

**PREPARASI *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) DENGAN  
ANODA Pt/C DAN KATODA  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  BINCHOTAN SEBAGAI TINTA  
KATALIS DAN APLIKASINYA PADA *DIRECT METHANOL FUEL CELL*  
(DMFC)**

**MAKALAH SIDANG SARJANA**



**Oleh :**

**Rizki Hamidah Daulay**

**08031382126101**

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

**2025**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**PREPARASI MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA) DENGAN  
ANODA Pt/C DAN KATODA  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  BINCHOTAN SEBAGAI TINTA  
KATALIS DAN APLIKASINYA PADA *DIRECT METHANOL FUEL CELL*  
(DMFC)**

**SKRIPSI**

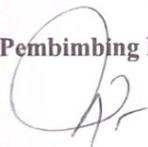
Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Bidang Sarjana Sains Bidang Studi Kimia

Oleh :

**Rizki Hamidah Daulay**  
**08031382126101**

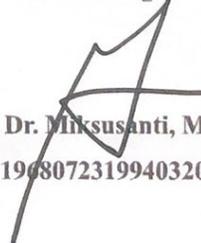
Indralaya, 17 Maret 2025

**Pembimbing I**



**Dr. Nirwan Syarif, M.Si**  
**NIP. 197010011999031003**

**Pembimbing II**



**Prof. Dr. Miksusanti, M.Si**  
**NIP. 196807231994032003**

**Mengetahui,**

**Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**Prof. H. Mansyah, S.Si, M.Si, Ph.D**

**NIP. 197111191997021001**

## HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi ini dengan judul “Preparasi *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan Anoda Pt/C dan Katoda  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  Binchotan Sebagai Tinta Katalis dan Aplikasinya pada *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC)” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 11 Maret 2025 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, 17 Maret 2025

Ketua :

1. **Dr. Zainal Fanani, M.Si**  
NIP. 196708211995121001

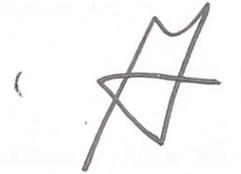


Anggota :

2. **Dr. Nirwan Syarif, M.Si**  
NIP. 197010011999031003



3. **Prof. Dr Miksusanti, M.Si**  
NIP. 196807231994032003



4. **Dr Heni Yohandini, M.Si**  
NIP. 197011152000122004



Mengetahui,

Dekan FMIPA



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

Ketua Jurusan Kimia



**Prof. Dr. Muharni, M.Si.**  
NIP. 196903041994122001

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Mahasiswa : Rizki Hamidah Daulay

NIM : 08031382126101

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 starata (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, 17 Maret 2025



*Rizki Hamidah Daulay*  
Rizki Hamidah Daulay

NIM. 08031382126101

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

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

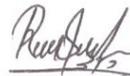
Nama Mahasiswa : Rizki Hamidah Daulay  
NIM : 08031382126101  
Fakultas/Jurusan : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam/Kimia  
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “hak bebas royalti non-eksklusif (*non exclusively royalty-free right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul: “Preparasi *Membrane Electrode Assembly* (MEA) Dengan Anoda Pt/C Dan Katoda Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C Binchotan Sebagai Tinta Katalis Dan Aplikasinya Pada *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC)”. Dengan hak bebas royalti non-eksklusif ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih, edit/memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir atau skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya.

Indralaya, 17 Maret 2025

Yang menyatakan,



Rizki Hamidah Daulay

NIM. 08031382126101

## HALAMAN PERSEMBAHAN

*Teruntuk ayah dan ibu yang paling aku hormati dan sayangi*

*Abang, kakak dan adik-adiku tercinta*

*Serta sahabat-sahabatku yang tidak pernah meninggalkanku*

*Skripsi ini aku persembahkan untuk kalian*

*“Allah does not leave a person alone except according to his ability and be sure that with hardship there is ease so do not give up and keep up your enthusiasm”*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat dan kasih sayang-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “Preparasi *Membrane Electrode Assembly (MEA)* Dengan Anoda Pt/C Dan Katoda  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  Binchotan Sebagai Tinta Katalis Dan Aplikasinya Pada *Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)*” sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana sains bidang kimia. Penulisan skripsi ini tidak luput dari bantuan, bimbingan, serta doa dari pihak yang terlibat, oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya, yang maha mengetahui proses perjalanan penulis dan yang telah memudahkan penulis untuk sampai di titik ini, serta telah menjadi tempat berserah penulis dalam keadaan apapun.
2. Nabi Muhammad SAW, karena engka telah membawa risalah kebenaran yang menyelamatkan umat manusia.
3. Secara khusus untuk Ayah tercinta Ishak daulay dan ibu tersayang Rosliha Hasibuan dua orang yang selalu mendukung dan mendoakan penulis. Terima kasih banyak atas segala doa, nasehat, dukungan, dan pengorbanan yang tak ternilai harganya serta sudah mengizinkan penulis untuk menimba ilmu di kota Palembang ini. Terima kasih untuk ibu dan ayah yang telah membesarkan dan sudah mempercayai serta mendukung setiap keputusan penulis. Setiap langkah dalam perjalanan ini adalah berkat dari cinta dan kasih sayang kalian. Semoga skripsi ini menjadi bukti kecil dari rasa terima kasihku yang tak terhingga. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada kalian.
4. kepada abang/kakak/adikku, (M. Wildan Arif / Nikmah Khairani /Ikhwan saleh & habiburrahman), yang selalu menjadi panutan dan sumber inspirasi. Terima kasih atas segala doa, bimbingan, dukungan, dan semangat yang tak pernah henti. Kalian adalah bagian tak terpisahkan dari perjalanan hidupku dan kesuksesan ini.
5. Bapak Prof. Hermansyah, S.Si, M.Si, Ph.D selaku dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.

6. Ibu Prof. Dr. Muharni, M.Si selaku ketua jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, beserta karyawan dan dosen yang telah banyak membagikan ilmu kepada penulis.
7. Ibu Prof. Dr. Miksusanti, M.Si selaku dosen pembimbing akademik yang telah banyak memberikan saran dan bantuan kepada penulis dalam proses perkuliahan dan penulisan tugas akhir.
8. Bapak Dr. Nirwan Syarif, M.Si selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah banyak memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis dalam proses penelitian dan penulisan serta terimakasih atas kesabaran dan waktu yang telah diluangkan untuk penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
9. Bapak Prof. Dr. Dedi Rohendi, Ph. D selaku ketua Laboratorium Pusat Unggulan Riset *Fuel Cell* dan Hidrogen Universitas Sriwijaya.
10. kepada keluarga besar terima kasih penulis ucapkan atas dukungan moral dan doa yang tak pernah putus
11. Sahabat terbaik penulis Syiddik Winny Lumban Gaol yang telah banyak mendengarkan keluh kesah penulis dan yang selalu memberikan semangat bagi penulis. Terima kasih sudah menjadi salah satu orang terdekat penulis.
12. Kepada Ade Indriyani sahabat serta teman seperjuangan penulis semasa perkuliahan baik dalam penelitian maupun dalam keseharian serta yang selalu ada disamping penulis dalam kondisi suka maupun duka, terima kasih banyak telah banyak membantu penulis dalam pengerjaan skripsi, serta yang selalu sabar atas banyaknya pertanyaan penulis dan yang selalu bersedia penulis repotkan. Smoga kita menjadi orang yang sukses dan selalu dalam lindungan Allah SWT.
13. Kepada sahabat penulis Mianita sadin, Dera okta firanda, dan Tri mulyanita sarah, penulis ucapkan terima kasih telah banyak menghibur dan hadir pada hari terbaik penulis. Khususnya untuk mianita sadin terima kasih banyak sudah bersedia direpotkan oleh penulis dan selalu menerima penulis dalam keadaan suka maupun duka dan sudah menemani penulis hingga titik ini.
14. Kepada geng bu hawa (ade, cindy dan vina) teman kost penulis saat pengerjaan tugas akhir dipalembang, Kalian adalah tempat berbagi keluh kesah, sumber

motivasi, dan teman diskusi yang sangat berharga. Terima kasih atas segala bantuan dan dukungan yang telah kalian berikan.

15. Untuk teman terbaik penulis Tri oktaviani, Winda rahayu dan Aghni hafidzah, terima kasih sudah mendukung dan selalu hadir dalam hari penting penulis.
16. Terima kasih kepada anak bimbingan pak nirwan Angkatan 21 (ade, via, meli dan dinda, terima kasih sudah menjadi rekan tim yang sangat menyenangkan dan terimakasih atas dukungannya.
17. Kepada adik asuh penulis (Rista, desti dan della) yang telah memberikan dukungan terhadap penulis. Terima kasih sudah menjadi adik tingkat yang baik. Tetap semangat sampai akhir, smoga dimudahkan segala urusan perkuliahannya
18. Teman-teman angkataan 2021 lawrensium yang telah mewarnai kehidupan penulis selama perkuliahan. Penulis sangat berharap bisa mengenal kalian lebih dekat. Semoga bertemu lagi di hari yang lebih baik.
19. Admin jurusan kimia, kak Chosiin dan mba Novi yang telah banyak membantu kelancaran proses perkuliahan hingga tugas akhir selesai
20. Semua orang yang telah mendukung dan mendoakan penulis (teman pesanter dan teman diluar pesantren), Terimakasih atas semua dukungannya.
21. Last but not least terima kasih untuk diri sendiri Rizki Hamidah Daulay yang sudah bertahan hingga titik ini. Bukan hal yang mudah, tetapi aku mampu dan aku hebat. Setelah ini kita lanjutkan perjuangan yang sebenarnya.

Penulis menyadari karya tulis ini masih banyak kekurangan dan jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, saran dan kritik dari pembaca sangat diharapkan. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Indralaya, 17 Maret 2025

Penulis

Rizki Hamidah Daulay

NIM. 08031382126101

## SUMMARY

### **PREPARATION OF MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA) WITH Pt/C ANODE AND Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C BINCHOTAN CATHODE AS CATALYST INK AND ITS APPLICATION IN DIRECT METHANOL FUEL CELL (DMFC)**

Rizki Hamidah Daulay. Supervised by Dr. Nirwan Syarif, M. Si and Prof. Dr. Miksusanti, M.Si

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

xvi + 73 Pages, 25 figures, 5 tabels, 7 attachments

This research discusses the manufacture and characterization of Membrane Electrode Assembly (MEA) using Pt/C as anode catalyst and Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C catalyst with binchotan carbon and vulcan as cathode to be used as catalyst ink for Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) applications. The main aim of the research is to increase the efficiency of DMFC through the use of more effective and economical catalysts, such as Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>, as well as utilizing locally available conductive carbon, i.e., binchotan. The method used includes making GDL and a catalyst layer. The catalyst layer was made in a ratio of 70:30 and 30:70, applied using a brush method to the GDL and sintered at a temperature of 350. Titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) was added to optimize the performance of the Cu<sub>2</sub>O catalyst. Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub> catalyst preparation was carried out using the sol-gel method. The characterization used is a microstructure test using a microscope, hydrophobicity test, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Particle Size Analyzer (PSA), Zeta Potential, Cyclic Voltammetry (CV), Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Diffraction (XRD), as well as MEA performance testing on DMFC. The microscope shows the pore structure in binchotan carbon and cracks in vulcan carbon. The hydrophobicity test shows hydrophilic properties because it has a contact angle of 45° and 43.84° for Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C binchotan with a ratio of 30:70 and 70:30, while the catalyst with vulcan carbon shows hydrophobic properties because it has a contact angle of 90°. Electrode characterization using Cyclic Voltammetry (CV) produced the highest Electrochemical Surface Area (ECSA) value for volcanic carbon with a ratio of 30:70 of 7.344437 cm<sup>2</sup>/g. MEA performance testing with variations in methanol concentration (5-20%) and current load (100-600 mA) shows that MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C vulcan 30:70 has the best resistance to 5% methanol, with a maximum voltage of 3.7 mV and the highest power density of 1.860 mW at methanol concentrations of 5%.

