 13(18), 1–54. <https://doi.org/10.3390/polym13183064>
- Wang, L., Wu, H., & Guo, S. (2018). Study on electrochemical processes of NiO model electrode during the first lithiation/delithiation cycle via electrochemical impedance spectroscopy. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(12), 11491–11501. <https://doi.org/10.20964/2018.12.51>
- Wu, C. W., Zhang, W., Han, X., Zhang, Y. X., & Ma, G. J. (2020). A systematic review for structure optimization and clamping load design of large proton exchange membrane fuel cell stack. *Journal of Power Sources*, 476(April). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228724>
- Xing, S., Zhao, C., Liu, W., Zou, J., Chen, M., & Wang, H. (2021). Effects of bolt torque and gasket geometric parameters on open-cathode polymer electrolyte fuel cells. *Applied Energy*, 303(August), 117632. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117632>
- Yu, Y. H., Lim, J. W., & Lee, D. G. (2015). Composite sandwich endplates with a compliant pressure distributor for a PEM fuel cell. *Composite Structures*, 119, 505–512. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.030>
- Yuan, X., Hu, X. X., Ding, X. L., Kong, H. C., Sha, H. D., Lin, H., Wen, W., Shen,

- G., Guo, Z., Ma, Z. F., & Yang, Y. (2013). Effects of cobalt precursor on pyrolyzed carbon-supported cobalt-polypyrrole as electrocatalyst toward oxygen reduction reaction. *Nanoscale Research Letters*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-478>
- Zhang, F. Y., Advani, S. G., & Prasad, A. K. (2012). Advanced High Resolution Characterization Techniques for Degradation Studies in Fuel Cells. In *Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386936-4.10008-9>
- Zhao, L., Hong, J., Xie, J., Jiang, S., Wei, X., Ming, P., & Dai, H. (2023). Investigation of local sensitivity for vehicle-oriented fuel cell stacks based on electrochemical impedance spectroscopy. *Energy*, 262(PA), 125381. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125381>
- Zheng, H., Matseke, M. S., & Munonde, T. S. (2019). The unique Pd@Pt/C core-shell nanoparticles as methanol-tolerant catalysts using sonochemical synthesis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 57(May), 166–171. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.023>
- Zhu, L. Y., Li, Y. C., Liu, J., He, J., Wang, L. Y., & Lei, J. Du. (2022). Recent developments in high-performance Nafion membranes for hydrogen fuel cells applications. *Petroleum Science*, 19(3), 1371–1381. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.11.004>
- Zore, U. K., Yedire, S. G., Pandi, N., Manickam, S., & Sonawane, S. H. (2021). A review on recent advances in hydrogen energy, fuel cell, biofuel and fuel refining via ultrasound process intensification. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73(March), 105536. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105536>