

**PENGARUH *MICROPOROUS LAYER* (MPL) PADA *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) DALAM PROSES KONVERSI CO<sub>2</sub> MENJADI METANOL SECARA ELEKTROKIMIA**

**SKRIPSI**

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



**Oleh :**

**HAWATI HUSNUL HOTIMAH**

**08031182025002**

**JURUSAN KIMIA**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

**2024**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**PENGARUH *MICROPOROUS LAYER* (MPL) PADA *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) DALAM PROSES KONVERSI  $\text{CO}_2$  MENJADI METANOL SECARA ELEKTROKIMIA**

**SKRIPSI**

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

Oleh:

**HAWATI HUSNUL HOTIMAH**

**08031182025002**

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**

## HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi dengan judul “Pengaruh *Microporous Layer* (MPL) Pada *Membrane Electrode Assembly* (MEA) Dalam Proses Konversi CO<sub>2</sub> Menjadi Metanol Secara Elektrokimia” telah diseminarkan dihadapan Tim Penguji Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal Maret 2024 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, 20 Maret 2024

Ketua:

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

NIP. 196404301990031003

(  )

Sekretaris:

2. **Dr. Heni Yohandini, M.Si.**

NIP. 197011152000122004

(  )

Pembimbing:

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

NIP. 196704191993031001

(  )

Penguji:

1. **Dr. Nirwan Syarif, M.Si.**

NIP. 197010011999031003


(  )


2. **Prof. Dr. Miksusanti, M.Si.**

NIP. 196807231992032003

(  )

Mengetahui,

**Dekan FMIPA**  
  
**Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D.**  
NIP. 19711191997021001

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

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Hawati Husnul Hotimah  
NIM : 08031182025002  
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 sarjana starta (S1) dari Universitas Sriwijaya maupun perguruan tinggi lain. Semua informasi yang dimuat dalam skripsi ini yang berasal dari penulis lain baik yang dipublikasikan atau tidak telah diberikan penghargaan dengan mengutip nama sumber penulis secara benar. Semua isi dari skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya sebagai penulis.

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Indralaya, 20 Maret 2024

Penulis



Hawati Husnul Hotimah

NIM. 08031182025002

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

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

Nama : Hawati Husnul Hotimah  
NIM : 08031182025002  
Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia  
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembanagn ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “hak bebas royalti non-eksklusif (*non-exclusively royalty-free right*) atas karya ilmiah yang berjudul: “Pengaruh *Microporous Layer* (MPL) Pada *Membrane Electrode Assembly* (MEA) Dalam Proses Konversi CO<sub>2</sub> Menjadi Metanol Secara Elektrokimia”. 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.

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sungguh – sungguhnya.

Indralaya, 20 Maret 2024

Penulis



Hawati Husnul Hotimah

NIM. 08031182025002

## HALAMAN PERSEMBAHAN

“Wahai orang-orang beriman, mohonlah pertolongan (kepada Allah) dengan sabar dan sholat. Sungguh, Allah beserta orang-orang yang sabar.”

**(QS. Al-Baqarah/2:153)**

“..... Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal itu baik bagimu, dan boleh jadi kamu menyukai sesuatu, padahal itu buruk bagimu. Allah mengetahui, sedang kamu tidak mengetahui.”

**(QS. Al-Baqarah/2:216)**

“Jika Allah menolong kamu, maka tidak ada yang dapat mengalahkanmu, tetapi jika Allah membiarkan kamu (tidak memberikan pertolongan), maka siapa yang dapat menolongmu setelah itu? Karena itu, hendaklah kepada Allah saja orang-orang mukmin bertawakal.”

**(QS. Ali Imran/3:160)**

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur hanyalah milik Allah SWT. karena berkat rahmat, pertolongan dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul: “Pengaruh *Microporous Layer* (MPL) Pada *Membrane Electrode Assembly* (MEA) Dalam Proses Konversi CO<sub>2</sub> Menjadi Metanol Secara Elektrokimia”. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains pada Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari berbagai tantangan yang harus penulis hadapi baik dalam proses penulisan maupun di luar persoalan skripsi. Namun dengan kesabaran dan rasa tanggung jawab serta bantuan dari berbagai pihak berupa material maupun moril, akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak **Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D** yang telah banyak memberikan bantuan berupa bimbingan, motivasi, arahan, petunjuk dan saran sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dua orang yang sangat berjasa di hidupku Bapak Sahabuddin dan Ibu Mutmainnah. Dengan rasa syukur yang paling tulus aku ucapkan terima kasih kepada kedua orang tuaku yang telah berkorban menemani setiap langkahku untuk berproses, memberikan dukungan, motivasi serta semangat. Tanpa doa dari Bapak dan Ibu, aku bukanlah siapa-siapa.
2. Dua saudaraku Amalina Nurhasanah dan Aris Muqorrobin, A. Md. T. Terima kasih atas segala bantuan, motivasi dan dukungan yang telah diberikan selama ini. Terima kasih telah menjadi kakak dan abang terbaikku, membahagiakan Bapak Ibu di saat aku masih belum mampu memberikan itu.
3. Bapak Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya.
4. Ibu Prof. Muharni, M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
5. Bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si. selaku Sekretaris Jurusan Kimia

Universitas Sriwijaya.

6. Bapak Dr. Nirwan Syarif, M.Si. dan Ibu Prof. Dr. Miksusanti, M.Si. selaku pembahas seminar hasil dan penguji sidang sarjana.
7. Kak Dwi Hawa Yulianti, M.Si. selaku mentor, kakak, sahabat yang telah banyak memberikan bimbingan, motivasi serta ilmu yang bermanfaat dalam proses menyelesaikan skripsi ini,
8. Kakak-kakak mentor PUR (Kak Dwi, Kak Reka, Kak Icha dan Kak Yollan). Terima kasih atas semua bimbingan dan ilmunya selama penelitian sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.
9. Kak Iin dan Mba Novi selaku Admin Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
10. Keluarga besar M. Yakin. Terima kasih telah memberikan bantuan dan dukungan selama aku menjalani perkuliahan.
11. Geng PUR'20 (Dina, Putri, Kira, Lamria, Masayu, Eno, Tere). Terima kasih telah berproses bersama, melewati suka duka selama penelitian di PUR. Serta memberikan semangat dan kebahagiaan yang tak terkira.
12. Salsabila Mardhiyyah. Sahabatku di kampus yang selalu memberikan nasehat dan mengingatkan perkara kebaikan. Serta selalu ada dan membantu saat aku sedang mengalami kesulitan. Maaf jika selama ini belum bisa membalas kebaikan caca, sukses terus buat caca kedepannya.
13. S-Mansa grup (Dhetak, Nisa, Bila). Sahabat-sahabatku yang selalu memberikan keceriaan dan selalu mendengarkan saat aku sedang mengalami permasalahan.
14. Syifa dan Julpa. Terima kasih telah sama-sama berjuang masuk ke universitas impian masing-masing. Telah banyak memberikan motivasi sehingga aku tergerak untuk melanjutkan studi ke jenjang perguruan tinggi.
15. Raban Aman (Tata, Ica, Ria, Lalak, Tiara, Ganda, Adi, Nopri dan Rohid). Sahabat-sahabatku di Lubuklinggau. Terima kasih atas dukungan positifnya, walaupun jalan kita berbeda-beda namun semoga silaturahmi kita tidak pernah terputus. Sukses dan sehat selalu untuk kalian, mari berjumpa kembali di versi terbaik kita.
16. Keluarga besar HIMAKI UNSRI, terkhusus Kimia'20 UNSRI. Terima kasih



atas suka duka yang telah dilewati selama perkuliahan.

17. Seluruh pihak yang terlibat dalam penelitian dan penulisan yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

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

Indralaya, 20 Maret 2024

Yang Menyatakan,

Hawati Husnul Hotimah

NIM. 08031182025002

## SUMMARY

### EFFECT OF MICROPOROUS LAYER (MPL) ON MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA) IN THE ELECTROCHEMICAL PROCESS OF CONVERTING CO<sub>2</sub> INTO METHANOL.

Hawati Husnul Hotimah: Supervised by Prof. Drs. Dedi Rohendi, M. T., Ph.D.

Departement of Chemistry, Faculty of Math and Science, Sriwijaya University x + 52 pages, 1 Tables, 8 Pictures, 14 Appediences

Increasing CO<sub>2</sub> concentrations in the air can result in global warming and disrupt environmental balance, therefore efforts are needed to reduce CO<sub>2</sub> concentrations in the air. One effort that can be made to reduce CO<sub>2</sub> levels is by converting CO<sub>2</sub> into alternative fuels such as methanol. In this research, CO<sub>2</sub> was converted into methanol electrochemically using a Membrane electrode assembly (MEA). MEA consists of a nafion membrane sandwiched by two electrodes (cathode and anode) and then placed on a single stand. The process of converting CO<sub>2</sub> to methanol in this research uses two different MEAs. MEA-A uses a Microporous Layer (MPL) layer which is composed of carbon powder, hydrophobic polymer binder (PTFE), organic solvent and additive compounds on the cathode, while MEA-B does not use an MPL layer on the cathode. The cathode of each MEA was characterized using scanning electron microscope (SEM) analysis to see its morphology and thickness. The process of converting CO<sub>2</sub> to methanol is carried out in a single-stroke electrolyzer with a size of 15 x 15 cm<sup>2</sup> under two conditions, namely a constant voltage of 1.8 V and then at a constant current of 0.05 A with operating times of 2, 4, 6 and 8 hours. The percentage of methanol produced from the CO<sub>2</sub> conversion process using MEA-A and MEA-B was measured through methanol analyzer analysis. The morphology of the cathode with MPL has an average pore size of 0.158 μm, while the cathode without MPL is 0.181 μm. The thickness of the cathode with MPL and without MPL was respectively found to be 249.36 μm and 243.27 μm. The percentage of methanol from the electrolyzer with MEA-A at a constant current of 0.05 A with operating time variations of 2, 4, 6, 8 hours was obtained respectively at 5%, 3%, 9%, 10% (w/v), while in MEA-B it is 1%, 7%, 5%, 2% (w/v). Meanwhile, the percentage of methanol in the electrolyzer with MEA-A at a constant voltage of 1.8 V with operating time variations of 2, 4, 6, 8 hours was obtained respectively at 9%, 8%, 7%, 3% (w/v), while in MEA-B the methanol percentage was 1%, 2%, 4%, 5% (w/v) respectively. The results of the research showed that the highest percentage of methanol was using MEA-A with a constant current at an operating time of 8 hours of 10% w/v.

**Keywords** : Membrane Electrode Assembly (MEA), Microporous Layer (MPL), CO<sub>2</sub> Conversion, Methanol

Citation : 61 (2011-2023)

## RINGKASAN

### **PENGARUH *MICROPOROUS LAYER* (MPL) PADA *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) DALAM PROSES KONVERSI CO<sub>2</sub> MENJADI METANOL SECARA ELEKTROKIMIA.**

Hawati Husnul Hotimah: Dibimbing oleh Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D.

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya x + 52, 1 Tabel, 8 Gambar, 14 Lampiran

Peningkatan konsentrasi CO<sub>2</sub> di udara dapat mengakibatkan pemanasan global dan mengganggu keseimbangan lingkungan, oleh karena itu perlu adanya upaya penurunan konsentrasi CO<sub>2</sub> di udara. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi kadar CO<sub>2</sub> yaitu dengan mengkonversi CO<sub>2</sub> menjadi bahan bakar alternatif seperti metanol. Pada penelitian ini, dilakukan konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol secara elektrokimia menggunakan *Membrane electrode assembly* (MEA). MEA terdiri dari membran nafion yang diapit oleh dua buah elektroda (katoda dan anoda) lalu ditempatkan pada stak tunggal. Proses konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol pada penelitian ini menggunakan dua MEA yang berbeda. MEA-A menggunakan lapisan *Microporous layer* (MPL) yang tersusun atas bubuk karbon, pengikat polimer hidrofobik (PTFE), pelarut organik serta senyawa aditif di bagian katoda, sedangkan MEA-B tidak menggunakan lapisan MPL di bagian katoda. Katoda dari masing-masing MEA dikarakterisasi menggunakan analisis *Scanning electron microscope* (SEM) untuk melihat morfologi serta ketebalannya. Proses konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol dilakukan pada elektroliser stak tunggal dengan ukuran 15 x 15 cm<sup>2</sup> pada dua kondisi yaitu tegangan tetap 1,8 V dan selanjutnya pada arus tetap 0,05 A dengan waktu operasi 2, 4, 6 dan 8 jam. Persentase metanol yang dihasilkan dari proses konversi CO<sub>2</sub> menggunakan MEA-A dan MEA-B diukur melalui analisis *methanol analyser*. Morfologi dari katoda dengan MPL memiliki rata-rata ukuran pori sebesar 0,158 µm, sedangkan katoda tanpa MPL sebesar 0,181 µm. Ketebalan katoda dengan MPL dan tanpa MPL secara berturut-turut didapatkan sebesar 249,36 µm dan 243,27 µm. Persentase metanol dari elektroliser dengan MEA-A pada arus tetap 0,05 A dengan variasi waktu operasi 2, 4, 6, 8 jam didapatkan secara berturut-turut sebesar 5%, 3%, 9%, 10% (b/v), sedangkan pada MEA-B sebesar 1%, 7%, 5%, 2% (b/v). Sementara itu, persentase metanol pada elektroliser dengan MEA-A pada kondisi tegangan tetap 1,8 V dengan variasi waktu operasi 2, 4, 6, 8 jam didapatkan berturut-turut sebesar 9%, 8%, 7%, 3% (b/v), sementara pada MEA-B didapatkan persentase metanol berturut-turut sebesar 1%, 2%, 4%, 5% (b/v). Hasil dari penelitian didapatkan persentase metanol paling tinggi yaitu menggunakan MEA-A dengan arus tetap pada waktu operasi 8 jam sebesar 10% b/v.

**Kata Kunci** : *Membran Electrode Assembly* (MEA), *Microporous Layer* (MPL), Konversi CO<sub>2</sub>, Metanol

Sitasi : 61 (2011-2023)

## 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>PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH</b> .....	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH</b> .....	<b>v</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>vii</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>x</b>
<b>RINGKASAN</b> .....	<b>xi</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 .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>4</b>
2.1 Karbon Dioksida .....	4
2.2 Konversi Karbon Dioksida .....	4
2.3 Metanol .....	5
2.4 <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA) .....	6
2.5 Membran Nafion .....	7
2.6 Elektroda .....	7
2.6.1 <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL) .....	8
2.6.2 Lapisan Katalis .....	10
2.6.2.1 Katalis Pt .....	10
2.6.2.2 Katalis Cu .....	11
2.7 Degradasi Elektroda .....	11

2.7.1 Korosi Karbon pada Elektroda .....	12
2.7.2 Erosi Karbon pada Elektroda .....	12
2.8 <i>Milling</i> .....	13
2.9 <i>Process Control Agent</i> (PCA) .....	14
2.10 <i>Polytetraflouroethylene</i> (PTFE) .....	14
2.11 <i>Methanol Analyser</i> .....	15
2.12 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) .....	15
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>16</b>
3.1 Waktu dan Tempat .....	16
3.2 Alat dan Bahan .....	16
3.2.1 Alat.....	16
3.2.2 Bahan .....	16
3.3 Prosedur Penelitian .....	16
3.3.1 Preparasi <i>Gas Difussion Layer</i> (GDL).....	16
3.3.2 Preparasi Katalis .....	17
3.3.2.1 Preparasi serbuk katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ .....	17
3.3.3 Preparasi Elektroda.....	17
3.3.3.1 Elektroda $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ (Katoda).....	17
3.3.3.2 Elektroda Pt/C (Anoda) .....	17
3.3.4 Karakterisasi Elektroda dengan <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	18
3.3.5 Preparasi <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA) dan Instalasi MEA pada Elektroliser.....	19
3.3.6 Proses Konversi $\text{CO}_2$ Menjadi Metanol.....	19
3.3.7 Analisis <i>Methanol Analyser</i> .....	20
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>21</b>
4.1 Preparasi <i>Microporous layer</i> (MPL).....	21
4.2 Preparasi Elektroda .....	22
4.3 Karakterisasi <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) .....	22
4.3.1 Karakterisasi Morfologi Katoda dengan SEM .....	22
4.3.2 Karakterisasi Ketebalan Katoda Menggunakan SEM.....	25
4.4 Preparasi <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA).....	26

4.5 Pengukuran Arus Terpakai pada Tegangan Konstan.....	27
4.6 Pengukuran Tegangan pada Arus Konstan .....	28
4.7 Hasil Konversi CO <sub>2</sub> menjadi Metanol .....	29
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>33</b>
5.1 Kesimpulan.....	33
5.2 Saran.....	33
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>34</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>41</b>
<b>DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....</b>	<b>58</b>

## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
Gambar 1. <i>Gas diffusion layer</i> .....	9
Gambar 2. Morfologi Katoda .....	22
Gambar 3. SEM-EDX Katoda.....	23
Gambar 4. Ketebalan Katoda .....	24
Gambar 5. <i>Membran electrode assembly</i> .....	25
Gambar 6. Pengukuran Arus Terpakai Selama Proses Konversi .....	26
Gambar 7. Pengukuran Tegangan Selama Proses Konversi .....	27
Gambar 8. Grafik Persentase Metanol pada Arus Tetap.....	28
Gambar 9. Grafik Persentase Metanol pada Tegangan Tetap .....	29

## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
Tabel 1. Reaksi elektrokimia dalam proses konversi CO <sub>2</sub> .....	5



## DAFTAR LAMPIRAN

	<b>Halaman</b>
Lampiran 1. Skema Preparasi GDL .....	40
Lampiran 2. Skema Preparasi Katalis Cu <sub>2</sub> O-ZnO/C .....	41
Lampiran 3. Preparasi Elektroda Cu <sub>2</sub> O-ZnO/C (1 mg/cm <sup>2</sup> ) dengan GDL .....	42
Lampiran 4. Preparasi Elektroda Cu <sub>2</sub> O-ZnO/C (1 mg/cm <sup>2</sup> ) tanpa GDL.....	43
Lampiran 5. Skema Preparasi Elektroda Pt/C (1 mg/cm <sup>2</sup> ).....	44
Lampiran 6. Skema Preparasi MEA .....	45
Lampiran 7. Skema Konversi CO <sub>2</sub> Menjadi Metanol pada Elektroliser Stak Tunggal dengan Tegangan Tetap .....	46
Lampiran 8. Skema Konversi CO <sub>2</sub> Menjadi Metanol pada Elektroliser Stak Tunggal dengan Arus Tetap .....	47
Lampiran 9. Perhitungan Pembuatan GDL .....	48
Lampiran 10. Perhitungan Pembuatan Elektroda Cu <sub>2</sub> O-ZnO/C.....	49
Lampiran 11. Perhitungan Pembuatan Elektroda Pt/C .....	51
Lampiran 12. Perhitungan Aktivasi Membran Nafion .....	52
Lampiran 13. Analisis Ukuran Pori Katoda.....	55
Lampiran 14. Alat dan Bahan.....	56



# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Peningkatan konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer saat ini disebabkan oleh efek pemanasan global sehingga konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer perlu diturunkan untuk menjaga kestabilan lingkungan. Beberapa pendekatan yang dapat dilakukan sebagai upaya mengurangi emisi CO<sub>2</sub> di atmosfer seperti mengkonversi CO<sub>2</sub> menjadi bahan kimia dengan nilai jual yang tinggi (Albo, Sáez, et al., 2015). Pengurangan emisi CO<sub>2</sub> berkaitan dengan penemuan teknologi yang memungkinkan penangkapan CO<sub>2</sub> serta konversi CO<sub>2</sub>. Banyak produk yang dapat dihasilkan dari konversi CO<sub>2</sub> salah satunya berupa bahan bakar seperti metanol. Metanol memiliki densitas energi yang relatif tinggi dan sifat penyimpanan yang stabil sehingga konversi CO<sub>2</sub> menjadi produk metanol sangat efisien untuk dilakukan (Al Hashar, 2022).

Konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol dapat dilakukan dengan metode reduksi elektrokimia, reduksi fotoelektrokatalitik, reduksi fotokimia dan konversi kimia. Metode yang digunakan dalam penelitian ini berupa metode reduksi elektrokimia CO<sub>2</sub> menjadi metanol. Metode ini dipilih karena memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode lain dalam mengkonversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol. Proses ini dapat dikendalikan dengan baik melalui penggunaan katalis sehingga memungkinkan produksi metanol yang lebih efisien karena menghasilkan metanol tanpa membentuk produk samping yang tidak diinginkan secara signifikan. Alasan lainnya yaitu tingkat selektivitas yang dihasilkan tinggi untuk menghasilkan metanol serta lebih ramah lingkungan (Al Hashar, 2022).

Proses konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol dengan metode elektrokimia ini dilakukan dengan menggunakan *Membran electrode assembly* (MEA) yang terdiri dari dua buah elektroda (anoda dan katoda) serta membran nafion. Membran perlu terhidrasi untuk memastikan kinerja MEA berjalan dengan baik, sementara elektroda terdiri dari lapisan katalis dan *Gas diffusion layer* (GDL) (J. Park et al., 2015). Katalis yang digunakan pada penelitian ini terbuat dari Cu<sub>2</sub>O-ZnO/C dan Pt/C. Pemilihan katalis Cu<sub>2</sub>O-ZnO/C dalam proses konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol dapat mengoptimalkan efisiensi dan selektivitas reaksi karena tingkat selektivitas

katalis  $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$  tinggi (Al Hashar, 2022). Kombinasi antara katalis berbasis Cu dan aditif ZnO terbukti mampu mempertahankan aktivitas katalitik yang diperlukan. ZnO berperan penting dalam menstabilkan Cu dengan menghilangkan pengotor yang mungkin ada dalam struktur katalis sehingga penggunaan elektroda berbasis  $\text{Cu}_2\text{O-ZnO}$  menunjukkan potensi yang signifikan dalam pembentukan metanol melalui proses reduksi elektrokimia  $\text{CO}_2$  (Albo, Sáez, et al., 2015). Pt/C banyak digunakan sebagai katalis dalam pembuatan elektroda pada proses konversi  $\text{CO}_2$  menjadi metanol karena memiliki stabilitas yang baik (S. Liu et al., 2023). Platina juga memiliki sifat tahan lama dan memiliki efisiensi yang tinggi dalam reaksi oksidasi metanol sehingga banyak digunakan (Ishak et al., 2021).

Selain lapisan katalis, GDL juga memiliki peranan penting dalam distribusi gas reaktan pada proses konversi  $\text{CO}_2$  menjadi metanol (Guo et al., 2022). GDL tersusun dari *Backing Layer* (BL) dan *Microporous layer* (MPL). BL berfungsi sebagai lapisan pendukung, sementara MPL digunakan untuk mengurangi resistensi kontak antara GDL dan lapisan katalis dalam meningkatkan transfer elektron (K. Xu et al., 2023). MPL terbentuk dari bubuk karbon, pengikat polimer hidrofobik, pelarut organik serta senyawa aditif (Hendricks et al., 2020). Penggunaan MPL yang terbuat dari karbon memiliki tantangan terkait degradasi yang mungkin terjadi akibat erosi pada lapisan karbon ketika berinteraksi dengan air (J. Park et al., 2015). Selain itu, pengoperasian dalam jangka waktu yang lama dapat menghasilkan tegangan yang berlebih. Tegangan berlebih dalam proses operasi menyebabkan meluruhnya karbon dan PTFE pada MPL sehingga menurunkan sifat hidrofobik dari GDL. Fenomena ini dapat mempengaruhi kinerja MEA dalam proses konversi dari  $\text{CO}_2$  menjadi metanol (K. Xu et al., 2023). Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisa dan menentukan pengaruh perbandingan efektivitas penggunaan MPL dan tanpa MPL dalam proses konversi  $\text{CO}_2$  menjadi metanol dengan katalis  $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$  dan Pt/C.

## 1.2 Rumusan masalah

Berpacu pada latar belakang dimana penggunaan MPL dalam konversi  $\text{CO}_2$  menjadi metanol masih menghadapi beberapa kekurangan, seperti terjadinya

degradasi MPL yang disebabkan oleh erosi karbon dan dapat mempengaruhi kinerja dari *Membrane electrode assembly* (MEA), maka dapat dirumuskan permasalahan penelitian yang akan dijawab dalam studi ini yaitu bagaimana pengaruh penggunaan MPL dan tanpa MPL terhadap morfologi dan ketebalan elektroda serta sejauh mana MPL dapat mempengaruhi hasil konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol dengan menggunakan bantuan katalis Cu<sub>2</sub>O-ZnO/C dan Pt/C pada eletroliser stak tunggal.

### **1.3 Tujuan Penelitian**

1. Melakukan analisis morfologi dan ketebalan elektroda menggunakan karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM).
2. Menentukan pengaruh penggunaan *Microporous layer* (MPL) dalam proses konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol dengan katalis Cu<sub>2</sub>O-ZnO/C dan Pt/C terhadap persentase produk metanol yang dihasilkan menggunakan elektroliser stak tunggal pada arus listrik dan tegangan yang konstan.

### **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat penelitian ini diharapkan dapat memberi informasi terkait pengaruh penggunaan MPL dan tanpa MPL terhadap morfologi dan ketebalan elektroda yang mempengaruhi hasil konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol serta persentase produk metanol dengan kuat arus dan tegangan konstan dalam proses konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al Hashar, D. (2022). Renewable Methanol Production Using Captured Carbon Dioxide and Hydrogen Generated through Water-Splitting. *Engineering*, 14(8), 339–359. <https://doi.org/10.4236/eng.2022.148027>
- Albo, J., Alvarez, G., P, M. C., & Irabien, A. (2015). Towards the Electrochemical Conversion of Carbon Dioxide into Methanol. *Green Chemistry*, 17(4), 2304–2324. <https://doi.org/10.1039/C4GC02453B>
- Albo, J., Sáez, A., Solla-Gullón, J., Montiel, V., & Irabien, A. (2015). Production of methanol from CO<sub>2</sub> electroreduction at Cu<sub>2</sub>O and Cu<sub>2</sub>O/ZnO-based electrodes in aqueous solution. *Applied Catalysis B: Environmental*, 176(1), 709–717. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.04.055>
- Athanasaki, G., Jayakumar, A., & Kannan, A. M. (2023). Gas diffusion layers for PEM fuel cells: Materials, properties and manufacturing – A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(6), 2294–2313. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.058>
- Barik, B., Kumar, A., Nampung, Y., & Mathur, L. (2023). Mixed-ceria reinforced acid functionalized graphene oxide-Nafion electrolyte membrane with enhanced proton conductivity and chemical durability for PEMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(10030), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.102>
- Biswal, T., Shadangi, K. P., Sarangi, P. K., & Srivastava, R. K. (2022). Conversion of carbon dioxide to methanol: A comprehensive review. *Chemosphere*, 298(134299), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134299>
- Borgman, J. M., Conway, P. P., & Torres-Sanchez, C. (2022). The use of inorganic process control agents to mill titanium-niobium powders suitable for the selective laser melting process. *Powder Technology*, 407(117546), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117546>
- Chen, L., Lin, R., Lou, M., & Lu, K. (2022). Structural design of microporous layer to mitigate carbon corrosion in proton exchange membrane fuel cells. *Carbon*, 199(4), 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.07.066>
- Endrődi, B., Bencsik, G., Darvas, F., Jones, R., Rajeshwar, K., & Janáky, C. (2017). Continuous-flow electroreduction of carbon dioxide. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 133–154. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.005>
- Fang, X., Men, Y., Wu, F., Zhao, Q., Singh, R., Xiao, P., Du, T., & Webley, P. A. (2019). Moderate-pressure conversion of H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> to methanol via adsorption enhanced hydrogenation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(39), 21913–21925. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.176>

- Fofana, D., Natarajan, S. K., Bénard, P., & Hamelin, J. (2013). High Performance PEM Fuel Cell with Low Platinum Loading at the Cathode Using Magnetron Sputter Deposition. *ISRN Electrochemistry*, 174834, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2013/174834>
- Gao, W., Yin, Q., Zhang, X., Zhang, C., Lei, Y., & Wang, C. (2022). Low-platinum dissymmetric membrane electrode assemblies for fuel cells suitable for a variety of external humidification conditions. *Journal of Power Sources*, 547(232013), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232013>
- Guan, T., Gilchrist, M. D., Fang, F., & Zhang, N. (2023). Study on mechanical and tribological properties of electroformed nickel composite mould co-deposited with nano-sized PTFE particles. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 3688–3703. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.188>
- 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), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ma15248800>
- Hendricks, F., Chamier, J., & Tanaka, S. (2020). Membrane electrode assembly performance of a standalone microporous layer on a metallic gas diffusion layer. *Journal of Power Sources*, 464(228222), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228222>
- Huang, Y., Guo, Q., Zhang, Y., Qiu, F., Zhang, X., Wang, G., Zhao, J., Huang, Q., & Xiao, C. (2023). Design and construction of PTFE porous membranes with high modulus and structural stability via in-situ interlocking and anchoring strategy. *Composites Communications*, 40(101632), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2023.101632>
- Ishak, N. A. I. M., Kamarudin, S. K., Timmiati, S. N., Karim, N. A., & Basri, S. (2021). Biogenic platinum from agricultural wastes extract for improved methanol oxidation reaction in direct methanol fuel cell. *Journal of Advanced Research*, 28(1), 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.06.025>
- Jin, Z., Guo, Y., & Qiu, C. (2022). Electro-Conversion of Carbon Dioxide to Valuable Chemicals in a Membrane Electrode Assembly. *Sustainability*, 14(9), 1–24. <https://doi.org/10.3390/su14095579>
- Khezri, B., Fisher, A. C., & Pumera, M. (2017). CO<sub>2</sub> reduction: The quest for electrocatalytic materials. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(18), 8230–8246. <https://doi.org/10.1039/c6ta09875d>
- Lai, T., & Qu, Z. (2023). Two Polytetrafluoroethylene Distribution Effects on Liquid Water Dynamic Behavior in Gas Diffusion Layer of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell with a Pore-Scale Method. *Energy*, 271(126920), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126920>
- Li, Y. Y., Yao, T. T., Zhang, X. F., Liu, Y. T., Wang, X., & Wu, G. P. (2023). An ultrathin substrate-free gas diffusion layer for proton exchange membrane

- fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 55, 675–682. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.187>
- Liu, L., Xing, Y., Fu, Z., Li, Y., Li, Z., & Li, H. (2023). An ePTFE-reinforced membrane electrode assembly based on a wet-contact interface design strategy for high-performance proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 575(233221), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233221>
- Liu, S., Lin, R., Tian, J., Wang, H., Jing, Y., & Lu, K. (2023). Morphology and overpotential analysis of cathode catalyst layer with different ink compositions in low Pt-loaded membrane electrode assembly. *Journal of Power Sources*, 558(232603), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232603>
- Lu, S., Wang, Y., Xiang, H., Lei, H., Xu, B. Bin, Xing, L., Yu, E. H., & Liu, T. X. (2022). Mass transfer effect to electrochemical reduction of CO<sub>2</sub>: Electrode, electrocatalyst and electrolyte. *Journal of Energy Storage*, 52(104764), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104764>
- Marlinda, Zulkarnain, & Mursal. (2018). Pengaruh Waktu Milling Terhadap Karakteristik MgH<sub>2</sub> Katalis SiO<sub>2</sub> dari Abu Sekam Padi dan Ni The Influence of Milling Time on Characteristics of MgH<sub>2</sub> Catalyst of. *J. Aceh Phys. Soc.*, Vol. 7, No. 2 Pp. 92-97, 2018, 7(2), 92–97.
- Meesattham, S., & Kim-Lohsoontorn, P. (2022). Low-temperature alcohol-assisted methanol synthesis from CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>: The effect of alcohol type. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(54), 22691–22703. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.083>
- Motozuka, S., Sato, H., Kuwata, H., Bito, M., & Okazaki, Y. (2022). Effects of interfacial interactions between metal and process control agents during ball milling on the microstructure of the milled Fe-based nanocrystalline alloy powder. *Heliyon*, 8(8), e10325. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10325>
- Moydien, H., Levecque, P., & Susac, D. (2023). Experimental study of water management and performance of titanium fibre felts as versatile gas diffusions layers for PEMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(10030), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.044>
- Omosibi, A., & Besser, R. S. (2013). Electron beam patterned Nafion membranes for DMFC applications. *Journal of Power Sources*, 228(11), 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.11.076>
- Özcan, A., & Garip, M. T. (2020). Development of a simple and efficient method to prepare a platinum-loaded carbon electrode for methanol electrooxidation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(35), 17858–17868. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.230>
- Pan, Y., Wang, H., & Brandon, N. P. (2021). Gas diffusion layer degradation in



- proton exchange membrane fuel cells: Mechanisms, characterization techniques and modelling approaches. *Journal of Power Sources*, 513(5), 230560. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230560>
- Park, J., Oh, H., Ha, T., Lee, Y. Il, & Min, K. (2015). A review of the gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells: Durability and degradation. *Applied Energy*, 155(1), 866–880. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.068>
- Park, Y. C., Kakinuma, K., Uchida, M., Tryk, D. A., Kamino, T., Uchida, H., & Watanabe, M. (2013). Investigation of the corrosion of carbon supports in polymer electrolyte fuel cells using simulated start-up/shutdown cycling. *Electrochimica Acta*, 91(1), 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.12.082>
- Pawar, A. A., Bandal, H. A., Rajkamal, A., & Kim, H. (2023). Understanding the impact of reaction parameters on electrochemical reduction of CO<sub>2</sub> to methanol: Activity relationship of cuprite @ polyaniline electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 946(117721), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117721>
- Pawłowska, S., Lankauf, K., Błaszczak, P., Karczewski, J., Górnicka, K., Cempura, G., Jasiński, P., & Molin, S. (2023). Tailoring a low-energy ball milled MnCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel catalyst to boost oxygen evolution reaction performance. *Applied Surface Science*, 619(156720), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.156720>
- Phillips, R. K., Friess, B. R., Hicks, A. D., Bellerive, J., & Hoorfar, M. (2012). Ex-situ measurement of properties of gas diffusion layers of PEM fuel cells. *Energy Procedia*, 29(1), 486–495. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.09.057>
- Rohendi, D., Majlan, E. H., Mohamad, A. B., Shyuan, L. K., & Raharjo, J. (2016). Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry Comparison of The Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Electrodes with Different Carbon Powder Content and Methods of Manufacture. *IJFAC (Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry)*, 1(3), 61–66. <http://ijfac.unsri.ac.id>
- Rohendi, D., Majlan, E. H., Mohamad, A. B., Wan Daud, W. R., Hassan Kadhun, A. A., & Shyuan, L. K. (2013). Characterization of electrodes and performance tests on MEAs with varying platinum content and under various operational conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(22), 9431–9437. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.093>
- Rohendi, D., Syarif, N., Said, M., Utami, M. T., & Marcelina, Y. (2019). Utilization of Catalyst-Coated Membrane (CCM) and Spraying Methods in Fabrication Membrane Electrode Assembly (MEA) for Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) using Pt-Co / C Catalyst. *Journal of Physics: Conference Series*, 1282(1), 1–5. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1282/1/012065>

- Sajna, M. S., Zavahir, S., Popelka, A., Kasak, P., Al-Sharshani, A., Onwusogh, U., Wang, M., Park, H., & Han, D. S. (2023). Electrochemical system design for CO<sub>2</sub> conversion: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110467>
- Septiano, A. F., Susilo, S., & Setyaningsih, N. E. (2021). Analisis Citra Hasil Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray (SEM EDX) Komposit Resin Timbal dengan Metode Contrast to Noise Ratio (CNR). *Indonesian Journal of Mathematics and Natural Sciences*, 44(2), 81–85. <https://doi.org/10.15294/ijmns.v44i2.33143>
- Shahgaldi, S., Alaefour, I., Unsworth, G., & Li, X. (2017). Development of a low temperature decal transfer method for the fabrication of proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(16), 11813–11822. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.127>
- Sharma, I., Shah, V., & Shah, M. (2022). A comprehensive study on production of methanol from wind energy. *Environmental Technology and Innovation*, 28(102589), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102589>
- Shironita, S., Karasuda, K., Sato, K., & Umeda, M. (2013). Methanol generation by CO<sub>2</sub> reduction at a Pt-Ru/C electrocatalyst using a membrane electrode assembly. *Journal of Power Sources*, 240, 404–410. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.034>
- Su, H., Bladergroen, B. J., Linkov, V., Pasupathi, S., & Ji, S. (2011). Study of catalyst sprayed membrane under irradiation method to prepare high performance membrane electrode assemblies for solid polymer electrolyte water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(23), 15081–15088. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.08.057>
- Sudarningsih, S., Wianto, T., & Widiyastuti, D. A. (2017). Analisa Struktur dan Mineralogi Batuan dari Sungai Aranio Kabupaten Banjar. *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 9(1), 42–48. <https://ppjp.ulm.ac.id/journal/index.php/f/article/view/3132>
- Sun, W., Zhang, W., Su, H., Leung, P., Xing, L., Xu, L., Yang, C., & Xu, Q. (2019). Improving cell performance and alleviating performance degradation by constructing a novel structure of membrane electrode assembly (MEA) of DMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(60), 32231–32239. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.113>
- Syarif, N., Rohendi, D., Nanda, A. D., Sandi, M. T., & Sihombing, D. S. W. B. (2022). Gas Diffusion Layer from Binchotan carbon and its Electrochemical Properties for Supporting Electrocatalyst in Fuel Cell. *AIMS Energy*, 10(2), 292–305. <https://doi.org/10.3934/energy.2022016>
- Toma, K., Iwasaki, K., Zhang, G., Iitani, K., Arakawa, T., Iwasaki, Y., & Mitsubayashi, K. (2021). Biochemical methanol gas sensor (Meoh bio-sniffer) for non-invasive assessment of intestinal flora from breath methanol.

- Sensors*, 21(14), 1–11. <https://doi.org/10.3390/s21144897>
- Wang, C., Zhang, J., Wang, S., Hao, S., Li, J., Mao, Z., Mao, Z., Ouyang, M., & Liu, Z. (2016). Degradation study of Membrane Electrode Assembly with PTFE/Nafion composite membrane utilizing accelerated stress technique. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(36), 16212–16219. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.215>
- Wang, F., Xie, H., Liu, T., Wu, Y., & Chen, B. (2020). Highly dispersed CuFe-nitrogen active sites electrode for synergistic electrochemical CO<sub>2</sub> reduction at low overpotential. *Applied Energy*, 269(115029), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115029>
- Wang, X., Wu, Y., & Wang, X. (2023). Hydrophobicity enhancement of gas diffusion layer induced by hydrothermal deposition process and the electrochemical performance of proton exchange membrane fuel cell. *Surfaces and Interfaces*, 38(102839), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.102839>
- Wicaksono, M. A., Noerochim, L., & Purniawan, A. (2021). Analisis Pengaruh Variasi Rasio Berat Nafion/Karbon pada Lapisan Katalis Membrane Electrode Assembly terhadap Performa Elektrokimia PEM Fuel Cell (PEMFC). *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), 98–103. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v10i2.63997>
- Xu, K., Di, Q., Sun, F., Chen, M., & Wang, H. (2023). Degradation mechanism analysis of substrate and microporous layer of gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cell. *Fuel*, 358(130198), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130198>
- Xu, T., Huang, H., Lu, T., Wang, Z. J., Zhu, S., Jin, H., Li, J., Zhou, X., Lv, J. J., & Wang, S. (2023). Monitoring of anodic corrosion on carbon-based gas diffusion layer in a flow cell. *Carbon*, 205(11), 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.01.030>
- Xue, X., Gu, Q., Pascal, H., Darwesh, O. M., Zhang, B., & Li, Z. (2021). Simulation and optimization of three-column triple-effect methanol distillation scheme. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 159(108229), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108229>
- Yang, J., Su, R., Ying, H., Hu, L., & Ruan, X. (2023). Preparation and characterization of complex shaped polytetrafluoroethylene (PTFE) parts based on vat photopolymerization 3D printing. *Materials Today Communications*, 36(106764), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106764>
- Yuan, J., Chen, Y., Liu, F., & Su, Y. (2023). Fabrication of dual atomic copper-indium (CuIn) catalysts for electrochemical CO<sub>2</sub> reduction to methanol. *Catalysis Communications*, 177(February), 106640. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2023.106640>

Yulianti, D. H., Rohendi, D., Syarif, N., & 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. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v4.i3.139>