Keywords : DMFC, Binchotan Carbon, Vulcan Carbon, Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub> Catalyst, catalyst layer characterization

Citations : 79 (2012-2024)

**RINGKASAN**  
**PREPARASI *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) DENGAN**  
**ANODA Pt/C DAN KATODA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C BINCHOTAN SEBAGAI TINTA**  
**KATALIS DAN APLIKASINYA PADA *DIRECT METHANOL FUEL CELL***  
**(DMFC)**

Rizki Hamidah Daulay. Dibimbing oleh Dr. Nirwan Syarif, M. Si Si dan Prof. Dr. Miksusanti, M.Si

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

xvi + 73 Halaman, 25 Gambar, 5 Tabel, 7 Lampiran

Penelitian ini membahas mengenai pembuatan dan karakterisasi *Membrane Electrode Assembly* (MEA) menggunakan Pt/C sebagai katalis anoda dan katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C dengan karbon binchotan dan vulcan sebagai katoda dijadikan tinta katalis untuk aplikasi *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC). Tujuan utama penelitian adalah meningkatkan efisiensi DMFC melalui penggunaan katalis yang lebih efektif dan ekonomis, seperti Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>, serta memanfaatkan karbon konduktif yang tersedia secara lokal, yaitu binchotan. Metode yang digunakan meliputi pembuatan GDL dan lapis katalis. Lapis katalis dibuat dengan perbandingan 70:30 dan 30:70, dioleskan menggunakan metode kuas pada GDL dan disintering pada suhu 350. Penambahan titanium dioksida (TiO<sub>2</sub>) untuk mengoptimalkan kinerja katalis Cu<sub>2</sub>O. Preparasi katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub> dilakukan dengan metode sol-gel. Karakterisasi yang digunakan berupa uji struktur mikro menggunakan mikroskop, uji hidrofobisitas, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), *Particle Size Analyzer* (PSA), Zeta Potensial, *Cyclic Voltammetry* (CV), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *X-Ray Diffraction* (XRD), serta pengujian kinerja MEA pada DMFC. Mikroskop menunjukkan struktur pori pada karbon binchotan dan retakan pada karbon vulcan. Uji hidrofobisitas menunjukkan sifat hidrofilik karena memiliki sudut kontak 45° dan 43,84° untuk Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C binchotan dengan perbandingan 30:70 dan 70:30, sementara katalis dengan karbon vulcan menunjukkan sifat hidrofobik karena memiliki sudut kontak 90°. Karakterisasi elektroda dengan *Cyclic Voltammetry* (CV) menghasilkan nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA) tertinggi pada karbon vulcan dengan perbandingan 30:70 sebesar 7,344437 cm<sup>2</sup>/g. Pengujian kinerja MEA dengan variasi konsentrasi metanol (5-20%) dan beban arus (100-600 mA) menunjukkan bahwa MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C vulcan 30:70 memiliki ketahanan terbaik terhadap metanol 5%, dengan tegangan maksimum 3,7 mV dan densitas daya tertinggi 1.860 mW pada konsentrasi metanol 5%.

Kata kunci : DMFC, Karbon Binchotan, Karbon vulcan, Katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>, karakterisasi lapis katalis

Sitasi : 79 (2012-2024)

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN SAMPUL .....</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 UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>vii</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>ix</b>
<b>RINGKASAN.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN.....</b>	<b>xvi</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.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Karbon Binchotan.....	5
2.2 Katalis Cu <sub>2</sub> O.....	6
2.3 Titanium Dioksida (TiO <sub>2</sub> ).....	7
2.4 Katalis Pt/C.....	7
2.5 <i>Direct Methanol Fuel Cell</i> (DMFC).....	8
2.6 <i>Membrane Electrode Assambly</i> (MEA) .....	10
2.6.1 Elektroda.....	10
2.6.2 <i>Gas Difussion Layer</i> (GDL) .....	11
2.6.3 Lapisan Katalis .....	12
2.7 Karakterisasi MEA .....	13

2.7.1	<i>Cyclic Voltammetry (CV)</i> .....	13
2.7.2	<i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i> .....	14
2.7.3	<i>X-Ray Diffraction (XRD)</i> .....	15
2.7.4	<i>Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)</i> .....	16
2.7.5	<i>Particle Size Analyzer (PSA) dan Zeta Potensial</i> .....	16
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>		<b>18</b>
3.1	Waktu dan Tempat .....	18
3.2	Alat dan Bahan .....	18
3.3	Prosedur Penelitian .....	18
3.3.1	Preparasi Serbuk Karbon Binchotan .....	18
3.4	Karakterisasi Serbuk Karbon Binchotan .....	18
3.4.1	Karakterisasi Serbuk Karbon Binchotan <i>Particle Size Analyzer (PSA)</i> .....	18
3.4.2	Karakterisasi <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)</i> .....	19
3.5	Pembuatan <i>Gas diffusion Layer (GDL)</i> .....	19
3.5.1	Preparasi Serbuk Katalis $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2$ .....	19
3.6	Preparasi Elektroda Katoda dan Anoda .....	20
3.6.1	Preparasi Elektroda Katoda $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$ dengan Metode Kuas.....	20
3.6.2	Preparasi Elektroda Anoda Pt/C dengan Metode Kuas .....	20
3.7	Karakterisasi Elektroda .....	21
3.7.1	Pengujian Sifat Hidrofobisitas.....	21
3.7.2	Karakterisasi dengan Metode <i>Cyclic Voltammetry (CV)</i> .....	21
3.7.3	Karakterisasi dengan Metode <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i> .....	22
3.7.4	Karakterisasi dengan Metode <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i> .....	22
3.8	Pembuatan dan Pengujian Kinerja MEA.....	22
3.8.1	Pembuatan MEA .....	22
3.8.2	Pengujian Kinerja MEA pada DMFC.....	22
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>23</b>
4.1	Preparasi <i>Gas Diffusion Layer (GDL)</i> .....	23
4.2	Karakterisasi Serbuk Karbon Binchotan .....	24
4.2.1	Pengujian Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	24
4.2.2	<i>Particle Size Analyzer (PSA) dan Zeta Potensial</i> .....	26
4.3	Karakterisasi <i>Gas diffusion Layer (GDL)</i> .....	29
4.3.1	Karakterisasi Struktur Mikro Menggunakan Mikroskop .....	29

4.3.2	Karakterisasi Sifat Elektrokimia <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL) dengan Metode <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV).....	30
4.4	<i>Catalyst Layer</i> (CL).....	31
4.4.1	Preparasi Lapis Katalis Cu <sub>2</sub> O-TiO <sub>2</sub> .....	31
4.5	Karakterisasi Struktur Mikro Lapis Katalis Cu <sub>2</sub> O-TiO <sub>2</sub> .....	32
4.6	Preparasi Lapis Katalis Pt/C .....	33
4.7	Preparasi Lapis Katalis .....	34
4.7.1	Pengujian Sifat Hidrofobisitas.....	34
4.7.2	Pengujian Sifat Elektrokimia Lapis Katalis dengan Metode <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV).....	35
4.7.3	Pengujian Sifat Elektrokimia Lapis Katalis dengan Metode <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	38
4.7.4	Pengujian Sifat Elektrokimia Lapis Katalis dengan Metode X-Ray <i>Diffraction</i> (XRD) .....	40
4.8	Uji Kinerja Membran Berbasis Binchotan .....	42
4.8.1	Pengukuran Nilai <i>Open Circuit Voltage</i> (OCV) .....	42
4.8.2	Pengujian Kinerja MEA pada Beban Bervariasi .....	44
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>		<b>49</b>
5.1	Kesimpulan .....	49
5.2	Saran .....	49
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>50</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>58</b>
<b>DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....</b>		<b>73</b>

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Arang Binchotan .....	5
Gambar 2. Skema kerja DMFC .....	9
Gambar 3. Serbuk Karbon .....	23
Gambar 4. <i>Gas Diffusion layer</i> (GDL) .....	24
Gambar 5. Grafik FTIR karbon binchotan .....	25
Gambar 6. Grafik FTIR karbon vulcan .....	26
Gambar 7. Grafik <i>particle size analyzer</i> karbon binchotan .....	27
Gambar 8. Grafik zeta potensial karbon binchotan .....	28
Gambar 9. Hasil Pengamatan Menggunakan Mikroskop .....	29
Gambar 10. Hasil CV GDL karbon binchotan dan karbon vulcan .....	30
Gambar 11. Serbuk katalis .....	32
Gambar 12. Hasil Pengamatan Lapis Katalis Cu <sub>2</sub> O-TiO <sub>2</sub> Menggunakan Mikroskop .....	32
Gambar 13. Lapis katalis Pt/C 20% .....	34
Gambar 14. Sudut kontak antara air dan permukaan .....	35
Gambar 15. Hasil CV lapis katalis Pt/C Binchotan dan vulcan .....	36
Gambar 16. Hasil CV lapis katalis Cu <sub>2</sub> O-TiO <sub>2</sub> /C .....	37
Gambar 17. Hasil karakterisasi SEM lapis katalis Cu <sub>2</sub> O-TiO <sub>2</sub> /C binchotan 70:30 ...	39
Gambar 18. Hasil karakterisasi SEM lapis katalis Cu <sub>2</sub> O-TiO <sub>2</sub> /C vulcan 30:70 .....	39
Gambar 19. Hasil karakterisasi XRD lapis katalis karbon binchotan .....	41
Gambar 20. Hasil karakterisasi XRD lapis katalis karbon vulcan .....	41
Gambar 21. Grafik OCV MEA Cu <sub>2</sub> O-TiO <sub>2</sub> /C .....	43
Gambar 22. Grafik hubungan antara beban bervariasi dengan tegangan potensial... 44	44
Gambar 23. Grafik hubungan antara beban bervariasi dengan tegangan potensial... 45	45
Gambar 24. Kurva I-V .....	46
Gambar 25. Kurva I-P .....	47

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Hasil karakteristik ukuran karbon binchotan.....	27
Tabel 2. Nilai ECSA GDL binchotan dan vulcan.....	31
Tabel 3. Nilai ECSA Pt/C binchotan dan Vulcan.....	36
Tabel 4. Nilai ECSA dengan variasi lapis katalis.....	38
Tabel 5. Nilai OCV MEA dengan variasi persentase lapis katalis.....	43

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Skema Kerja.....	59
Lampiran 2. Perhitungan Komponen Elektroda.....	63
Lampiran 3. Perhitungan Nilai ECSA <i>Gas Diffussion Layer</i> (GDL) Cu <sub>2</sub> O-TiO <sub>2</sub> /C...	64
Lampiran 4. Perhitungan Nilai Kerapatan Arus .....	65
Lampiran 5. Perhitungan Nilai Densitas Daya .....	66
Lampiran 6. Uji Kinerja MEA pada <i>Direct Methanol Fuel Cell</i> (DMFC) dengan tegangan dan metanol bervariasi .....	67
Lampiran 7. Gambar Alat dan Bahan Penelitian .....	71

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kenaikan permintaan energi dunia telah mendorong penggunaan bahan bakar fosil secara besar-besaran dimana pasokan dan dampak buruknya terhadap lingkungan menjadi masalah serius. Sebagai alternatif, energi terbarukan telah banyak dipromosikan karena lebih ramah lingkungan. Namun, ketersediaan sumber daya energi bersih ini tidak merata dan cenderung terbatas, sehingga pengembangan teknologi konversi energi yang efisien dan sistem penyimpanan energi yang berkualitas menjadi sangat penting (Almomani *et al.*, 2023). Dalam hal ini, sel bahan bakar merupakan teknologi konversi energi yang menjanjikan karena mampu mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi listrik melalui proses elektrokimia. Beberapa jenis sel bahan bakar yang umum adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC), sel bahan bakar alkali, sel bahan bakar karbonat cair, dan *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC). Keunggulan utama sel bahan bakar adalah emisi yang rendah dan potensi untuk meningkatkan keamanan energi (Karim *et al.*, 2017).

*Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) adalah salah satu jenis sel bahan bakar yang mudah digunakan, dan dianggap sebagai pengganti potensial untuk baterai konvensional pada perangkat portabel. DMFC ini beroperasi pada suhu rendah yaitu antara 50°C hingga 120°C dengan menggunakan teknologi membran polimer. Keunggulan utama DMFC adalah tidak memerlukan proses konversi alkohol menjadi hidrogen, karena metanol dapat langsung diumpankan ke dalam sel bahan bakar. Sehingga mengurangi biaya keseluruhan karena tidak adanya proses konversi tambahan. Karena efisiensinya yang tinggi, emisi polusi yang rendah, kebisingan yang minim, keandalan yang tinggi, dan perawatan yang mudah, DMFC telah mendapatkan perhatian yang besar dari berbagai pihak. Selain itu, kepadatan energi volumetrik metanol (17.900 kJ/L) sekitar tiga kali lipat lebih tinggi dibandingkan hidrogen. Metanol juga menjadi bahan bakar yang menarik karena biaya produksinya yang rendah, kepadatan energi yang tinggi, serta kemudahan dalam penyimpanan dan transportasi. Produksi metanol juga dapat dilakukan dari sumber daya biomassa atau

gas alam yang menjadikan DMFC sebagai sumber energi yang sangat potensial untuk kendaraan listrik, perangkat elektronik portabel, dan aplikasi stasioner (Kaur *et al.*, 2021).

Kunci utama untuk meningkatkan kinerja DMFC adalah dengan adanya pengembangan katalis alternatif yang memiliki toleransi metanol yang lebih baik, aktivitas tinggi, dan stabilitas yang baik (Lo Vecchio *et al.*, 2018). Katalis yang digunakan dalam elektroda *fuel cell* umumnya katalis berbasis platina, karena memiliki aktivitas dan daya tahan yang tinggi jika dibandingkan dengan elektrokatalis logam mulia lainnya. Namun, penggunaan katalis platina tergolong cukup mahal (Ojemaye and Okoh, 2021). Sebagai alternatif,  $\text{Cu}_2\text{O}$  banyak digunakan sebagai katalis karena tidak beracun dan ketersediaannya yang melimpah (Abdullah *et al.*, 2018).  $\text{Cu}_2\text{O}$  memiliki beberapa kelebihan, seperti sifat semikonduktor, harga yang murah, mudah dicampur dengan polimer lain, serta stabilitas yang relatif baik baik dari segi kimia maupun sifat fisiknya, sehingga memiliki aplikasi yang luas (Badawy *et al.*, 2015).

Berdasarkan penelitian Tarigan (2022) menunjukkan potensi penggunaan  $\text{Cu}_2\text{O}$  sebagai elektrokatalis pada DMFC menunjukkan ketahanan maksimal pada konsentrasi metanol 10%. Selain itu, nilai tegangan  $\text{Cu}_2\text{O}$  meningkat setiap kali dilakukan penambahan beban kerja. Oleh karena itu, masih diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan kinerja  $\text{Cu}_2\text{O}$  sebagai katalis, salah satunya dengan menggunakan elektrokatalis oksida biner. Salah satu oksida yang dapat digunakan untuk mendukung oksida lain dalam sistem oksida biner adalah  $\text{TiO}_2$ , di mana orbital molekul  $\text{TiO}_2$  sebagian mengisi celah kosong pada orbital molekul bahan semikonduktor.  $\text{TiO}_2$  memiliki kemampuan redoks yang kuat, stabilitas fotokimia yang tinggi, tidak beracun, biaya rendah, dan ketersediaan yang tinggi, sehingga banyak digunakan sebagai elektrokatalis (Tai *et al.*, 2024). Selain itu,  $\text{TiO}_2$  juga memiliki sifat hidrofobik yang sangat diperlukan dalam pengendalian air dalam *stack fuel cell*, sehingga dapat meningkatkan kinerja *fuel cell*.

DMFC juga menggunakan karbon sebagai bahan pendukung elektrokatalis. (Baruah & Deb, 2021). Dilakukannya penggabungan  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2$  dengan bahan karbon bertujuan untuk meningkatkan konduktivitas dan ketahanannya terhadap korosi, sehingga katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  dapat digunakan sebagai elektrokatalis yang efektif (Ye *et al.*, 2014). Karbon yang sering digunakan dalam preparasi MEA adalah vulcan,

karena memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, luas permukaan yang besar, dan ukuran partikel nano menjadikannya material ideal untuk berbagai proses elektrokimia. (Pérez-Rodríguez *et al.*, 2018). Namun, penggunaan vulcan memiliki kelemahan dalam operasi jangka panjang, terutama pada kondisi korosif seperti dalam sel bahan bakar. Vulcan dapat mengalami degradasi, yang mengakibatkan penurunan kinerja dan umur pakai perangkat. Oleh karena itu, binchotan berpotensi untuk digunakan sebagai alternatif vulcan. Binchotan, atau arang putih Jepang, memiliki kerapatan yang tinggi dan pori-pori kecil, yang berkontribusi terhadap peningkatan konduktivitas serta efisiensi transportasi massa dalam sistem elektrokimia. Karakteristik ini menjadikan Binchotan sebagai alternatif yang potensial dalam meningkatkan kinerja elektrokatalis (Syarif *et al.*, 2023). Dengan sifat-sifat unggul tersebut, Binchotan berpotensi menjadi bahan penyangga katalis yang efektif, menggantikan vulcan dalam pembuatan alat penyimpan energi.

## 1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana sifat elektrokimia pada *Gas Diffusion Layer* (GDL) melalui nilai ECSA menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV)?
2. Bagaimana hasil karakterisasi lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  Binchotan menggunakan metode hidrofobisitas, CV, SEM dan XRD?
3. Bagaimana pengaruh pemberian beban kerja dengan berbagai variasi konsentrasi metanol terhadap kinerja MEA pada DMFC?

## 1.3 Tujuan Penelitian

1. Menentukan sifat elektrokimia pada *Gas Diffusion Layer* (GDL) melalui nilai ECSA menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV)
2. Mengkarakterisasi lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  Binchotan menggunakan metode tes gelembung (*bubble test*), CV, SEM dan XRD untuk mengetahui hidrofobisitas, sifat elektrokimia, morfologi dan kristalografinya
3. Menguji pengaruh pemberian beban kerja dengan berbagai variasi konsentrasi metanol terhadap kinerja MEA pada DMFC

#### 1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat dalam pengembangan energi baru dan terbarukan dengan memberikan informasi tentang penambahan  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan sebagai katalis pada kualitas elektroda *fuel cell* dan mengetahui kinerja MEA pada DMFC. Selain itu diharapkan juga dapat memberikan kontribusi terhadap upaya pengembangan teknologi *fuel cell*.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Karbon Binchotan

Karbon binchotan adalah hasil dari proses pirolisis kayu keras asal Jepang yang memiliki warna hitam sedikit keputihan. Binchotan sangat berbeda dengan arang hitam lainnya karena terbuat dari kayu keras, ketika dibakar tidak berasap, tidak ada percikan api, tidak berbau, dan tidak banyak abu yang beterbangan. Selain itu binchotan (karbon putih) memiliki kadar abu yang rendah dan kalori tinggi (Gambar 1). Karakteristik unik binchotan, seperti pori-pori mikro dan struktur molekul khusus, membuatnya sangat efektif sebagai penyerap berbagai zat, termasuk bau, radiasi, dan kotoran. Selain sebagai bahan bakar berkualitas tinggi, binchotan juga diaplikasikan dalam berbagai bidang, mulai dari pemurnian air hingga penyerap gelombang elektromagnetik (Syarif dkk, 2023).



Gambar 1. Arang Binchotan

Arang putih atau Binchotan adalah jenis arang dengan karakteristik unik yang digunakan dalam berbagai aplikasi. Proses pembuatannya melibatkan pirolisis kayu keras seperti oak pada suhu rendah (200–400°C) selama beberapa hari, diikuti dengan peningkatan suhu hingga sekitar 1000°C. Setelah dipanaskan, arang disiram dengan campuran tanah, pasir, dan abu yang telah dibasahi, menghasilkan warna abu-abu pucat pada permukaannya. Arang ini memiliki densitas tinggi, luas permukaan besar (270 m<sup>2</sup>/g), serta struktur berpori dengan pori kecil (<10 μm) dan lebih besar (~50 μm). Titik nyalanya berkisar 300–500°C, lebih tinggi dibandingkan arang hitam konvensional, dengan kandungan volatil yang lebih rendah (Chia *et al.*, 2014). Arang binchotan memiliki kemampuan menghantarkan listrik karena proses pemanasan yang mengubah

sebagian besar seratnya menjadi karbon grafit, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa dengan mengoksidasi binchotan, kita bisa mendapatkan partikel karbon yang lebih kecil dan mudah untuk dicampurkan dalam air. Penggunaan partikel karbon ini secara langsung dapat mempermudah proses pembuatan membran elektrolit polimer (Syarif *et al.*, 2022).

## 2.2 Katalis $\text{Cu}_2\text{O}$

Peningkatan permintaan akan produk kimia bernilai tinggi telah memicu minat yang besar dalam pengembangan katalis berkinerja tinggi. Tembaga, dengan beragam bilangan oksidasinya, menawarkan fleksibilitas yang unik dalam merancang katalis untuk berbagai reaksi redoks. Aplikasi katalis berbasis tembaga telah meluas dalam industri, mulai dari konversi gas buang hingga produksi energi (Wu *et al.*, 2023). Tembaga dikatakan sebagai bahan yang paling aktif dalam transformasi elektrokimia  $\text{CO}_2$  menjadi  $\text{CH}_3\text{OH}$ . Tembaga menjadi satu-satunya bahan yang diketahui mampu menghasilkan campuran bahan kimia yang berpotensi menarik untuk aplikasi industri dengan laju reaksi tinggi selama periode waktu yang berkelanjutan. Khususnya, permukaan tembaga oksida ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) memiliki overpotensial hidrogen menengah dan sifat adsorpsi CO yang memungkinkan hasil  $\text{CH}_3\text{OH}$  yang lebih tinggi dalam larutan berair untuk diproduksi (Albo *et al.*, 2015).

Meskipun banyak logam yang bisa digunakan sebagai katalis, hanya sedikit yang cocok untuk digunakan dalam sel bahan bakar metanol langsung (DMFC). Karakteristik katalis yang ideal untuk DMFC melibatkan kombinasi antara aktivitas katalitik yang tinggi, selektivitas, stabilitas, ketahanan terhadap keracunan CO, luas permukaan aktif yang tinggi, konduktivitas listrik yang baik, ketersediaan, dan biaya yang terjangkau. Tembaga menjadi salah satu pilihan yang menarik karena harganya murah dan reaktif. Namun, tembaga juga mudah bereaksi dengan lingkungan sehingga kurang stabil. Untuk mengatasi masalah ini, para peneliti sering menggabungkan tembaga dengan logam lain atau menggunakan oksida tembaga ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ).  $\text{Cu}_2\text{O}$  menunjukkan potensi yang baik karena aktivitas redoks permukaannya yang tinggi, membuatnya lebih tahan lama dan efisien dibandingkan katalis logam mulia seperti perak, emas, rutenium, dan platinum. Dengan cara ini, stabilitas tembaga bisa ditingkatkan tanpa mengurangi performanya sebagai katalis (Pattanayak *et al.*, 2018).

Oksida tembaga ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) dikenal juga sebagai partikel sangat kecil dengan struktur kristal tertentu. Partikel ini memiliki sifat-sifat unik sehingga sangat berguna dalam berbagai bidang. Sifat-sifat ini termasuk kemampuannya menghantarkan listrik dan cahaya, serta kemampuannya untuk mempercepat reaksi kimia atau katalis (Alshammari *et al.*, 2023).

### 2.3 Titanium Dioksida ( $\text{TiO}_2$ )

Titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) adalah senyawa anorganik yang banyak digunakan dalam berbagai bidang, mulai dari industri pigmen, fotokatalisis, hingga aplikasi energi terbarukan.  $\text{TiO}_2$  dikenal karena sifatnya yang stabil, nontoksik, dan memiliki aktivitas fotokatalitik yang signifikan. Ketika dipanaskan hingga suhu  $60^\circ\text{C}$ , titanium akan teroksidasi menjadi titanium dioksida (Hindryawati, 2020). Titanium dioksida memiliki banyak keunggulan. Bahan ini sangat baik dalam memantulkan cahaya, aman digunakan, harganya terjangkau, dan sangat efisien dalam mengubah energi cahaya menjadi energi kimia. Selain itu, titanium dioksida juga stabil, tidak mudah larut, dan ramah lingkungan (Sucahya dkk., 2016).

$\text{TiO}_2$  merupakan fotokatalis yang populer karena sifat inert, stabilitas termal yang tinggi, dan toksisitas yang rendah. Salah satu cara untuk meningkatkan kinerja  $\text{TiO}_2$  sebagai fotokatalis adalah dengan menggabungkannya dengan karbon aktif. Karbon aktif, dengan luas permukaannya yang besar dan kemampuan adsorpsinya yang kuat, dapat membantu  $\text{TiO}_2$  dalam menyerap polutan dan mempercepat proses penguraiannya. Kombinasi  $\text{TiO}_2$  dan karbon aktif ini memberikan sinergi yang baik dalam aplikasi fotokatalisis (Septiani dkk, 2015).

### 2.4 Katalis Pt/C

Platina termasuk dalam golongan logam transisi, memiliki sifat unik yang membuatnya menjadi material katalis yang sangat baik. Kemampuannya dalam mempercepat reaksi kimia membuatnya sangat berguna dalam sel bahan bakar. Selain itu, ketahanan platina terhadap korosi dan sifat konduktifnya yang tinggi juga membuatnya ideal untuk digunakan dalam pembuatan kontak listrik dan peralatan medis seperti peralatan kedokteran gigi (Rachma dkk, 2017). Platina (Pt) paling sering digunakan sebagai katalis untuk menghasilkan hidrogen melalui proses elektrolisis. (Cheng *et al.*, 2016). Dalam bidang elektrokatalisis, karbon monoksida dikenal sebagai

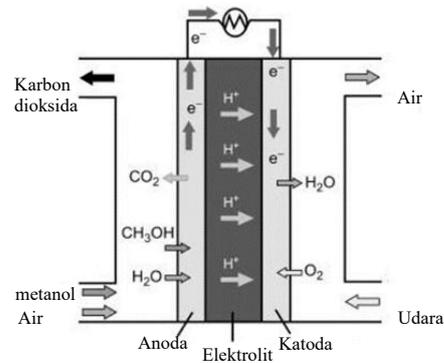
racun yang sangat kuat bagi katalis platinum. CO teradsorpsi secara kuat pada permukaan Pt, menyebabkan perubahan sifat elektronik dan memblokir situs aktif Pt. Akibatnya, aktivitas katalitik Pt menurun drastis, bahkan pada konsentrasi CO yang sangat rendah. Oleh karena itu, pengembangan katalis Pt yang toleran terhadap CO menjadi fokus utama dalam penelitian sel bahan bakar suhu rendah. (Kwon *et al.*, 2018).

Karbon, dengan berbagai bentuk seperti serbuk karbon, nanotube karbon, dan *fullerene*, merupakan material penopang yang paling umum digunakan untuk katalis platina dalam sel bahan bakar suhu rendah. Luas permukaan yang tinggi dan konduktivitas listrik yang baik dari karbon berkontribusi pada aktivitas elektrokatalitik yang tinggi. Studi menunjukkan bahwa ukuran partikel platina yang lebih kecil tidak selalu berarti aktivitas yang lebih tinggi, terutama karena pengaruh adsorpsi spesies teroksidasi. Selain itu, jenis elektrolit juga memainkan peran penting. Elektrolit asam dan basa dapat memberikan efek yang berbeda pada kinetika reduksi oksigen. Adsorpsi anion, seperti sulfat, dapat menghambat aktivitas katalitik, terutama dalam elektrolit asam. Penggunaan elektrolit polimer seperti Na-ion juga perlu dipertimbangkan karena dapat memodifikasi reaksi reduksi oksigen pada platina (Elezovic *et al.*, 2016).

## **2.5 Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)**

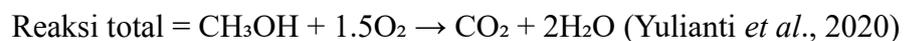
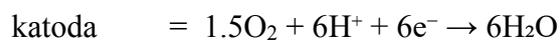
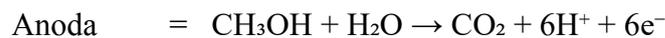
Sel bahan bakar metanol langsung, atau yang lebih dikenal sebagai *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC), merupakan jenis sel bahan bakar yang menggunakan metanol sebagai sumber energi utama. Salah satu komponen penting dalam DMFC adalah membran elektrolit, yang berfungsi sebagai bagian inti dari sistem ini. Membran ini memiliki peran penting dalam mentransportasikan ion hidrogen ( $H^+$ ) yang dihasilkan dari proses oksidasi metanol di anoda. Selain itu, membran elektrolit juga bertindak sebagai pemisah antara elektroda anoda dan katoda, sehingga memastikan jalannya reaksi elektrokimia dengan optimal (Hakim, 2018). Dalam DMFC, metanol dialirkan langsung ke dalam sel bahan bakar tanpa melalui proses pengolahan lebih lanjut. Hal ini memungkinkan konversi energi kimia dari metanol ( $CH_3OH$ ) menjadi energi listrik secara langsung. Konsep ini menyederhanakan sistem operasi DMFC dibandingkan dengan sistem konvensional, yang dimana menggunakan *reformer* untuk

menghasilkan hidrogen dari bahan bakar cair. Keunggulan lain DMFC adalah kemampuannya beroperasi pada temperatur kamar, berbeda dengan sel bahan bakar hidrogen yang memerlukan temperatur di atas 80 °C (Kaur *et al.*, 2021).



Gambar 2. Skema kerja DMFC

Dalam proses kerja DMFC (Gambar 2), metanol yang dimasukkan ke dalam anoda mengalami reaksi oksidasi, menghasilkan ion hidrogen ( $H^+$ ) dan elektron ( $e^-$ ). Elektron yang terbentuk mengalir melalui rangkaian eksternal, menciptakan arus listrik dari anoda ke katoda. Sementara itu, ion hidrogen ( $H^+$ ) berdifusi melalui membran elektrolit menuju katoda. Di bagian katoda, elektron ( $e^-$ ) dan ion hidrogen ( $H^+$ ) berinteraksi dengan oksigen ( $O_2$ ), menghasilkan air ( $H_2O$ ) serta melepaskan energi panas. Secara keseluruhan, reaksi yang terjadi dalam DMFC dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:



DMFC memiliki keunggulan baik dalam pengaplikasiannya maupun bahan bakar yang digunakan. Kombinasi antara keunggulan metanol sebagai bahan bakar dan DMFC sebagai teknologi konversi energi menjadikannya solusi yang menjanjikan untuk memenuhi kebutuhan energi di masa depan. Ketersediaan metanol dari berbagai sumber, kemudahan penanganan, efisiensi DMFC yang tinggi, serta dampak lingkungan yang minimal menjadikannya pilihan yang menarik untuk pengembangan energi yang berkelanjutan (Kaur *et al.*, 2021).

## 2.6 Membrane Electrode Assambly (MEA)

*Membrane Electrode Assambly* (MEA) merupakan komponen inti dalam perangkat elektrokimia seperti sel bahan bakar. MEA ini secara langsung memengaruhi kinerja perangkat, terutama dalam hal kepadatan daya, penggunaan katalis, dan biaya produksi. MEA yang saat ini dikembangkan memiliki struktur yang sangat efisien, memungkinkan perpindahan muatan, proton, dan massa secara cepat dan optimal. Hal ini berdampak pada peningkatan signifikan dalam pemanfaatan katalis dan kinerja keseluruhan perangkat (Li *et al.*, 2023).

MEA merupakan komponen penting dalam sistem DMFC. Fungsi utama MEA adalah memfasilitasi tiga proses elektrokimia simultan berupa transfer elektron melalui sirkuit eksternal dan pengumpul arus, migrasi proton melalui membran polimer elektrolit, dan transportasi reaktan gas menuju lapisan katalis. MEA tersusun atas dua elektroda, yakni katoda dan anoda, yang dipisahkan oleh membran polimer. Struktur elektroda sel bahan bakar terdiri dari beberapa komponen, termasuk lapisan difusi gas (GDL). GDL umumnya terdiri dari lapisan mikroporos (MPL) dan *backing layer* (BL). Kedua lapisan ini memiliki peran penting dalam transportasi gas reaktan, pengumpulan elektron, dan manajemen air. *Backing* lapisan (BL) dan lapisan porositas mikro (MPL) umumnya terbuat dari campuran karbon sebagai konduktor dan *Polytetrafluoroethylene* (PTFE) sebagai bahan hidrofobik. Sifat hidrofobik ini sangat penting untuk mencegah genangan air di dalam elektroda yang dapat menghambat kinerja sel bahan bakar. Karbon, sebagai bahan utama dalam elektroda, berperan sebagai matriks yang baik untuk menopang katalis dan juga sebagai pengisi pada lapisan MPL. Sifat konduktivitas, ketahanan korosi, dan luas permukaan yang tinggi dari karbon sangat berkontribusi pada kinerja MEA (Rohendi dkk., 2016).

### 2.6.1 Elektroda

Secara umum, elektroda pada sel bahan bakar terdiri dari beberapa lapisan yang saling melengkapi. Ada yang mengatakan terdiri dari tiga lapisan yaitu lapisan belakang, lapisan difusi gas, dan lapisan katalis. Namun, ada juga yang menyederhanakan menjadi dua lapisan utama berupa lapisan difusi gas dan lapisan katalis. Selain itu, dalam pembuatan elektroda juga sering digunakan bahan pendukung seperti kertas karbon. Ketika membuat elektroda, perlu memperhatikan kombinasi dan

sifat dari lapisan-lapisan ini, terutama lapisan difusi gas dan lapisan katalis. MPL yang ideal untuk mendukung lapisan katalis harus memiliki beberapa karakteristik penting, seperti konduktivitas listrik yang tinggi, interaksi yang baik dengan katalis, luas permukaan yang besar, kemampuan untuk menolak air dan mencegah genangan, ketahanan terhadap korosi, serta kemampuan untuk dengan mudah mengembalikan fungsi katalis. GDL dan CL dapat dibuat melalui berbagai metode, termasuk pengecoran, pengecatan, penyikatan, cetakan injeksi, impregnasi, penyemprotan, pengendapan lapisan, penggunaan membran berlapis katalis (CCM), dan deposisi elektro (Majlan *et al.*, 2018). Agar dapat berfungsi sebagai acuan yang baik, elektroda referensi perlu memenuhi beberapa syarat. Pertama, reaksi setengah sel yang terjadi pada elektroda harus dapat berlangsung bolak-balik dan mengikuti persamaan Nernst. Kedua, potensial elektroda harus tetap stabil dalam jangka waktu yang lama. Terakhir, elektroda harus mudah dibuat dan dirawat. (VijayaDurga *et al.*, 2014).

### **2.6.2 Gas Diffusion Layer (GDL)**

*Gas Diffusion Layer* (GDL) merupakan substrat berpori berbasis karbon yang krusial dalam MEA sel bahan bakar. Sebagai penghubung antara lapisan penyangga dan lapisan katalis, GDL berperan penting dalam mendistribusikan bahan bakar (hidrogen) ke anoda dan oksigen ke katoda, serta memfasilitasi transfer elektron yang diperlukan dalam reaksi elektrokimia. (Syarif *et al.*, 2022). GDL memiliki peran penting dalam menentukan kinerja keseluruhan sel bahan bakar. Fungsi utama GDL adalah sebagai pendukung katalis, media transport reaktan dan produk, serta penghantar listrik dan panas. GDL yang ideal harus memiliki sifat mekanik, hidrofilik-hidrofobik, dan permeabilitas gas yang seimbang. Desain struktur dan pemilihan material GDL yang tepat sangat penting untuk meningkatkan efisiensi sel bahan bakar (Majlan *et al.*, 2018).

Selain itu, tingkat kekristalan karbon juga berperan penting dalam menentukan sifat elektrokimia dan konduktivitas listrik elektroda. Konduktivitas listrik yang tinggi pada karbon sangat penting untuk memfasilitasi transport elektron. Ukuran partikel karbon, yang secara langsung mempengaruhi ukuran pori pada elektroda dan berperan penting dalam transportasi ion. Interaksi antara konduktivitas, ukuran pori, dan sifat hidrofobitas karbon memiliki pengaruh kompleks terhadap kinerja sel bahan bakar.

GDL dengan konduktivitas rendah akan mempermudah difusi reaktan dan produk, namun kurang optimal untuk transfer muatan. Porositas GDL yang tinggi memungkinkan transportasi ion yang lebih baik antara elektrolit dan MEA, sehingga meningkatkan kinerja elektrokimia. Material karbon seperti kertas karbon, kain karbon, dan tabung nano karbon sering digunakan sebagai dasar GDL, dengan PTFE sebagai pengikat. Impregnasi GDL dengan agen hidrofilik seperti tabung nano karbon multiwall dapat meningkatkan kinerja sel bahan bakar. Serat karbon memberikan tegangan sel yang tinggi dalam berbagai kondisi operasi (Syarif *et al.*, 2022).

### 2.6.3 Lapisan Katalis

Lapisan katalis pada DMFC berfungsi sebagai penghubung antara membran dan elektroda. Bersama dengan bahan pengikat, lapisan ini membentuk elektrokatalis yang berperan penting dalam reaksi elektrokimia di dalam sel (Vietanti *et al.*, 2019). Peran lapisan elektrokatalis adalah untuk memulai proses disosiasi hidrogen di sisi anoda dan untuk mempercepat reaksi reduksi oksigen (ORR) di sisi katoda (Baroutaji *et al.*, 2015). Gas hidrogen dengan tekanan tertentu masuk ke dalam *fuel cell* di kutub anoda. Gas hidrogen akan bereaksi dengan katalis akibat adanya tekanan. Ketika molekul hidrogen bersentuhan dengan platinum pada katalis, molekul tersebut terurai menjadi dua ion  $H^+$  dan dua elektron ( $e^-$ ). Elektron yang dihasilkan akan mengalir melalui anoda, menghasilkan energi listrik sebelum kembali ke kutub katoda *fuel cell*. Kutub katoda, gas oksigen ( $O_2$ ) yang didorong oleh tekanan akan bereaksi dengan katalis untuk membentuk dua atom oksigen. Muatan negatif yang dihasilkan akan menarik dua ion  $H^+$  dari membran PEM, dan ion-ion ini kemudian bergabung dengan satu atom oksigen serta elektron dari sirkuit luar untuk membentuk molekul air ( $H_2O$ ) (Ma'ruf dan widiharsa, 2016).

Katalis merupakan suatu zat yang berfungsi sebagai agen perantara dalam reaksi kimia tanpa mengalami perubahan permanen. Dalam proses katalisis, katalis bekerja dengan mempercepat laju reaksi tanpa terlibat dalam perubahan kimia itu sendiri. Dengan adanya katalis, energi aktivasi yang diperlukan untuk mencapai keadaan transisi dalam reaksi dapat diturunkan, sehingga reaksi dapat berlangsung lebih cepat dan dengan efisiensi yang lebih tinggi (Ramadhanti, 2023). Pt/C sering dipilih sebagai

elektrokatalis untuk DMFC karena kemampuannya menghasilkan kinerja yang sangat baik (Vietanti *et al.*, 2019). Selain Pt/C terdapat beberapa logam yang dapat digunakan sebagai elektrokatalis. Contoh katalis tembaga yang umum digunakan adalah Cu/ZnO, Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Kamsuwan *et al.*, 2022).

## 2.7 Karakterisasi MEA

Elektroda dikarakterisasi menggunakan *Cyclic Voltammetry* (CV), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *X-Ray Diffraction* (XRD) dan uji hidrofobisitas untuk mengetahui sifat elektrokimia, morfologi elektroda, gugus fungsi, kristografi, dan konduktivitas listrik.

### 2.7.1 *Cyclic Voltammetry* (CV)

Voltametri siklik merupakan teknik elektrokimia yang paling umum digunakan untuk mendapatkan informasi kualitatif mengenai reaksi redoks dan pembentukan radikal bebas. Teknik ini banyak diaplikasikan oleh para peneliti untuk mengkarakterisasi berbagai senyawa organik yang dapat mengalami reaksi redoks, kompleks logam, serta interaksi antara logam dan molekul organik (Fatih *et al.*, 2021). Voltametri siklik adalah metode yang efektif untuk mengkarakterisasi lapisan polimer. Puncak karakteristik pada voltamogram siklik mengindikasikan pembentukan lapisan difusi di dekat permukaan elektroda, yang berhubungan dengan proses transfer elektron yang reversibel selama reaksi oksidasi-reduksi. Voltametri siklik sering digunakan untuk memahami sifat-sifat lapisan polimer. Grafik yang dihasilkan dari voltametri siklik dapat menunjukkan bagaimana elektron berpindah pada lapisan polimer saat diberi tegangan. Puncak-puncak pada grafik ini menunjukkan terjadinya reaksi oksidasi dan reduksi. Elektropolimerisasi merupakan metode yang efisien untuk membuat lapisan polimer. Prosesnya cepat dan sederhana, serta memungkinkan pengendalian ketebalan lapisan secara akurat berdasarkan pengukuran arus listrik (Murniati dkk., 2012).

Voltametri siklik merupakan metode elektroanalitik yang sangat berguna untuk mempelajari berbagai reaksi redoks. Pada teknik ini, potensial listrik yang diberikan pada elektroda secara bertahap dinaikkan, lalu diturunkan kembali. Dengan cara ini, kita dapat mengamati proses reduksi dan oksidasi suatu zat secara berulang.

Dibandingkan dengan voltametri sapuan linier, voltametri siklik memberikan informasi yang lebih lengkap tentang proses redoks. Voltametri siklik merupakan alat yang sangat penting dalam bidang kimia. Teknik ini memungkinkan kita untuk mempelajari secara mendalam bagaimana suatu zat bereaksi ketika diberikan tegangan listrik. Informasi yang diperoleh dari voltametri siklik sangat berguna untuk memahami berbagai proses kimia, seperti pembentukan zat baru, kecepatan reaksi, dan sifat-sifat zat tersebut (VijayaDurga *et al.*, 2014).

Pengujian elektrokimia dengan potensiostat umumnya melibatkan tiga elektroda yang tersusun dalam sel: elektroda kerja (WE), referensi (RE), dan bantu (AE). Elektroda kerja, yang merupakan tempat berlangsungnya reaksi penyimpanan muatan, sering kali menggunakan material padat seperti karbon, emas, atau nikel. Elektroda referensi, seperti Ag/AgCl atau kalomel, dirancang untuk memiliki potensial stabil dan tidak dilalui arus. Elektroda bantu, yang berfungsi mengalirkan arus ke elektroda kerja, terbuat dari bahan konduktif seperti platina (Novandarys Sugandi *et al.*, 2018).

### **2.7.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)**

*Scanning Electron Microscopy* (SEM) merupakan teknik yang sangat berguna untuk mengamati detail permukaan material dengan resolusi sangat tinggi, hingga mencapai skala nanometer (Putama Mursal, 2018). Proses kerja SEM dimulai dengan pembentukan sinar elektron yang kemudian difokuskan ke permukaan sampel. Ketika elektron mengenai permukaan, ia akan berinteraksi dengan atom-atom di permukaan dan menghasilkan berbagai sinyal, seperti elektron sekunder dan sinar-X. Sinyal ini kemudian ditangkap oleh detektor dan diubah menjadi gambar. Gambar yang dihasilkan oleh SEM memiliki resolusi sangat tinggi, sehingga kita dapat melihat detail permukaan sampel yang sangat kecil. Tahap pertama dalam proses kerja SEM adalah menghasilkan berkas elektron. Berkas elektron ini berasal dari sebuah sumber elektron, seperti filamen yang dipanaskan. Setelah dipancarkan, elektron-elektron dipercepat dengan tegangan tinggi. Akselerasi ini memberikan energi yang cukup bagi elektron untuk melewati anoda dan berkumpul pada fokus yang sangat tajam. Tahap kedua, sinar elektron yang sudah kuat diarahkan pada sebuah lensa khusus. Sama seperti lensa pada kamera yang digunakan untuk memfokuskan cahaya, SEM juga menggunakan lensa (kumparan magnetik) untuk memfokuskan sinar elektron pada permukaan

sampel. Tahap Ketiga, Ketika sinar elektron mengenai sampel, terjadi tumbukan yang menghasilkan berbagai jenis radiasi, seperti elektron sekunder dan sinar-X. Keempat sinyal yang dihasilkan oleh permukaan sampel dikumpulkan oleh detektor dan diproses secara digital untuk menghasilkan gambar permukaan yang diperbesar (Lianah *et al.*, 2019).

### **2.7.3 X-Ray Diffraction (XRD)**

Analisis XRD adalah metode yang digunakan untuk mengidentifikasi jenis-jenis kristal yang ada dalam suatu bahan dengan memanfaatkan interaksi antara sinar-X dengan atom dalam kristal. Selain itu, kita juga bisa mengetahui ukuran partikel dan struktur kristal dari bahan tersebut. (Fatimah dan Utami, 2017). XRD bekerja berdasarkan prinsip difraksi sinar-X oleh atom-atom dalam kristal. Ketika sinar-X mengenai kristal, ia akan berinteraksi dengan elektron pada atom-atom tersebut menyebabkan terjadinya peristiwa difraksi. Cara sinar-X membelok ini khas untuk setiap jenis kristal. Pola difraksi yang dihasilkan merupakan sidik jari unik dari susunan atom dalam kristal, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal, menentukan ukuran kristal, dan menganalisis orientasi kristal (Lestari dan Sartika, 2018).

Tujuan utama dari analisis XRD pada elektroda karbon adalah untuk memahami struktur kristal dan ukuran partikel dari material tersebut menggunakan persamaan *Debye-Scherrer*. Persamaan *Debye-Scherrer* digunakan untuk menghitung ukuran kristal berdasarkan pola difraksi yang dihasilkan. Informasi ini sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja elektroda, karena sifat-sifat seperti luas permukaan dan ukuran partikel sangat mempengaruhi kapasitas penyimpanan energi dan laju transfer ion. (Putri dan Farma, 2021). Proses pengukuran dalam analisis XRD, sampel ditempatkan pada *holder* dan diputar di dalam instrumen. Detektor akan mencatat intensitas sinar-X yang dihamburkan pada berbagai sudut. Data yang diperoleh kemudian diproses untuk menghasilkan pola difraksi. Pola difraksi ini merupakan representasi grafis dari susunan atom dalam sampel. Dengan menganalisis pola difraksi, kita dapat menentukan parameter kristalografi seperti ukuran kristal, bentuk sel satuan, dan orientasi kristal (Lestari dan Sartika, 2018).

#### 2.7.4 *Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

Analisis FTIR memungkinkan identifikasi gugus fungsi spesifik dan jenis ikatan kimia yang ada di dalamnya (Taufik dkk., 2022) spektroskopi FTIR dipilih sebagai metode analisis untuk mempelajari perubahan fisikokimia pada sampel yang mengalami perlakuan uap dan kompresi. Dengan menggunakan aksesoris DRIFT, FTIR memungkinkan kita untuk menganalisis permukaan sampel secara langsung. Teknik ini sangat cocok untuk menganalisis bahan padat, karena dapat mengatasi permukaan yang kasar dan tidak rata. Selain itu, teknik ini juga relatif mudah dan cepat dilakukan (Bader *et al.*, 2020). FTIR, khususnya jika menggunakan teknik ATR, merupakan metode analisis yang terjangkau dan tidak memerlukan persiapan sampel yang rumit. Teknik ini sangat berguna untuk mengidentifikasi jenis ikatan kimia dalam senyawa organik. Untuk bahan anorganik, spektroskopi Raman seringkali digunakan sebagai pelengkap untuk membedakan fase amorf dan kristal (Hossain and Ahmed, 2023).

Spektroskopi FTIR adalah teknik spektroskopi yang memanfaatkan getaran dan rotasi molekul untuk mengidentifikasi senyawa kimia. Prinsip kerjanya didasarkan pada fakta bahwa setiap molekul memiliki momen dipol yang unik, sehingga akan menyerap radiasi inframerah pada frekuensi yang spesifik. Perbedaan dalam jenis, jumlah, dan posisi atom dalam suatu molekul akan menghasilkan spektrum FTIR yang berbeda-beda. Intinya, saat kita menyinari suatu molekul dengan sinar inframerah, molekul tersebut akan menyerap cahaya pada frekuensi tertentu. Penyerapan cahaya ini akan menghasilkan pola yang unik, yang kita sebut spektrum. Pola ini seperti sidik jari molekul, sehingga kita bisa mengidentifikasi jenis molekulnya (Gong *et al.*, 2024).

#### 2.7.5 *Particle Size Analyzer (PSA) dan Zeta Potensial*

Ukuran partikel merupakan salah satu karakteristik terpenting dalam sistem nanopartikel, karena secara langsung mempengaruhi keunikan sifat-sifat nanopartikel tersebut (Juliantoni *et al.*, 2021). *Particle Size Analyzer (PSA)* adalah instrumen laboratorium yang digunakan untuk mengukur distribusi ukuran partikel dalam sampel. PSA berfungsi dengan menerapkan metode *Dynamic Light Scattering (DLS)* dan teknik *Non-Invasive Back Scatter (NIBS)*, menggunakan laser HeNe dengan panjang gelombang maksimum 633 nm. Alat ini dapat diaplikasikan pada berbagai jenis

sampel, baik cairan maupun serbuk yang terdispersi dalam media cair, dan mampu mengukur ukuran partikel dalam rentang 0,6 nm hingga 9000 nm, tergantung pada karakteristik sampel yang dianalisis. PSA (*Particle Size Analyzer*) juga digunakan diantaranya untuk mengetahui ukuran partikel, distribusi ukuran partikel, dan zeta potensial. Polidispersitas adalah ukuran dispersi atau deviasi standar distribusi ukuran. Deskripsi kuantitatif polidispersitas, disebut indeks polidispersitas (PDI) yang menunjukkan sejauh mana polidispersitas distribusi (Karmakar, 2019). Nilai indeks polidispersitas yang mendekati 0 menunjukkan bahwa ukuran partikel dalam sampel memiliki dispersi yang homogen. Sebaliknya, jika nilai polidispersitas melebihi 0,5, hal ini mengindikasikan tingkat heterogenitas yang tinggi. Semakin mendekati angka 0, semakin baik distribusi ukuran partikel tersebut. Partikel yang berukuran lebih dari 500 nm dan memiliki nilai indeks polidispersitas di atas 0,5 dianggap besar dan teragglomerasi (wirasti dkk., 2021).

Zeta potensial adalah parameter yang menggambarkan muatan listrik antar partikel koloid. Semakin tinggi nilai zeta potensial, semakin efektif pencegahan terhadap terjadinya flokulasi. Sebaliknya, penurunan nilai zeta potensial memungkinkan partikel untuk saling tarik-menarik, yang dapat menyebabkan flokulasi. Koloid dengan nilai zeta potensial yang tinggi, baik negatif maupun positif, menunjukkan stabilitas elektrik yang baik, sedangkan koloid dengan nilai zeta potensial rendah cenderung mengalami pengentalan atau flokulasi. Secara ideal, muatan zeta potensial partikel harus lebih tinggi dibandingkan dengan medium pendispersi untuk mencegah agregasi. Nanopartikel yang memiliki nilai zeta potensial di bawah -30 mV atau di atas +30 mV menunjukkan stabilitas yang lebih baik. Sistem dispersi dengan nilai zeta potensial rendah lebih rentan terhadap pembentukan agregat karena adanya gaya Van der Waals dalam interaksi antar partikel (Juliantoni *et al.*, 2020).

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Waktu dan Tempat**

Penelitian ini dilakukan pada bulan Agustus 2024 sampai dengan Desember 2024 di Laboratorium Pusat Unggulan Riset *Fuel Cell* dan Hidrogen Universitas Sriwijaya.

#### **3.2 Alat dan Bahan**

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini diantaranya alu dan mortar, botol vial, *camera*, cawan porselen, corong *buchner*, *furnace*, gelas beaker, gunting, *hair dryer*, *hot plate*, *hot press*, kuas, *magnetic stirrer*, mikroskop LCD digital, *mixer*, neraca, oven, penggaris, pipet tetes, pompa vacum, potensiostat, *stack* DMFC, sudip, dan *ultrasonic*.

Bahan yang digunakan pada penelitian ini diantaranya akuades, *aluminium foil*, *carbon paper*, karbon binchotan, *carbon black* Vulcan XC-72R, kertas saring, PFSA D170-U *Proton Exchange Membrane*, metanol, plastik wrap, *Polytetrafluoroethylene* (PTFE), Pt/C, serbuk Tembaga oksida ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), dan Titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ).

#### **3.3 Prosedur Penelitian**

##### **3.3.1 Preparasi Serbuk Karbon Binchotan**

Karbon binchotan diperoleh secara komersial dalam bentuk balok karbon binchotan. Balok arang kayu diperhalus ukurannya menggunakan mesin penghancur (mesin kopi). Serbuk karbon ini kemudian didispersikan dalam akuades dengan bantuan mixer hingga membentuk suspensi yang homogen. Selanjutnya, dispersi disaring menggunakan pompa vakum dan diambil residu dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu  $105^\circ\text{C}$  selama 1 jam dan setiap 30 menit padatan dispersi ditimbang ulang untuk mendapatkan hasil pemanasan dengan berat konstan yang menunjukkan bahwa padatan dispersi yang telah terbebas dari pelarut.

#### **3.4 Karakterisasi serbuk karbon binchotan**

##### **3.4.1 Karakterisasi Serbuk Karbon Binchotan *Particle Size Analyzer* (PSA)**

Penentuan ukuran partikel partikel serta penentuan nilai zeta potensial dilakukan dengan pengujian menggunakan alat PSA (*Particle size analyzer*). Pengujian ini dilakukan dengan cara meletakkan sampel kedalam kuvet khusus PSA (*Particle size analyzer*) sebanyak 2,5 mL dan dimasukkan kedalam holder pada alat PSA (*Particle size analyzer*).

### 3.4.2 Karakterisasi *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Serbuk karbon ditempatkan di dalam alat FTIR, kemudian sinar inframerah ditembakkan ke sampel karbon dengan panjang gelombang 4000 sampai 500 nm, saat sinar melewati sampel, sebagian sinar akan diserap oleh molekul karbon. Detektor dalam alat FTIR akan mencatat jumlah sinar yang diserap dan diteruskan. Data yang diperoleh kemudian diolah oleh komputer untuk menghasilkan grafik yang menunjukkan karakteristik unik dari molekul karbon, yang disebut spektrum FTIR.

### 3.5 Pembuatan *Gas diffusion Layer* (GDL)

Sebanyak 1,6 g karbon binchotan dibasahi dengan akuades dan dilarutkan dengan metanol, campuran diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 1 jam. Sebanyak 0,4 g PTFE ditambahkan kedalam campuran dan diaduk kembali menggunakan alat pencampur atau *mixer* selama 15 menit lalu dihomogenkan menggunakan *ultrasonic* selama 15 menit. Tinta yang didapatkan kemudian dikuas keatas permukaan *carbon paper* dengan luas 2 x 2 cm dengan alur penguasan vertikal dan horizontal secara bergantian. Tinta yang telah dikuas dikeringkan menggunakan *hairdryer* setiap satu kali penguasan. Prosedur diulangi dengan cara yang sama hingga semua tinta habis. Hasil GDL (*Gas Diffussion Layer*) yang didapatkan disintering dengan menggunakan *furnace* pada suhu 350° selama 3 jam. Pada tahap ini dihasilkan GDL karbon binchotan. Prosedur diulangi untuk pembuatan GDL vulcan dari serbuk karbon vulcan.

#### 3.5.1 Preparasi Serbuk Katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>

Pembuatan katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub> dilakukan menggunakan metode sol-gel yang mana campuran serbuk Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub> dilakukan dengan variasi perbandingan 70:30 dan 30:70. Perbandingan 70:30 Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub> dilakukan dengan menimbang 1,4 g serbuk

Cu<sub>2</sub>O dan ditambah 0,6 g TiO<sub>2</sub>, sedangkan perbandingan 30:70 dilakukan dengan menimbang 0,6 g serbuk Cu<sub>2</sub>O dan ditambah dengan 1,4 g TiO<sub>2</sub> kemudian disintering menggunakan *furnace* pada suhu 600°C selama 3 jam. Pada tahap ini dihasilkan serbuk katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub> dengan perbandingan 30:70 dan 70:30.

### **3.6 Preparasi Elektroda Katoda dan Anoda**

#### **3.6.1 Preparasi Elektroda Katoda Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C dengan Metode Kuas**

Serbuk katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub> dengan perbandingan 70:30 dan 30:70 yang telah dibuat sebelumnya diambil sebanyak 0,4 g dan ditambahkan 1,2 g karbon binchotan dan dilarutkan dengan metanol kemudian diaduk menggunakan *mixer* selama 15 menit. Campuran kemudian ditambah PTFE sebanyak 0,4 g dan diaduk kembali menggunakan *mixer* selama 15 menit. Tinta yang didapatkan kemudian dikuas keatas permukaan GDL (prosedur 3.5) dengan luas 2 cm x 2 cm dengan alur penguasan vertikal dan horizontal secara bergantian. Tinta yang telah dikuas dikeringkan menggunakan *hairdryer* setiap satu kali penguasan. Prosedur diulangi dengan cara yang sama hingga semua tinta habis. Hasil elektroda katoda yang didapatkan disintering dengan menggunakan *furnace* pada suhu 350° selama 3 jam. Prosedur diulangi untuk pembuatan katoda vulcan sebagai pembanding.

#### **3.6.2 Preparasi Elektroda Anoda Pt/C dengan Metode Kuas**

Katalis Pt/C 20% *fuel cell* didapatkan secara komersial. Sebanyak 0,4 g katalis Pt/C ditambah 0,4 karbon binchotan lalu dibasahi menggunakan akuades dan dilarutkan dengan metanol. Campuran diaduk menggunakan *mixer* selama 15 menit dan ditambah 0,2 g PTFE kemudian diaduk kembali menggunakan *mixer* selama 15 menit hingga membentuk tinta. Tinta yang didapatkan kemudian dikuas ke permukaan GDL binchotan yang telah di preparasi sebelumnya dengan luas 2 x 2 cm dengan alur penguasan vertikal dan horizontal secara bergantian. Tinta yang telah dikuas dikeringkan menggunakan *hairdryer* setiap satu kali penguasan. Prosedur diulangi dengan cara yang sama hingga semua tinta habis. Hasil GDL yang didapatkan disintering dengan menggunakan *furnace* pada suhu 350° selama 3 jam. Prosedur diulangi untuk pembuatan elektroda anoda GDL vulcan.

### 3.7 Karakterisasi Elektroda

#### 3.7.1 Pengujian Sifat Hidrofobitas

CL binchotan dan vulcan yang sudah dipreparasi sebelumnya, masing-masing diletakkan pada plat kaca preparat dan disesuaikan dengan penampakan pada kamera. Akuades diambil menggunakan pipet tetes yang kemudian diteteskan pada permukaan kertas karbon dan GDL. Pada kamera depan akan tampak lengkungan cairan, lalu tetesan yang tampak akan diambil gambarnya menggunakan kamera dengan lensa makro. Berdasarkan gambar yang diperoleh akan diamati lengkungan cairan yang terbentuk dan dihitung sudut kontak perpotongan cair dengan plat menggunakan aplikasi *on screen Protractor*.

#### 3.7.2 Karakterisasi dengan Metode *Cyclic Voltammetry* (CV)

Pengujian CV menggunakan alat potensiostat komersial. Konfigurasi setengah sel yang dilakukan dengan menggunakan Ag/AgCl sebagai elektroda pembanding, platinum sebagai elektroda pembantu, dan elektroda Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C sebagai elektroda kerja, sedangkan elektrolit yang digunakan berupa larutan NaOH 1 M. Ukuran katalis yang digunakan sebesar 2 g/cm<sup>2</sup> dengan *scan rate* yang digunakan sebesar 50 mV/s dari jendela potensial sebesar -0,6 sampai 0,6. Pengukuran dengan cara yang sama juga dilakukan terhadap anoda Pt/C.

Hasil pengujian menggunakan *Cyclic Voltammetry* menghasilkan kurva yang menggambarkan hubungan antara tegangan (Volt) sebagai input dan arus (mA) sebagai output (Ledilicza *et al.*, 2020). Puncak-puncak pada kurva ini, yang disebut puncak anodik dan katodik, merepresentasikan proses perpindahan elektron yang terjadi selama reaksi redoks. Data area puncak voltammogram yang diperoleh akan digunakan untuk menghitung nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA). Nilai ini kemudian dapat digunakan untuk memahami sifat katalitik dari suatu katalis (Kumar *et al.*, 2018). Perhitungan nilai ECSA dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$ECSA = C_{DL} / C_S$$

di mana :

$C_{DL}$  = Kapasitansi lapisan ganda elektrokimia

$C_S$  = Kapasitansi spesifik sampel (Yang *et al.*, 2020)

### 3.7.3 Karakterisasi dengan Metode *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Pengujian elektroda yang akan dianalisis dilakukan dengan menggunakan alat SEM type AxiaChemi SEM, kemudian elektroda diletakkan langsung di atas tray SEM tanpa pelapisan. Selanjutnya, SEM akan mengambil gambar permukaan elektroda dengan perbesaran 5000x di tiga titik yang berbeda. Selain itu, komposisi elemen pada elektroda juga akan dianalisis secara detail menggunakan teknik spektroskopi atau mapping pada perbesaran yang sama.

### 3.7.4 Karakterisasi dengan Metode *X-Ray Diffraction* (XRD)

Sampel elektroda diletakkan pada sampel holder. Selanjutnya pengukuran difraksi sinar-X dilakukan pada wilayah  $2\theta$  dengan mode *continuous scan*. Rentang sudut pengukuran yang digunakan sebesar  $5^\circ$  hingga  $90^\circ$  dengan lebar langkah sebesar  $0,02^\circ$  dan kecepatan scan 10.000 deg/min, dengan menggunakan tegangan sebesar 30 kV dan kuat arus yang digunakan sebesar 10 mA.

## 3.8 Pembuatan dan Pengujian Kinerja MEA

### 3.8.1 Pembuatan MEA

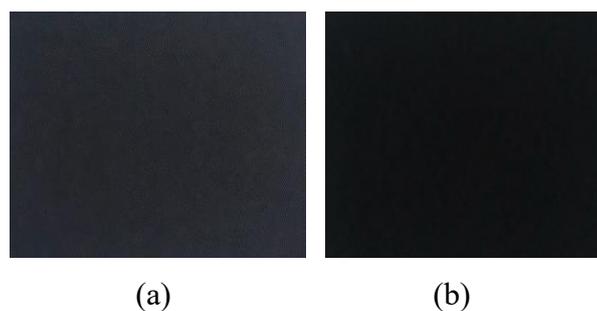
Elektroda  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  sebagai katoda dan elektroda Pt/C sebagai anoda direkatkan diantara dua sisi membran. Kedua sisi elektroda dilapisi dengan *aluminium foil* dan selanjutnya dilapisi dengan plat aluminium panas. Lapisan ini akan membentuk MEA. MEA yang telah dipreparasi dimasukkan ke dalam *hot press* dengan tekanan sebesar 2000 psi dan suhu  $135^\circ\text{C}$  selama 3 menit.

### 3.8.2 Pengujian Kinerja MEA pada DMFC

MEA dipasang pada stack DMFC dan dilakukan pengujian CCV (*Closed Circuit Voltage*) dan OCV (*Open Circuit Voltage*) dan pengujian beban variasi (100 mA), (200 mA), (300 mA), (400 mA), (500 mA) dan (600 mA) pada variasi konsentrasi metanol yaitu 5%, 10%, 15%, dan 20%. Pengujian MEA pada DMFC akan menghasilkan tegangan terukur yang digunakan sebagai data grafik untuk menentukan kinerja MEA.



berpori dengan ketebalan antara 200–300  $\mu\text{m}$ , yang umumnya terbuat dari serat karbon. Tanpa perlakuan tambahan, serat-serat ini bersifat hidrofilik, dan struktur mikro berpori dari serat karbon murni akan menyerap air saat memasuki GDL. Hal ini dapat menghambat jalur oksigen yang bergerak dalam arah berlawanan. Oleh karena itu, GDL dilapisi dengan bahan hidrofobik, biasanya *politetrafluoroetilen* (PTFE) (Froning *et al.*, 2021). PTFE digunakan sebagai pengikat antara tinta dan kertas karbon, serta berfungsi untuk mencegah terjadinya genangan (Sim *et al.*, 2021). Pengaplikasian MPL pada permukaan kertas karbon menggunakan metode kuas dengan arah penguasan vertikal dan horizontal secara bergantian. Hasil yang diperoleh menunjukkan GDL dengan jenis karbon vulcan lebih pekat dan gelap dibandingkan dengan GDL dengan jenis karbon binchotan. Hasil dapat dilihat pada Gambar 4.



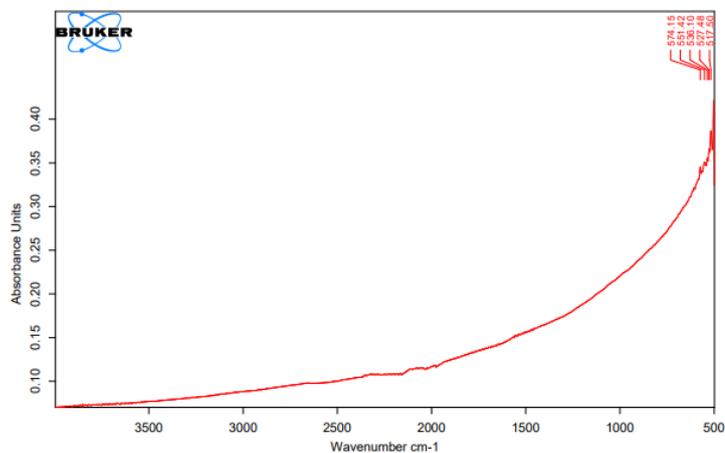
Gambar 4. *Gas Diffusion layer* (GDL), (a) karbon binchotan (b) karbon vulcan

## 4.2 Karakterisasi Serbuk Karbon Binchotan

### 4.2.1 Pengujian *Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

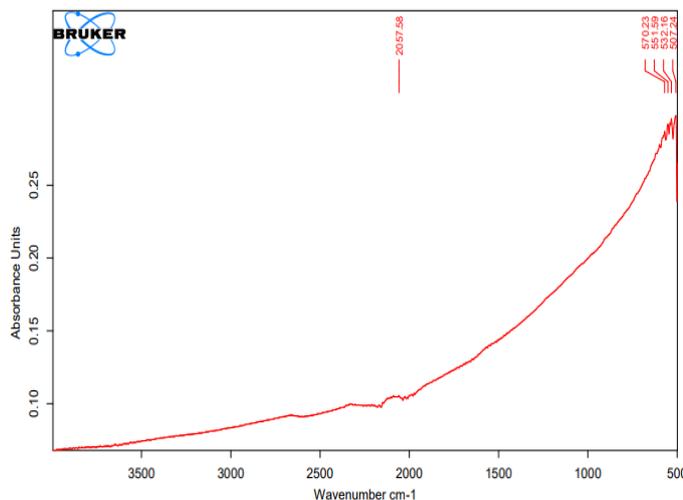
FTIR digunakan untuk mengetahui senyawa kimia melalui pola spektrum inframerah yang dihasilkan oleh molekul. Setiap senyawa memiliki pola serapan yang berbeda-beda, sehingga FTIR dapat membantu mengidentifikasi komponen dalam suatu sampel. Selain untuk identifikasi, FTIR juga berguna untuk menentukan konsentrasi komponen tertentu dalam suatu campuran. Dengan membandingkan intensitas puncak pada spektrum, FTIR dapat memberikan informasi tentang jumlah atau konsentrasi senyawa dalam sampel tersebut (Nugroho dkk., 2024). Wilayah spektrum inframerah dapat dibagi menjadi tiga daerah berdasarkan panjang gelombang:  $<400\text{ cm}^{-1}$ ,  $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ , dan  $>4000\text{ cm}^{-1}$ . Daerah menengah ( $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ ) paling sering dieksplorasi dalam analisis spektroskopi inframerah karena

memberikan banyak informasi tentang vibrasi molekul, khususnya regangan dan bending dari berbagai ikatan kimia (Nandiyanto *et al.*, 2019). Penelitian ini menggunakan daerah yaitu 500-3500 yang merupakan wilayah menengah.



Gambar 5. Grafik FTIR karbon binchotan

Hasil pengujian *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) pada serbuk karbon binchotan (Gambar 5), terdapat beberapa analisis yang dapat dilakukan meskipun spektrum yang dihasilkan kurang ideal karena tidak menunjukkan puncak serapan yang jelas pada wilayah bilangan gelombang yang umumnya terkait dengan gugus fungsi organik ( $4000\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$ ). Spektrum yang diperoleh didominasi oleh garis dasar yang naik, terutama di wilayah bilangan gelombang rendah. Ketidakhadiran puncak serapan signifikan di wilayah  $4000\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan bahwa serbuk karbon binchotan ini kemungkinan memiliki kandungan gugus fungsi organik yang sangat rendah, meskipun tidak terlalu signifikan akan tetapi keberadaan serapan C-O terlihat muncul di daerah sidik jari. Hal ini mungkin disebabkan oleh proses karbonisasi yang intensif yang menghilangkan sebagian besar gugus fungsi yang mengandung oksigen dan hidrogen. Garis dasar yang naik di wilayah bilangan gelombang rendah dapat disebabkan oleh partikel karbon yang ukurannya tidak seragam atau terlalu besar, yang mengakibatkan penyerakan radiasi inframerah dan menghasilkan *baseline* yang naik. Puncak-puncak kecil yang terlihat di wilayah bilangan gelombang rendah (sekitar  $517\text{ cm}^{-1}$ ,  $527\text{ cm}^{-1}$ ,  $536\text{ cm}^{-1}$ ,  $551\text{ cm}^{-1}$ , dan  $574\text{ cm}^{-1}$ ) kemungkinan berkaitan dengan vibrasi kisi kristal karbon atau vibrasi ikatan anorganik yang mungkin ada sebagai impuritas dalam sampel. Puncak-puncak ini tidak spesifik untuk gugus fungsi organik yang umum.



Gambar 6. Grafik FTIR karbon vulcan

Hasil pengujian FTIR pada serbuk karbon vulcan (Gambar 6), terlihat bahwa di wilayah bilangan gelombang  $3996\text{-}2500\text{ cm}^{-1}$  absorbansi relatif rendah dan hampir konstan. Ini menunjukkan bahwa karbon vulcan tidak banyak menyerap radiasi inframerah pada frekuensi tinggi tersebut. Selanjutnya, terdapat peningkatan absorbansi yang bertahap di rentang ini, yang mungkin disebabkan oleh berbagai vibrasi, termasuk vibrasi  $\text{C}=\text{C}$  ( $1600\text{-}1680\text{ cm}^{-1}$ ) dari struktur aromatik yang umum dalam karbon. Namun, karena peningkatan ini bertahap dan tidak ada puncak tajam, sulit untuk mengidentifikasi gugus fungsi tertentu secara pasti, kemungkinan karena adanya kontribusi dari berbagai vibrasi yang tumpang tindih. Peningkatan absorbansi menjadi lebih curam di bawah  $1500\text{ cm}^{-1}$ . Wilayah ini sering disebut sebagai *fingerprint region* dan sangat kompleks, dengan banyak vibrasi berbeda yang dapat berkontribusi pada absorbansi, seperti vibrasi  $\text{C-O}$ ,  $\text{C-H}$ , dan kerangka molekul. Karena kompleksitas ini, sulit untuk mengidentifikasi gugus fungsi spesifik tanpa data tambahan dan perbandingan dengan spektrum standar. Kenaikan yang curam kemungkinan besar disebabkan oleh kombinasi berbagai vibrasi ikatan dalam struktur karbon amorf.

#### 4.2.2 Particle Size Analyzer (PSA) dan Zeta Potensial

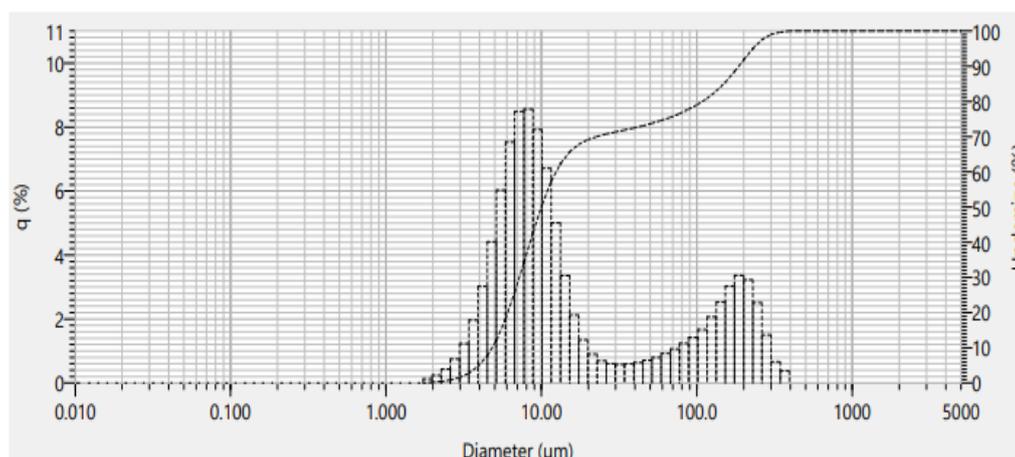
Analisis ukuran partikel bertujuan untuk menentukan ukuran partikel dan distribusi ukuran partikel yang akan digunakan. Ukuran partikel katalis yang tepat dapat meningkatkan luas permukaan aktif yang berperan dalam meningkatkan efisiensi

reaksi elektrokimia. Katalis dengan ukuran partikel lebih kecil umumnya memiliki area permukaan yang lebih besar, sehingga menyediakan lebih banyak situs reaksi untuk proses konversi energi. Distribusi ukuran partikel yang optimal juga berkontribusi pada peningkatan transportasi massa antara reaktan dan katalis yang sangat penting dalam aplikasi *fuel cell*. Berikut adalah tabel data hasil *particle size analyzer* karbon binchotan.

Tabel 1. Hasil karakteristik ukuran karbon binchotan

Parameter Pengukuran	Diameter (10%) $\mu\text{m}$	Diameter (50%) $\mu\text{m}$	Diameter (90%) $\mu\text{m}$
Rata-rata	4.80199	9.99736	186.21289

Tabel 1 menunjukkan bahwa pada diameter 10% didapatkan sebesar  $4.80199 \mu\text{m}$  yang dimana hal ini berarti 10% partikel memiliki ukuran di bawah  $4.80199 \mu\text{m}$ , sedangkan pada diameter 50% menunjukkan, 50% partikel dalam sampel berukuran di bawah  $9.99736 \mu\text{m}$ , dan 50% sisanya berukuran di atas  $9.99736 \mu\text{m}$ , dan pada diameter 90% menunjukkan partikel memiliki ukuran di bawah  $186.21289 \mu\text{m}$ . Hasil juga dapat dilihat dalam bentuk grafik pada gambar 7.

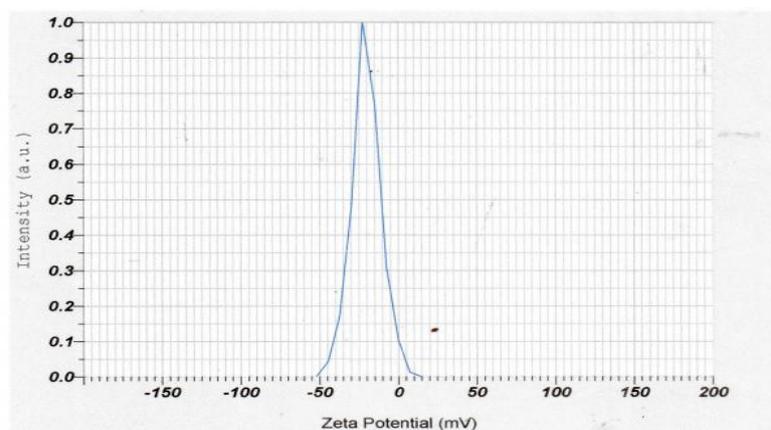


Gambar 7. Grafik *particle size analyzer* karbon binchotan

Grafik menunjukkan distribusi ukuran partikel yang polimodal (Gambar 7), artinya terdapat beberapa puncak atau mode dalam distribusi, hal ini mengindikasikan bahwa sampel karbon binchotan terdiri dari beberapa kelompok partikel dengan ukuran yang berbeda. Puncak utama terlihat pada ukuran 8-10  $\mu\text{m}$ , Gambar 7 memperlihatkan bahwa ukuran partikel karbon binchotan tidak seragam, melainkan berkelompok-

kelompok dengan ukuran yang berbeda-beda (polimodal). Hal ini ditunjukkan dengan adanya beberapa puncak pada grafik distribusi ukuran partikel. Puncak tertinggi menunjukkan bahwa ukuran partikel yang paling banyak ditemukan dengan ukuran 8-10  $\mu\text{m}$ . Namun, ada juga partikel-partikel lain yang berukuran lebih kecil atau lebih besar dari kisaran ini. Ukuran rata-rata partikel diperoleh sebesar 51.24776  $\mu\text{m}$ . Namun, karena sebaran ukuran partikel tidak simetris, nilai rata-rata ini kurang menggambarkan kondisi yang sebenarnya. Ukuran tengah (median) partikel diperoleh sebesar 9.99736  $\mu\text{m}$ , yang menunjukkan 50% partikel berukuran lebih kecil dari angka ini dan 50% sisanya berukuran lebih besar. Ukuran yang paling sering muncul berupa 8.2001  $\mu\text{m}$ . Perbedaan ukuran partikel ini kemungkinan disebabkan oleh proses produksi karbon binchotan, seperti karbonisasi (pemanasan kayu untuk menghasilkan arang), aktivasi (proses untuk meningkatkan luas permukaan arang), dan penggilingan (untuk memperkecil ukuran arang). Setiap tahapan ini dapat mempengaruhi distribusi ukuran partikel yang dihasilkan.

Pengukuran zeta potensial berperan penting dalam menentukan stabilitas sistem koloid yang mengandung karbon binchotan. Nilai zeta potensial yang tinggi menunjukkan kemampuan untuk mencegah terjadinya penggumpalan, sehingga memastikan partikel tetap terdispersi dengan baik dalam larutan. Zeta potensial juga memberikan informasi mengenai muatan permukaan partikel karbon binchotan, membantu dalam memahami interaksi antar partikel serta interaksi dengan bahan lain dalam sistem, yang dapat mempengaruhi sifat fisik dan kimia material tersebut. Analisis zeta potensial memungkinkan untuk memprediksi perilaku karbon binchotan dalam berbagai aplikasi. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 8.



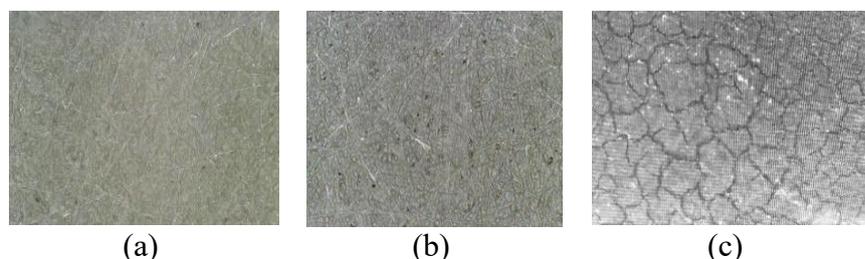
Gambar 8. Grafik zeta potensial karbon binchotan

Grafik zeta potensial karbon binchotan pada Gambar 8 menunjukkan rata-rata nilai zeta potensial karbon binchotan diperoleh sebesar  $-20,3$  mV. Tanda negatif menunjukkan bahwa permukaan partikel karbon binchotan memiliki muatan negatif yang berasal dari karbonil. Nilai  $-20,3$  mV ini umumnya dianggap cukup tinggi untuk memberikan stabilitas dispersi yang baik, yang berarti partikel karbon binchotan cenderung saling menolak dan tidak mudah menggumpal dalam cairan. Grafik distribusi zeta potensial menunjukkan bahwa sebagian besar partikel memiliki nilai yang cukup seragam di sekitar rata-rata, mengindikasikan adanya homogenitas dalam muatan permukaan partikel. Nilai zeta potensial yang negatif dan relatif tinggi menunjukkan bahwa karbon binchotan cenderung stabil dalam dispersi cair. Muatan negatif pada permukaan karbon binchotan dapat mempengaruhi interaksi dengan zat lain yang bermuatan, seperti kation (ion bermuatan positif) dalam larutan.

### 4.3 Karakterisasi *Gas Diffusion Layer* (GDL)

#### 4.3.1 Karakterisasi Struktur Mikro Menggunakan Mikroskop

Karakteristik struktur mikro GDL dilakukan dengan menggunakan mikroskop pada perbesaran 1000x bertujuan untuk melihat permukaan GDL dan penyebaran karbon yang telah dikuas. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 9.



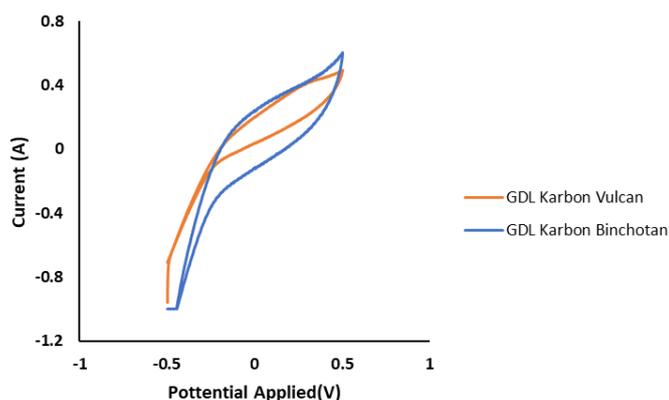
Gambar 9. Hasil pengamatan menggunakan mikroskop, (a) *Carbon paper* (b) GDL Karbon binchotan (c) GDL Karbon vulcan

Hasil pengamatan menggunakan mikroskop pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa (a) hasil mikroskop pada kertas karbon terlihat serat-serat acak dan tidak teratur, yang merupakan ciri khas umum dari kertas karbon. Hasil (b) GDL karbon binchotan memiliki struktur berlubang atau pori yang berfungsi untuk memfasilitasi difusi ion yang lebih baik menuju matriks MEA (Syarif *et al.*, 2022). Pada gambar (c) hasil GDL karbon vulcan terlihat retakan pada permukaan disebabkan oleh metode penguasan dalam proses pembuatan yang dilakukan dengan tekanan pada tinta agar strukturnya

lebih kompak (Rohendi *et al.*, 2016). Berdasarkan hasil struktur mikro terlihat pada karbon binchotan tidak mengalami adanya retakan seperti karbon vulcan. Adanya retakan pada GDL mengganggu distribusi gas yang merata. Akibatnya, suplai metanol dan oksigen ke katalis menjadi tidak optimal. Hal ini menyebabkan penurunan laju reaksi elektrokimia, sehingga arus listrik yang dihasilkan oleh DMFC berkurang. Selain itu, efisiensi penggunaan metanol juga menurun karena tidak semua metanol dapat berpartisipasi dalam reaksi.

#### 4.3.2 Karakterisasi Sifat Elektrokimia *Gas Diffusion Layer* (GDL) dengan Metode *Cyclic Voltammetry* (CV)

Pengukuran sifat elektrokimia dengan variasi elektroda dilakukan menggunakan metode CV dengan *scan rate* 50 mV/s dan larutan NaOH 1 M sebagai larutan elektrolit. Kurva yang dihasilkan dengan pengukuran CV berupa kurva voltammogram yang merupakan hubungan antara kerapatan arus terhadap tegangan. Proses penangkapan dan pelepasan electron pada elektroda, yang memicu reaksi oksidasi dan reduksi, menghasilkan puncak anodik dan katodik pada kurva CV (Yulianti *et al.*, 2019). Variasi dalam kurva voltammogram antara elektroda  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  dan Pt/C, yang mencerminkan perbedaan aktivitas elektrokimia, dapat diamati pada Gambar 10.



Gambar 10. Hasil CV GDL karbon binchotan dan karbon vulcan

Hasil pengukuran menggunakan metode CV (Gambar 10) menunjukkan bahwa GDL karbon binchotan dan vulcan terlihat tidak memiliki puncak anodik dan katodik. Hal ini menandakan tidak adanya logam oksida dalam komposisi GDL (*Gas Diffusion Layer*). Hasil pengukuran CV dapat digunakan untuk menghitung nilai ECSA, dimana

nilai ECSA ini menunjukkan dapat digunakan untuk menghitung nilai ECSA, dimana nilai luas permukaan aktif katalitik.

Tabel 2. Nilai ECSA GDL binchotan dan vulcan

No.	Jenis Karbon GDL	Nilai ECSA (cm <sup>2</sup> /g)
1.	Binchotan	2.212174
2.	Vulcan	3.525098

Perhitungan nilai ECSA pada GDL binchotan dan vulcan berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa GDL vulcan memiliki nilai ECSA yang lebih tinggi yaitu 3.525098cm<sup>2</sup>/g dibandingkan dengan nilai ECSA GDL binchotan sebesar 2.212174 cm<sup>2</sup>/g. Hal ini disebabkan oleh ukuran partikel vulcan yang umumnya lebih kecil dan distribusi ukuran partikel yang lebih merata dibandingkan binchotan. Ukuran partikel yang lebih kecil tersebut berkontribusi pada peningkatan luas permukaan. Luas permukaan yang lebih besar berhubungan langsung dengan nilai ECSA yang lebih tinggi, karena menyediakan lebih banyak situs aktif untuk reaksi elektrokimia. Hal ini sejalan dengan hasil pengukuran PSA yang menunjukkan bahwa ukuran partikel vulcan lebih kecil dibandingkan binchotan.

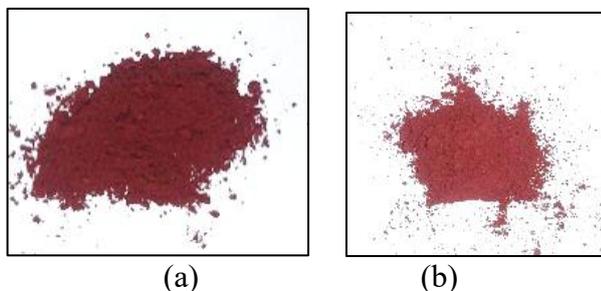
#### 4.4 *Catalyst layer (CL)*

Katalis yang digunakan berupa Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub> dengan variasi konsentrasi 30:70 dan 70:30 dan Pt/C. Katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub> digunakan pada sisi katoda dan Pt/C digunakan pada sisi anoda.

##### 4.4.1 *Preparasi Lapis Katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>*

Variasi perbandingan katalis yang dilakukan antara Cu<sub>2</sub>O dan TiO<sub>2</sub> berupa 30:70 dan 70:30. Variasi dilakukan pada sisi katoda yang dikuas diatas kertas karbon yang telah dikuas dengan tinta GDL terlebih dahulu dengan luas permukaan 2 x 2 cm. Campuran katalis Cu<sub>2</sub>O dan TiO<sub>2</sub> dilakukan dengan metode sol-gel yang dimana serbuk Cu<sub>2</sub>O dan TiO<sub>2</sub> cair dicampurkan dan kemudian disintering menggunakan *furnace* pada suhu 600°C selama 1 jam. Suhu sintering ditentukan berdasarkan titik leleh TiO<sub>2</sub> yang lebih tinggi, sehingga pada suhu tersebut difusi antar partikel dan

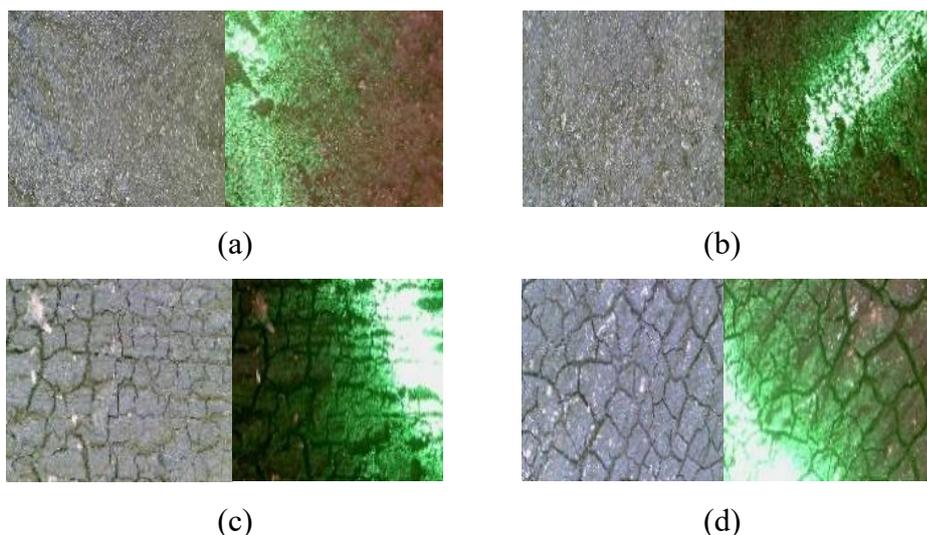
pembentukan fasa padat dapat berlangsung dengan lebih baik. Berdasarkan hasil yang diperoleh serbuk katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2$  dengan perbandingan 30:70 memiliki warna merah yang lebih gelap dibandingkan dengan serbuk katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2$  dengan perbandingan 70:30. Hasil dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Serbuk katalis, (a)  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2$  30:70 (b)  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2$  70:30

#### 4.5 Karakterisasi struktur mikro lapis katalis $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$

Lapis katalis yang digunakan pada pembuatan elektroda  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  terdiri dari variasi karbon berupa karbon binchotan dan karbon vulcan, campuran  $\text{Cu}_2\text{O}$  dan  $\text{TiO}_2$  dengan perbandingan konsentrasi 70:30 dan 30:70 yang sudah disintering, metanol sebagai pelarut, PTFE sebagai pengikat yang membantu menyatukan partikel aktif dan pencegah banjir. Tinta yang dihasilkan dikuas pada permukaan GDL dengan arah penguasan vertikal dan horizontal secara bergantian. Hasil mikroskop lapis katalis dapat dilihat pada Gambar 12.

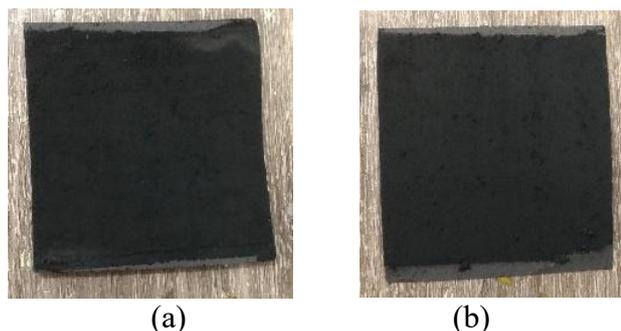


Gambar 12. Hasil pengamatan lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  menggunakan mikroskop (a)  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  Binchotan 30:70 (b)  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  Binchotan 70:30 (c)  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 30:70 (d)  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 30:70

Penyinaran menggunakan sinar laser terhadap lapis katalis (Gambar 12) dilakukan untuk mengidentifikasi adanya logam oksida pada lapis katalis. ketika lapis katalis disinari dengan laser maka logam akan merespon cahaya sinarnya yang menandakan adanya logam oksida. Berdasarkan gambar diatas terlihat retakan pada hasil mikroskop variasi karbon vulcan. Retakan sering kali disebabkan oleh berbagai factor, mulai dari tahap perancangan yang kurang tepat, ketidaksesuaian sifat material yang digunakan, kesalahan dalam proses pembuatan, hingga kondisi operasi yang terlalu kering. Retakan pada lapisan katalis difusi dapat mengurangi area kontak antara katalis dengan bahan bakar (metanol) dan oksidan (oksigen). Hal ini menghambat terjadinya reaksi kimia yang menghasilkan listrik, sehingga kinerja sel bahan bakar menurun drastis. Penurunan kinerja ini terlihat dari berkurangnya arus listrik yang dihasilkan dan daya yang dapat dihasilkan oleh DMFC. Penelitian sebelumnya membuktikan bahwa adanya retakan pada lapisan katalis justru bisa memperlambat korosi (Okonkwo & Otor, 2021).

#### **4.6 Preparasi Lapis Katalis Pt/C**

Katalis yang digunakan berupa Pt/C yang diperoleh dari *Fuel Cell Store* dengan konsentrasi logam Pt yang digunakan 20%. Pada pembuatan lapis katalis Pt/C terdiri dari logam Pt/C dengan karbon yang telah divariasikan berupa karbon binchotan dan karbon vulcan, akuades sebagai pembasah, metanol sebagai pelarut dan PTFE digunakan sebagai pengikat antara tinta dan kertas karbon, serta berfungsi untuk mencegah terjadinya banjir (Sim *et al.*, 2021). