

**PRODUKSI GAS HIDROGEN MELALUI ELEKTROLISIS AIR  
BERBASIS *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* DENGAN DAN  
TANPA MPL MENGGUNAKAN KATALIS  $Cu_2O/C$  DAN MEMBRAN  
NAFION-117**

**SKRIPSI**

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



**Oleh:**

**Lamria Berihana F Manurung**

**08031382025092**

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

**2024**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**PRODUKSI GAS HIDROGEN MELALUI ELEKTROLISIS AIR  
BERBASIS MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY DENGAN DAN  
TANPA MPL MENGGUNAKAN KATALIS  $Cu_2O/C$  DAN MEMBRAN  
NAFION-117**

**SKRIPSI**

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

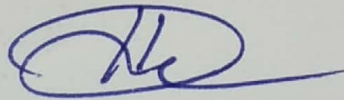
**Oleh :**

**LAMRIA BERLIANA F MANURUNG**

**08031382025092**

**Indralaya, 20 Maret 2024**

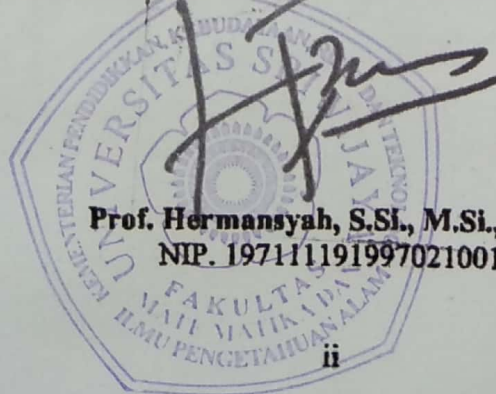
**Menyetujui,  
Pembimbing**



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

**Mengetahui**

**Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



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

**ii**

**Universitas Sriwijaya**

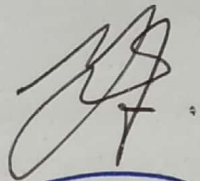
## HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi Lamria Berliana F Manurung (08031382025092) dengan judul "Produksi Gas Hidrogen Melalui Elektrolisis Air Berbasis *Membrane Electrode Assembly* dengan dan tanpa MPL Menggunakan Katalis  $\text{Cu}_2\text{O/C}$  dan Membran Nafion-117" telah diseminarkan di hadapan Tim Penguji Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 19 Maret 2024 dan telah diperiksa serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, 20 Maret 2024

Ketua:

1. Dr. Nova Yuliasari, M. Si  
NIP. 197307261999032001

(  )

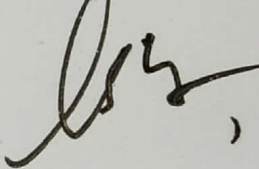
Pembimbing:

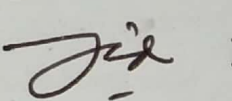
1. Prof. Drs. Dedi Rohendi, M. T., Ph.D  
NIP. 196704191993031001

(  )

Penguji:

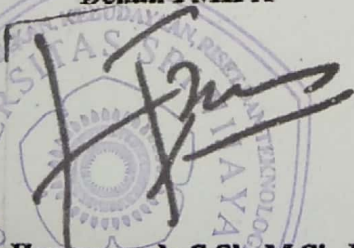
1. Dr. Addy Rachmat, M.Si  
NIP. 197409282000121001
2. Widia Purwaningrum, M.Si  
NIP. 197304031999032001

(  )

(  )

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 betanda tangan dibawah ini:

Nama Mahasiswa : Lamria Berliana F Manurung

NIM : 08031382025092

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 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.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya,

Indralaya, 20 Maret 2024

Yang menyatakan



Lamria Berliana F Manurung  
NIM.08031382025092

## HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai civitas akademik Universitas Sriwijaya, yang bertandatangan dibawah ini:

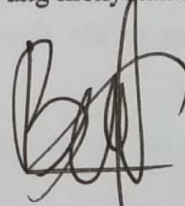
Nama : Lamria Berliana F Manurung  
NIM : 08031382025092  
Fakultas/Jurusan : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam/Kimia  
Jenis Karya : Skripsi

Dengan 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 "Produksi Gas Hidrogen Melalui Elektrolisis Air Berbasis *Membrane Electrode Assembly* dengan dan tanpa MPL Menggunakan Katalis  $\text{Cu}_2\text{O/C}$  dan Membran Nafion-117" 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 dan pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya.

Indralaya, 20 Maret 2024

Yang menyatakan,



Lamria Berliana F Manurung  
NIM. 08031382025092

## HALAMAN PERSEMBAHAN

Kemuliaan bagi Allah di tempat yang mahatinggi dan damai Sejahtera di bumi di antara manusia yang berkenan kepada-Nya. (Lukas 2:14)

Segala perkara dapat kutanggung di dalam Dia yang memberi kekuatan kepadaku. (Filipi 4:13). Tuhan akan mengangkat engkau menjadi kepala dan bukan menjadi ekor, engkau akan tetap naik dan bukan turun, apabila engkau mendengarkan perintah Tuhan, Allahmu, yang kusampaikan pada hari ini, dengan setia, (Ulangan 28:13)

Bersukacitalah dalam pengharapan, sabarlah dalam kesesakan, dan bertekunlah dalam doa! (Roma 12:12). Karena masa depan sungguh ada, dan harapanmu tidak akan hilang (Amsal 23:18).

Saya juga sangat berterimakasih kepada semua orang yang ikut andil dalam pengerjaan skripsi ini. Saya sampaikan terimakasih kepada:

1. Mamaku yang selalu mendukung dan memberikan lelucon yang menenangkan penulis disaat merasa khawatir.
2. Bapak yang ada di surga, yang semasa hidupnya memberikan semangat kepada penulis untuk selalu belajar dan tidak cepat puas untuk semua yang sudah dicapai.
3. Keluarga besar penulis, yang sudah memberikan dukungan doa dan motivasi kepada penulis untuk menyelesaikan pendidikan di Universitas Sriwijaya.
4. Dosen Pembimbing (Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T.,Ph.D) yang sudah membagikan ilmu, motivasi serta memperhatikan dalam segala aspek penulis agar dapat menyelesaikan tugas akhir.
5. Semua orang yang penulis kasihi yang sudah ada di masa-masa senang maupun sulit.
6. Sahabat dan teman-teman yang selalu setia menemani penulis di masa perkuliahan,
7. Teman-teman seperjuangan yaitu Kimia 2020, terimakasih atas kisah yang sudah kita lewati bersama-sama walaupun kita adalah angkatan covid.
8. Almamaterku Universitas Sriwijaya
9. Diri sendiri.

## KATA PENGANTAR

Puji Tuhan atas kasih dan kemurahan-Nya penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Produksi Gas Hidrogen Melalui Elektrolisis Air Berbasis *Membrane Electrode Assembly* dengan dan tanpa MPL Menggunakan Katalis  $\text{Cu}_2\text{O/C}$  dan Membran Nafion-117”. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Kimia Universitas Sriwijaya. Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada dosen pembimbing **Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D** yang telah banyak membantu, memberikan bimbingan, pengalaman, motivasi, saran dan nasihat kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Penulis juga menyampaikan terimakasih 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 sekaligus selaku pembahas dan penguji sidang sarjana penulis.
4. Ibu Widia Purwaningrum, M.Si. juga selaku pembahas dan penguji sidang sarjana penulis.
5. Bapak Prof. Dr. rer. nat Risfidian Mohadi, S.Si., M.Si selaku Dosen pembimbing akademik.
6. Seluruh Dosen Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu, membimbing serta mendidik selama masa perkuliahan hingga lulus.
7. Yuk Nur, Yuk Niar dan Yuk Yanti selaku Analis Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
8. Kak Chosiin dan Mbak Novi selaku Admin Jurusan Kimia Universitas Sriwijaya yang telah membantu dalam proses administrasi penulis hingga lulus.
9. Kak Icha Amelia, mentorku yang terkasih, terimakasih telah sabar dalam membimbing liak selama penelitian dan proses penulisan liak dapat terselesaikan dengan baik dan rela menemani liak bolak-balik PUSRI.

10. Kakak mentor PUR (Kak Reka, Kak Dwi, Kak Icha), terimakasih kakak-kakak atas semua ilmu yang sudah diberikan dan support yang senantiasa liak dapatkan dari wanita-wanita hebat ini.
11. Sahabat perjuanganku dari SD Meipa Putriyana yang selalu ada bagi penulis, semangat Mei untuk mengejar gelarnya.
12. Sahabatku Chindy Iswari yang sudah memberikan dukungan kepada penulis dari SMP sampai kuliah dengan semua tingkah randomnya.
13. Sahabat-sahabatku (Engel, Novi dan Yessi) meskipun jarang bertemu namun tidak pernah sekalipun saling melupakan, terimakasih sudah memberikan semangat kepada penulis.
14. Wanita-wanita strong (Kira, Dinda, Jesika) terimakasih telah menjadi sahabat seperjuangan, tempat menumpahkan keluh kesah, penghibur, serta tempat bertukar pikiran.
15. Yobel dan OASYS yang sudah menjadi saudara-saudari seiman di Bumi Layo tercinta, sudah memberikan sharing-sharing yang menguatkan penulis selama berkuliah.
16. Partner seper-KP-an ciwi-ciwi Pick me (Fita, Riska dan Erida) terimakasih telah memberikan kisah selama melakukan KP di BSPJI Palembang.
17. Kak Yollanda (Kim'19) yang sudah banyak membantu liak selama penelitian di PUR.
18. TIM PUR'20 (Kira, Hawa, Eno, Mayu, Tere, Dina dan Putri), terimakasih atas dukungan, hiburan dan kisah yang sudah kita lukis bersama-sama. See you on the top guys.
19. Teman-teman seperjuangan Kimia Angkatan 2020, terimakasih atas kenangan-kenangan yang sudah kita lewati bersama walaupun kita baru bertemu disemester 3, sukses selalu.
20. Semua pihak yang telah membantu penulis baik secara langsung maupun tidak langsung yang tidak dapat disebutkan satu per satu, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini dengan baik.

Semoga ilmu, bimbingan, masukan serta bantuan yang telah diberikan kepada penulis menjadi tuaian bagi kalian. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan dan kesalahan, harapan penulis semoga ada hal positif



yang dapat diambil dan lebih dikembangkan dari karya ilmiah skripsi ini. Akhir kata penulis mengucapkan terimakasih

Indralaya, 20 Maret 2024

Penulis

## SUMMARY

### HYDROGEN GAS PRODUCTION THROUGH MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY BASED WATER ELECTROLYSIS WITH AND WITHOUT MPL USING $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ CATALYST AND NAFION-117 MEMBRANE

Lamria Berliana F Manurung : Supervised by Prof. Drs. Dedi Rohendi, M. T., Ph.D  
Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Sriwijaya University  
xi + 58 pages, 2 tables, 11 figures, 11 attachment

Hydrogen as an energy carrier holds significant potential in supporting the global energy transition towards cleaner and sustainable energy sources. Research on various methods of hydrogen production is an intriguing endeavor. A study on hydrogen gas production through water electrolysis based on membrane electrode assembly (MEA) with and without Microporous Layer (MPL) using  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$  catalyst and Nafion-117 membrane has been conducted. The water electrolysis process is carried out using MEA with and without MPL coated with  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$  catalyst on both the cathode and anode sides. Electrode fabrication involves spreading the catalyst along the Gas Diffusion Layer (GDL) surface (for MEA with MPL) and on carbon paper for MEA without MPL. The MEA prepared with and without MPL are implemented to investigate the influence of MPL usage on the hydrogen production rate. The produced electrodes are characterized using Cyclic Voltammetry (CV) and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) methods. The Electrochemical Surface Area (ECSA) value for the electrode with MPL is  $5.72 \text{ m}^2/\text{g}$ , while the electrode without MPL is  $326 \text{ m}^2/\text{g}$ . The electrical conductivity values for the electrode with MPL are  $1.74 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ , and for the electrode without MPL, it is  $1.59 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ . Water electrolysis is conducted using an electrolysis cell containing MEA with a size of  $49 \text{ cm}^2$  at electric currents of 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, and 3 A. Electrolysis of water using MEA with MPL produces a hydrogen production rate of 2.6978 mL/s at 3 A, while MEA without MPL yields a hydrogen production rate of 2.1367 mL/s at 2 A.

Keyword : Hydrogen production,  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ , MPL, Cyclic Voltammetry (CV),  
*Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*

Citations : 81 (2010-2023)

## RINGKASAN

### **PRODUKSI GAS HIDROGEN MELALUI ELEKTROLISIS AIR BERBASIS *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* DENGAN DAN TANPA MPL MENGGUNAKAN KATALIS $\text{Cu}_2\text{O/C}$ DAN MEMBRAN NAFION-117**

Lamria Berliana F Manurung, dibimbing oleh Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya  
xi + 58 halaman, 2 tabel, 11 gambar, 11 lampiran

Hidrogen sebagai *energy carrier* memiliki potensi besar dalam mendukung transisi energi global menuju sumber daya energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Riset mengenai berbagai metode produksi hidrogen merupakan hal yang menarik untuk dilakukan. Penelitian mengenai produksi gas hidrogen melalui elektrolisis air berbasis *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan dan tanpa MPL (*Microporous Layer*) menggunakan katalis  $\text{Cu}_2\text{O/C}$  dan membran nafion-117 telah dilakukan. Proses elektrolisis air dilakukan menggunakan MEA dengan dan tanpa MPL yang dilapisi katalis  $\text{Cu}_2\text{O/C}$  pada sisi katoda maupun anoda. Pembuatan elektroda dilakukan dengan menyebarkan katalis di sepanjang permukaan *Gas Diffusion Layer* (GDL) (untuk MEA dengan MPL) dan di atas *carbon paper* untuk MEA tanpa MPL. Preparasi MEA dengan dan tanpa MPL dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan MPL terhadap laju produksi hidrogen. Elektroda yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS). Nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA) elektroda dengan MPL sebesar  $5,72 \text{ m}^2/\text{g}$  dan elektroda tanpa MPL sebesar  $326 \text{ m}^2/\text{g}$ . Nilai konduktivitas elektrik dari elektroda dengan MPL diperoleh sebesar  $1,74 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$  dan elektroda tanpa MPL sebesar  $1,59 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ . Elektrolisis air dilakukan menggunakan sel elektrolisis yang mengandung MEA dengan ukuran  $49 \text{ cm}^2$  pada arus listrik 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 dan 3 A. Elektrolisis air menggunakan MEA dengan MPL menghasilkan nilai laju produksi hidrogen sebesar  $2,6978 \text{ mL/s}$  pada arus 3 A, sedangkan MEA tanpa MPL menghasilkan laju produksi hidrogen sebesar  $2,1367 \text{ mL/s}$  pada arus 2 A.

Kata Kunci : Produksi hidrogen,  $\text{Cu}_2\text{O/C}$ , MPL, *Cyclic Voltammetry* (CV),  
*Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Kutipan : 81 (2010-2023)

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>iv</b>
<b>RINGKASAN .....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>4</b>
2.1 Hidrogen.....	4
2.2 Elektrolisis Air .....	5
2.2.1 <i>Solid Oxide Electrolysis (SOE)</i> .....	6
2.2.2 <i>Alkaline Water Electrolysis (AWE)</i> .....	6
2.2.3 PEM Elektrolisis .....	7
2.3 Komponen Penyusun PEM ( <i>Proton Exchange Membrane</i> )	
Elektrolisis Air .....	8
2.3.1 <i>Porous Transport Layer (PTL)</i> .....	8
2.3.2 Plat Bipolar.....	9
2.3.3 <i>Membrane Electrode Assembly (MEA)</i> .....	9
2.3.3.1 <i>Gas Diffusion Layer (GDL)</i> .....	10
2.3.3.2 Lapisan Katalis.....	10
2.3.3.3 Membran Elektrolit Padat .....	11
2.4 Karbon.....	12
2.5 <i>Cyclic Voltammetry (CV)</i> .....	12
2.6 <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i> .....	13

<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>15</b>
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 Diffusion Layer</i> (GDL) .....	15
3.3.2 Pembuatan Katalis Cu <sub>2</sub> O/C .....	16
3.3.3 Aktivasi Membran .....	16
3.3.4 Pembuatan Elektroda .....	16
3.3.5 Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda Menggunakan Metode <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV) .....	17
3.3.6 Pengukuran Nilai Konduktivitas Elektrik Elektroda Menggunakan Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS) .....	17
3.3.7 Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA) dengan dan tanpa MPL dan Pemasangan MEA pada Stek .....	17
3.4 Produksi Hidrogen .....	18
3.4.1 Produksi Hidrogen Menggunakan MEA dengan dan tanpa MPL pada Variasi Arus .....	18
3.5 Analisis Data .....	19
3.5.1 Analisis Laju Produksi Hidrogen .....	19
3.5.2 Analisis Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda .....	19
3.5.3 Analisis Konduktivitas Elektrik Elektroda .....	19
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>21</b>
4.1 Karakterisasi Elektroda .....	21
4.1.1 Karakterisasi Elektroda dengan dan tanpa MPL Menggunakan Metode <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV) .....	21
4.1.2 Karakterisasi Elektroda dengan dan tanpa MPL Menggunakan Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS) .....	24
4.2 Laju Produksi Hidrogen .....	26
4.2.1 Laju Produksi Hidrogen Menggunakan MEA dengan dan tanpa MPL pada Variasi Arus .....	26
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>31</b>

5.1 Kesimpulan .....	31
5.2 Saran.....	31
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>32</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>41</b>

## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
Gambar 1. Komponen penyusun sel elektrolisis air berbasis PEM .....	8
Gambar 2. Komponen penyusun MEA.....	10
Gambar 3. Skema produksi hidrogen menggunakan metode elektrolisis dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ .....	18
Gambar 4. Kurva voltamogram elektroda $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ dengan MPL dengan loading katalis $2,5 \text{ mg}/\text{cm}^2$ .....	21
Gambar 5. Kurva voltamogram elektroda $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ tanpa MPL dengan loading katalis $2,5 \text{ mg}/\text{cm}^2$ .....	22
Gambar 6. Permukaan elektroda $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ (a) dengan MPL dan (b) tanpa MPL menggunakan mikroskop digital .....	23
Gambar 7. Kurva <i>Nyquist</i> elektroda $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ a) dengan MPL dan b) tanpa MPL.....	24
Gambar 8. Laju produksi hidrogen menggunakan MEA dengan dan tanpa MPL pada variasi arus.....	26
Gambar 9. Kerusakan MEA stek elektroliser .....	28
Gambar 10. Kurva polarisasi MEA dengan dan tanpa MPL .....	29
Gambar 11. Kurva daya MEA dengan dan tanpa MPL .....	30

## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
Tabel 1. Hasil perhitungan ECSA elektroda dengan dan tanpa MPL menggunakan katalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ .....	23
Tabel 2. Data hasil <i>fitting</i> kurva <i>Nyquist</i> dan nilai konduktivitas elektrik pada elektroda $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ dengan dan tanpa MPL .....	25



## DAFTAR LAMPIRAN

	<b>Halaman</b>
Lampiran 1. Pembuatan <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL).....	42
Lampiran 2. Preparasi Katalis Cu <sub>2</sub> O/C .....	43
Lampiran 3. Preparasi Elektroda Katalis Cu <sub>2</sub> O/C.....	44
Lampiran 4. Aktivasi Membran Nafion-117.....	45
Lampiran 5. Pembuatan MEA dengan dan tanpa MPL .....	46
Lampiran 6. Perhitungan Pembuatan GDL.....	47
Lampiran 7. Perhitungan Pembuatan Elektroda.....	48
Lampiran 8. Tabel dan Kurva Hasil Pengukuran <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV).	49
Lampiran 9. Perhitungan Nilai Konduktivitas Pengukuran <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS) .....	52
Lampiran 10. Tabel dan Hasil Perhitungan Laju Produksi Hidrogen.....	53
Lampiran 11. Gambar Alat dan Bahan Penelitian .....	57

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Keberadaan sumber energi fosil seperti batubara, minyak bumi dan gas alam semakin menipis karena penggunaan secara terus menerus. Hal ini juga memberikan dampak negatif terhadap lingkungan (Wang *et al.*, 2010). Dampak negatif terhadap lingkungan mencakup peningkatan emisi karbon dioksida, terjadinya hujan asam, penipisan lapisan ozon dan meningkatnya efek rumah kaca. Konsekuensi dari dampak negatif tersebut yaitu terjadi perubahan iklim yang ekstrem (Pramudiyanto & Suedy, 2020). Masalah yang disebabkan oleh penggunaan energi bahan bakar fosil dapat diatasi dengan melakukan pengembangan sumber energi terbarukan (Chi & Yu, 2018). Ada beberapa sumber energi terbarukan seperti energi angin, energi surya, energi *geothermal* dan energi biomassa (Wang *et al.*, 2022). Diantara sumber energi terbarukan yang telah dikembangkan, *fuel cell* menjadi salah satu sumber energi yang memiliki efisiensi penggunaan bahan bakar yang tinggi dan bersifat ramah lingkungan (Zhang *et al.*, 2019). Selain itu, *fuel cell* dapat menggunakan berbagai jenis bahan bakar, seperti hidrogen, metanol, etanol dan gas alam (Sharaf & Orhan, 2014).

Salah satu jenis *fuel cell* dengan bahan bakar hidrogen adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). PEMFC menjadi salah satu alat konversi energi yang banyak digunakan karena desainnya yang sederhana dan pengoperasiannya ramah lingkungan (Okonkwo & Otor, 2021). Hidrogen sebagai *energy carrier* menjadi salah satu alternatif paling menjanjikan dalam mengatasi masalah kelangkaan bahan bakar fosil dan juga untuk mengurangi dampak yang disebabkan oleh bahan bakar fosil (Chen *et al.*, 2011). Hidrogen bersifat lebih ramah lingkungan. Hidrogen tidak dapat ditemukan dalam bentuk bebas, tetapi berikatan dengan senyawaan lain. Salah satu metode yang digunakan untuk memproduksi gas hidrogen ialah *Proton Exchange Membrane* (PEM) elektrolisis air (Li *et al.*, 2023).

Metode elektrolisis air untuk menghasilkan gas hidrogen banyak dilakukan karena prosesnya sederhana dan tidak menghasilkan produk samping yang berbahaya. Proses ini melibatkan pemecahan molekul H<sub>2</sub>O menjadi H<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> untuk mendapatkan hidrogen murni (Prayono *et al.*, 2022). Produksi gas hidrogen

melalui PEM elektrolisis air menjadi pilihan yang menjanjikan. Hal tersebut dikarenakan metode elektrolisis air mempunyai kelebihan seperti kepadatan arus yang tinggi, tingkat kemurnian gas hidrogen yang tinggi, waktu *start-up* yang cepat dan tekanan produksi hidrogen yang tinggi (Ogumerem & Pistikopoulos, 2020).

Produksi hidrogen dengan metode PEM elektrolisis air dilakukan dengan menggunakan katalis  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Katalis  $\text{Cu}_2\text{O}$  dalam metode PEM elektrolisis memiliki kelebihan antara lain; semikonduktor, mudah dicampur dengan polimer, relatif stabil dari sifat fisik dan kimia, memiliki aplikasi yang luas dan harganya murah (Badawy *et al.*, 2015).  $\text{Cu}_2\text{O}$  memiliki konduktivitas listrik yang rendah, sehingga menghambat penggunaannya dalam bidang elektrokatalisis. Peningkatan konduktivitas listrik dan ketahanan  $\text{Cu}_2\text{O}$  terhadap korosi dilakukan dengan penambahan material karbon untuk mensintesis katalis  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$  (Ye *et al.*, 2014). Komponen utama sel elektrolisis air berbasis PEM antara lain, MEA, pengumpul arus dan pelat pemisah (Feng *et al.*, 2017).

MEA tersusun atas *gas diffusion layer* (GDL), elektroda dan *catalyst layer* (CL). Secara umum, GDL terdiri dari substrat berpori besar yang dapat memiliki atau tidak memiliki *microporous layer* (MPL) (Omriani & Shabani, 2017). MPL memiliki sifat hidrofobik yang membentuk penghalang hidrofilik. Jika dibandingkan dengan GDL tanpa MPL, air yang terbentuk di CL harus mencapai tekanan yang lebih tinggi agar dapat meresap ke dalam pori-pori MPL. MPL memiliki fungsi mendistribusikan reaktan secara lebih merata ke elektroda dan dapat meningkatkan ketahanan terhadap arus tinggi (Saka *et al.*, 2023). Meskipun MPL memiliki manfaat yang menguntungkan, beberapa penelitian seperti yang dilakukan Omriani & Shabani, 2017 dan Xie *et al.*, 2018 menunjukkan bahwa penggunaan MPL menyebabkan peningkatan pembatasan transportasi massa dan mengurangi kinerja sel bahan bakar. Hal ini dapat mempengaruhi difusi dan transportasi oksigen ke CL.

Berdasarkan uraian yang telah dijelaskan, pada penelitian ini dilakukan produksi gas hidrogen menggunakan MEA  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$   $2,5 \text{ mg}/\text{cm}^2$  dengan dan tanpa MPL untuk melihat pengaruh penggunaan MPL terhadap laju produksi gas hidrogen. Proses elektrolisis juga dilakukan dengan variasi arus (0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 A) untuk melihat pengaruh arus terhadap laju produksi hidrogen.

Karakterisasi *Cyclic voltammetry* (CV) dilakukan untuk mengetahui nilai ECSA dari elektroda yang digunakan dan karakterisasi *Electrochemical Impedance spectroscopy* (EIS) dilakukan untuk melihat kemampuan elektroda dalam menghantarkan listrik yang digunakan pada proses elektrolisis.

### 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh MPL terhadap karakteristik elektroda dengan katalis  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$  untuk proses elektrolisis air berbasis *Membrane Electrode Assembly*?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan MPL dan tanpa MPL pada *Membrane Electrode Assembly* (MEA) terhadap laju produksi hidrogen dengan metode elektrolisis air pada arus listrik bervariasi?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh MPL terhadap karakteristik elektroda  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$  yaitu nilai ECSA menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan nilai konduktivitas elektrik menggunakan metode *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS).
2. Menentukan pengaruh penggunaan MPL dan tanpa MPL terhadap laju produksi hidrogen menggunakan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) pada proses elektrolisis air dengan arus listrik bervariasi.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam upaya untuk mengoptimalkan produksi hidrogen yang memiliki kemurnian tinggi dan dapat digunakan sebagai bahan bakar *fuel cell* dengan metode elektrolisis air menggunakan MEA dengan katalis  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ .

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, K. W., Jang, M. J., Park, M. G., Chen, Z., & Fowler, M. (2022). Effect of Components and Operating Conditions on the Performance of PEM Electrolyzers: A Review. *Electrochem*, 3(4), 581–612. <https://doi.org/10.3390/electrochem3040040>
- Ajriyanto, M. K., Kriswarini, R., Yanlinastuti, Y., & Lestari, D. E. (2018). Analisis Korosi Pipa Pendingin Sekunder RSG - GAS dengan Teknik Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, 24(2), 105–114. <https://doi.org/10.17146/urania.2018.24.2.4421>
- Aktawan, A., Prasetya, A., & Wilopo, W. (2015). Study of Characteristics of Gasification Process of Various Biomass in a Downdraft Gasifier. *ASEAN Journal of Systems En Gineering*, 3, 1–5.
- Alam, H. M. B., Das, R., Shajahan, M., Atique Ullah, A. K. M., & Kibria, A. K. M. F. (2018). Surface Characteristics and Electrolysis Efficiency of A Palladium-Nickel Electrode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(4), 1998–2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.027>
- Anggraini, I. N., Nugroho, W. S., Rinaldi, R. S., & Herawati, A. (2019). Analisis Pengaruh Tegangan Terhadap Karakteristik Kerja Sel Electrolyzer dengan Variasi Bahan Elektroda. *Jurnal Amplifier : Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Elektro Dan Komputer*, 9(1), 9–15. <https://doi.org/10.33369/jamplifier.v9i1.15395>
- Aziz, F. A., Rustana, C. E., & Fahdiran, R. (2022). Study of Lifetime of Copper and Aluminum Electrodes in Electrolysis of Seawater Process to Produce Hydrogen Gas. *Jurnal Neutrino*, 14(2), 50–56. <https://doi.org/10.18860/neu.v14i2.15218>
- Badawy, S. M., El-Khashab, R. A., & Nayl, A. A. (2015). Synthesis, Characterization and Catalytic Activity of Cu/Cu<sub>2</sub>O Nanoparticles Prepared in Aqueous Medium. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 10(2), 169–174. <https://doi.org/10.9767/bcrec.10.2.7984.169-174>
- Bagal, I. V., Chodankar, N. R., Hassan, M. A., Waseem, A., Johar, M. A., Kim, D. H., & Ryu, S. W. (2019). Cu<sub>2</sub>O As An Emerging Photocathode for Solar Water Splitting - A Status Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(39), 21351–21378. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.184>
- Bhosale, A. C., Ghosh, P. C., & Assaud, L. (2020). Preparation Methods Of Membrane Electrode Assemblies For Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Unitized Regenerative Fuel Cells: A Review. *In Renewable and Sustainable Energy Reviews* 133(1). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110286>
- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A Comprehensive Review on PEM Water Electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*,

38(12), 4901–4934. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>

- Chakik, F. ezzahra, Kaddami, M., & Mikou, M. (2017). Effect of Operating Parameters on Hydrogen Production by Electrolysis of Water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40), 25550–25557. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.015>
- Chen, M., Zhao, C., Sun, F., Fan, J., Li, H., & Wang, H. (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(1), 100075. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100075>
- Chen, Y. H., Chen, C. Y., & Lee, S. C. (2011). Technology Forecasting and Patent Strategy of Hydrogen Energy and Fuel Cell Technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(12), 6957–6969. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.063>
- Chi, J., & Yu, H. (2018). Water Electrolysis Based on Renewable Energy for Hydrogen Production. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, 39(3), 390–394. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8)
- Choirotin, I., & Basjir, M. (2019). Analisis Desain Cetakan Sederhana Bipolar Plate pada Proses Pembentukan Superplastis. *FLYWHEEL : Jurnal Teknik Mesin Untirta*, V(1), 20. <https://doi.org/10.36055/fwl.v0i0.4444>
- Chooto, P. (2019). Cyclic Voltammetry and Its Applications. *Intech*, 11(13). <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- Chun, H., Kim, D. H., Jung, H. S., Sim, J., & Pak, C. (2023). Effects of Gas-Diffusion Layer Properties on the Performance of the Cathode for High-Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(71), 27790–27804. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.416>
- Destyorini, F., Irmawati, Y., Widodo, H., Khaerudini, D. S., & Indayaningsih, N. (2018). Properties and Performance of Gas Diffusion Layer PEMFC Derived from Coconut Coir. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 50(3), 409–419. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2018.50.3.7>
- Dewi, R., Azhari, A., & Nofriadi, I. (2021). Aktivasi Karbon dari Kulit Pinang dengan Menggunakan Aktivator Kimia KOH. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 9(2), 12. <https://doi.org/10.29103/jtku.v9i2.3351>
- Doan, T. L., Lee, H. E., Shah, S. S. H., Kim, M. J., Kim, C. H., Cho, H. S., & Kim, T. (2021). A Review of the Porous Transport Layer in Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolysis. *International Journal of Energy Research*, 45(10), 14207–14220. <https://doi.org/10.1002/er.6739>
- Elgrishi, N., Rountree, K. J., McCarthy, B. D., Rountree, E. S., Eisenhart, T. T., &

- Dempsey, J. L. (2018). A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry. *Journal of Chemical Education*, 95(2), 197–206. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00361>
- Fazlunazar, M., Hakim, L., Meriatna, Sulhatun, & Aminullah, M. M. (2020). Produksi Gas Hidrogen dari Air Laut dengan Metode Elektrolisis Menggunakan Elektroda Tembaga dan Aluminium (Cu dan Al). *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 9(1), 58–66. <https://ojs.unimal.ac.id/jtk/article/view/3037/1817>
- Feng, Q., Yuan, X. Z., Liu, G., Wei, B., Zhang, Z., Li, H., & Wang, H. (2017). A Review of Proton Exchange Membrane Water Electrolysis on Degradation Mechanisms and Mitigation Strategies. *Journal of Power Sources*, 366, 33–55. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.006>
- Fitriyanti, F. (2019). Analisis Produktivitas Gas Hidrogen Berdasarkan Arus dan Tegangan pada Proses Elektrolisis H<sub>2</sub>O. *JFT : Jurnal Fisika Dan Terapannya*, 6(2), 154. <https://doi.org/10.24252/jft.v6i2.11775>
- Gallardo, F., García, J., Monforti Ferrario, A., Comodi, G., & Chiu, J. N. (2022). Assessing Sizing Optimality of OFF-GRID AC-Linked Solar PV-PEM Systems for Hydrogen Production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(64), 27303–27325. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.098>
- Gannon, W. J. F., Warwick, M. E. A., & Dunnill, C. W. (2020). Woven Stainless-Steel Mesh As A Gas Separation Membrane for Alkaline Water-Splitting Electrolysis. *Membranes*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/membranes10050109>
- Guo, H., Chen, L., Ismail, S. A., Jiang, L., Guo, S., Gu, J., Zhang, X., Li, Y., Zhu, Y., Zhang, Z., & Han, D. (2022). Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A Review. *Materials*, 15(24). <https://doi.org/10.3390/ma15248800>
- Herlambang, Y. D., & Roihatin, A. (2019). Teknologi Pembangkit Listrik Energi Baru Terbarukan Menggunakan Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell Skala Kecil. *Eksergi*, 15(1), 27. <https://doi.org/10.32497/eksergi.v15i1.1464>
- Ishaq, H., Dincer, I., & Crawford, C. (2022). A Review on Hydrogen Production and Utilization: Challenges and Opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(62), 26238–26264. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.149>
- Islami, M. N., Rupiasih, N. N., Sumadiyasa, M., & Manuaba, I. B. S. (2018). Studi Kurva Karakteristik Arus-Tegangan ( I-V ) Membran Komposit Kitosan-Nanopartikel Perak the Study of Current-Voltage ( I-V ) Characteristic Curve of Chitosan-Silver Nanoparticle Composite Membrane. *Buletin Fisika*, 19(2), 40–45.
- Iwanow, M., Gärtner, T., Sieber, V., & König, B. (2020). Activated Carbon As Catalyst Support: Precursors, Preparation, Modification and Characterization. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 16, 1188–1202.

<https://doi.org/10.3762/bjoc.16.104>

- Joshi, P. S., & 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>
- Kang, Z., Alia, S. M., Young, J. L., & Bender, G. (2020). Effects of Various Parameters of Different Porous Transport Layers in Proton Exchange Membrane Water Electrolysis. *Electrochimica Acta*, 354(1), 1–41. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136641>
- Khan, M. A., Zhao, H., Zou, W., Chen, Z., Cao, W., Fang, J., Xu, J., Zhang, L., & Zhang, J. (2018). Recent Progresses in Electrocatalysts for Water Electrolysis. *In Electrochemical Energy Reviews*, 1(4). <https://doi.org/10.1007/s41918-018-0014-z>
- Kovač, A., Paranos, M., & Marciuš, D. (2021). Hydrogen in Energy Transition: A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10016–10035. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.256>
- Kuhnert, E., Heindinger, M., Sandu, D., Hacker, V., & Bodner, M. (2023). Analysis of PEM Water Electrolyzer Failure Due to Induced Hydrogen Crossover in Catalyst-Coated PFSA Membranes. *Membranes*, 13(3), 1–17. <https://doi.org/10.3390/membranes13030348>
- Li, L., Nakajima, H., Moriyama, A., & Ito, K. (2023). Theoretical Analysis of the Effect of Boiling on the Electrolysis Voltage of A Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolyzer ( PEMWE ). *Journal of Power Sources*, 575(1), 233143. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233143>
- Li, T., Wang, K., Wang, J., Liu, Y., Han, Y., Song, J., Hu, H., Lin, G., & Liu, Y. (2019). Preparation of Hierarchical-Pore Gas Diffusion Layer for Fuel Cell. *Journal of Materials Science*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s10853-019-04323-9>
- Lim, I. S., Lee, Y. Il, Kang, B., Park, J. Y., & Kim, M. S. (2022). Electrochemical Performance and Water Management Investigation of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Using Gas Diffusion Layer with Polytetrafluoroethylene (PTFE) Content Gradients in Through-Plane Direction. *Electrochimica Acta*, 421(1), 140509. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.140509>
- Majasan, J. O., Iacoviello, F., Shearing, P. R., & Brett, D. J. L. (2018). Effect of Microstructure of Porous Transport Layer on Performance in Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolyser. *Energy Procedia*, 151(1), 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.035>
- Middlemiss, L. A., Rennie, A. J. R., Sayers, R., & West, A. R. (2020). Characterisation of Batteries by Electrochemical Impedance Spectroscopy. *Energy Reports*, 6(1), 232–241. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2020.03.029>



- Momeni, S., & Sedaghati, F. (2018). CuO/Cu<sub>2</sub>O nanoparticles: A Simple and Green Synthesis, Characterization and Their Electrocatalytic Performance Toward Formaldehyde Oxidation. *Microchemical Journal*, *143*(1), 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.07.035>
- Ogumerem, G. S., & Pistikopoulos, E. N. (2020). Parametric Optimization and Control for A Smart Proton Exchange Membrane Water Electrolysis (PEMWE) System. *Journal of Process Control*, *91*(1), 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2020.05.002>
- Okonkwo, P. C., & Otor, C. (2021). A Review of Gas Diffusion Layer Properties and Water Management in Proton Exchange Membrane Fuel Cell System. *International Journal of Energy Research*, *45*(3), 3780–3800. <https://doi.org/10.1002/er.6227>
- Omrani, R., & Shabani, B. (2017). Gas Diffusion Layer Modifications and Treatments for Improving the Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Electrolysers: A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(47), 28515–28536. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.132>
- Onggo, H., & Syampurwadi, A. (2013). Pembuatan Gas Diffusion Electrode Dengan Teknik Screen Printing : Pengaruh Microporous Layer Terhadap Strukturmikro dan Kinerja Elektrokatalis. *Indonesian Journal Of Materials Science*, *14*(4), 253–258
- Pan, A., Liu, J., Liu, Z., Yang, Y., Yang, X., & Zhang, M. (2020). Application of Hydrogen Energy and Review of Current Conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *526*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/526/1/012124>
- Park, H. G., Han, S. Y., Jun, K. W., Woo, Y., Park, M. J., & Kim, S. K. (2019). Bench-Scale Steam Reforming of Methane for Hydrogen Production. *Catalysts* *1*(1). <https://doi.org/10.3390/catal9070615>
- Pollet, B. G., Franco, A. A., Su, H., Liang, H., & Pasupathi, S. (2016). Proton Exchange Membrane Fuel Cells. In *Compendium of Hydrogen Energy*, *1*(1). <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-363-8.00001-3>
- Phung, K. K., Sethupathi, S., & Piao, C. S. (2018). Production of H<sub>2</sub> from Aluminium/Water Reaction and Its Potential for CO<sub>2</sub> Methanation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *140*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/140/1/012020>
- Pramudiyanto, A. S., & Suedy, S. W. A. (2020). Energi Bersih dan Ramah Lingkungan dari Biomassa untuk Mengurangi Efek Gas Rumah Kaca dan Perubahan Iklim yang Ekstrem. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, *1*(3), 86–99. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.9990>
- Pratiwi, E. D., Haryati, S., & Syarif, N. (2022). Pengaruh Variasi Binder, Elektrolit dan Pemakaian Emulsi terhadap Kinerja Baterai Litium Ion Berbasis Karbon Batang Kangkung Air (*Ipomoea Aquatica*). *Syntax Literate ; Jurnal Ilmiah*

*Indonesia*, 7(2), 2563. <https://doi.org/10.36418/syntax-literate.v7i2.6308>

- Prayono, A., Anugrah, A., Syofian, A., & Bandri, S. (2022). Analisa Produksi Gas Hidrogen dan Oksigen dari H<sub>2</sub>O Menggunakan Metode Elektrolisis dengan Penambahan Katalis NaHCO<sub>3</sub> (Natrium Bikarbonat). *Jurnal Analisa Produksi Gas Hidrogen*, 12(1), 584–588.
- Pujiastuti, S., & Rahimi, E. (2019). Pembuatan Fuel Cell Stack Berbasis Membran Fision. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 11(1). <https://doi.org/10.17146/jsmi.2009.11.1.4540>
- Purnami, Hamidi, N., Sasongko, M. N., Widhiyanuriyawan, D., & Wardana, I. N. G. (2020). Strengthening External Magnetic Fields with Activated Carbon Graphene for Increasing Hydrogen Production in Water Electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38), 19370–19380. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.148>
- Purnami, P., Wardana, I., & K, V. (2015). Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Laju dan Efisiensi Pembentukan Hidrogen. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 6(1), 51–59. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2015.006.01.8>
- Purwanti, E., Rahmadewi, R., Efelina, V., & Sugihartono, I. (2013). Synthesis and Characterization of Activated Carbon from Fish Bone by Using Activator CaCl<sub>2</sub>. *Fuel Processing Technology*, 116, 346–349. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.07.020>
- Qazi. (2022). Future of Hydrogen As An Alternative Fuel for Next-Generation Industrial Applications; Challenges and Expected Opportunities. *Energies*, 15(1). *Energies* 2022, 15, 4741. <https://doi.org/10.3390/en15134741>
- Rahmah, R. D., Rohendi, D., Syarif, N., Rachmat, A., Sya'baniah, N. F., & Hawa Yulianti, D. (2021). Characterization of Electrode with Cu<sub>2</sub>O-ZnO/C and Pt-Ru/C Catalyst for Electrochemical Reduction CO<sub>2</sub> to CH<sub>3</sub>OH. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 6(1), 8–13. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v6.i1.08>
- Rahman, N. F. A., Shyuan, L. K., Mohamad, A. B., & Kadhum, A. A. H. (2013). Review on Biopolymer Membranes for Fuel Cell Applications. *Applied Mechanics and Materials*, 291–294, 614–617. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.291-294.614>
- Ribeiro, D. V., & Abrantes, J. C. C. (2016). Application of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) to Monitor the Corrosion of Reinforced Concrete: A New Approach. *Construction and Building Materials*, 111, 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.047>
- Rohendi, D., Syarif, N., Rachmat, A., Mersitarini, D., Erliana, R. R. W. H., Mahendra, I., S, N. F., Yulianti, H., Amelia, I., Al, M., & Reo, R. (2022). Effect of Milling Time and PCA on Electrode Properties of Cu<sub>2</sub>O-ZnO / C Catalyst Alloy used on Electrochemical Reduction Method of CO<sub>2</sub>, 14(2), 186–192. <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.02.022>

- Saka, K., Orhan, M. F., & Hamada, A. T. (2023). Design and Analysis of Gas Diffusion Layers in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Coatings*, *13*(1). <https://doi.org/10.3390/coatings13010002>
- Shaari, N., & Kamarudin, S. K. (2019). Recent Advances in Additive-Enhanced Polymer Electrolyte Membrane Properties in Fuel Cell Applications: An Overview. *International Journal of Energy Research*, *43*(7), 2756–2794. <https://doi.org/10.1002/er.4348>
- Shan, J., Lin, R., Chen, X., & Diao, X. (2018). EIS and Local Resolved Current Density Distribution Analysis On Effects Of MPL On PEMFC Performance At Varied Humidification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *127*, 1076–1083. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.033>
- Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014). An Overview Of Fuel Cell Technology: Fundamentals And Applications. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, *32*(1), 810–853. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.012>
- Sharaf, S. M. (2020). Smart Conductive Textile. *In Advances in Functional and Protective Textiles*, *1*(1). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820257-9.00007-2>
- Shiva Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen Production by PEM Water Electrolysis – A Review. *Materials Science for Energy Technologies*, *2*(3), 442–454. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>
- Siracusano, S., Hodnik, N., Jovanovic, P., Ruiz-Zepeda, F., Šala, M., Baglio, V., & Aricò, A. S. (2017). New Insights into the Stability of A High Performance Nanostructured Catalyst for Sustainable Water Electrolysis. *In Nano Energy*, *40*(1). <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.09.014>
- Sulfani, A., & Setiarso, P. (2014). Pembuatan Elektroda Pasta Karbon Termodifikasi Kitosan untuk Analisis Logam Cr (VI) dengan Ion Pengganggu Fe (II) dan Zn (II) Secara Cyclic Stripping Voltammetry Manufacture of Chitosan Modified Carbon Paste Electrode for the Analysis Of Cr (VI). *UNESA Journal of Chemistry*, *3*(3), 60–73.
- Suyanta, Sunarto, Padmaningrum, R. T., Karlinda, Isa, I. M., & Rahadian. (2021). Development of Voltammetry Analysis Method of Copper Metal Ions by Solid-State Membrane with Carbon Nanotube. *Indonesian Journal of Chemistry*, *21*(2), 332–339. <https://doi.org/10.22146/ijc.55056>
- Tang, A., Crisci, L., Bonville, L., & Jankovic, J. (2021). An Overview of Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *13*(2). <https://doi.org/10.1063/5.0031447>
- Tarhan, C., & Çil, M. A. (2021). A Study on Hydrogen, the Clean Energy of the Future: Hydrogen Storage Methods. *Journal of Energy Storage*, *40*(1), 102676. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102676>
- Van Hoecke, L., Laffineur, L., Campe, R., Perreault, P., Verbruggen, S. W., &

- Lenaerts, S. (2021). Challenges in the Use of Hydrogen for Maritime Applications. *Energy and Environmental Science*, 14(2), 815–843. <https://doi.org/10.1039/d0ee01545h>
- Wang, M., Wang, Z., & Guo, Z. (2010). Water Electrolysis Enhanced by Super Gravity Field for Hydrogen Production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(8), 3198–3205. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.128>
- Wang, S., Lu, A., & Zhong, C. J. (2021). Hydrogen Production from Water Electrolysis: Role of Catalysts. *Nano Convergence*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40580-021-00254-x>
- Wang, T., Cao, X., & Jiao, L. (2022). PEM Water Electrolysis for Hydrogen Production: Fundamentals, Advances, and Prospects. *Carbon Neutrality*, 1(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00022-8>
- Wei, X., Kakimoto, T., Umehara, Y., Nakajima, H., Ito, K., Inagaki, H., & Mori, S. (2023). Improvement of the Critical Current Density of Alkaline Water Electrolysis Based on the Hydrodynamic Similarity Between Boiling and Water Electrolysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 214(1), 124420. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124420>
- Xing, L., Shi, W., Su, H., Xu, Q., Das, P. K., Mao, B., & Scott, K. (2019). Membrane Electrode Assemblies For PEM Fuel Cells: A Review of Functional Graded Design and Optimization. *Energy*, 177, 445–464. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.084>
- Xu, Q., Zhang, L., Zhang, J., Wang, J., Hu, Y., Jiang, H., & Li, C. (2022). Anion Exchange Membrane Water Electrolyzer: Electrode Design, Lab-Scaled Testing System and Performance Evaluation. *EnergyChem*, 4(5), 100087. <https://doi.org/10.1016/j.enchem.2022.100087>
- Yang, D., Tan, Y., Li, B., Ming, P., Xiao, Q., & Zhang, C. (2022). A Review of the Transition Region of Membrane Electrode Assembly of Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Design, Degradation, and Mitigation. *Membranes*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/membranes12030306>
- Ye, D. H., & Zhan, Z. G. (2013). A Review on the Sealing Structures of Membrane Electrode Assembly of Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, 231(1), 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.01.009>
- Ye, L., Li, Z., Zhang, X., Lei, F., & Lin, S. (2014). One-Step Microwave Synthesis of Pt (Pd)/Cu<sub>2</sub>O/Gns Composites and Their Electro-Photo-Synergistic Catalytic Properties for Methanol Oxidation. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(48), 21010–21019. <https://doi.org/10.1039/c4ta05094k>

- Yu, H., Bonville, L., Jankovic, J., & Maric, R. (2020). Microscopic Insights on the Degradation of A PEM Water Electrolyzer With Ultra-Low Catalyst Loading. *Applied Catalysis B: Environmental*, 260, 118194. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118194>
- Zhang, C., Yue, X., Mu, Y., Zuo, X., Lu, N., Luo, Y., Na, R., Zhang, S., & Wang, G. (2019). Novel Pore-Filling Membrane Based on Block Sulfonated Poly (Ether Sulphone) with Enhanced Proton Conductivity and Methanol Resistance For Direct Methanol Fuel Cells. *Electrochimica Acta*, 307(1), 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.03.189>
- Zhang, H., Shao, X., Zhan, Z., Sarker, M., Sui, P. C., Chuang, P. Y. A., & Pan, M. (2023). Pore-Scale Modeling of Microporous Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Effective Transport Properties. *Membranes*, 13(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/membranes13020219>
- Zhao, S., Yu, H., Maric, R., Danilovic, N., Capuano, C. B., Ayers, K. E., & Mustain, W. E. (2015). Calculating the Electrochemically Active Surface Area of Iridium Oxide in Operating Proton Exchange Membrane Electrolyzers. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(12), F1292–F1298. <https://doi.org/10.1149/2.0211512jes>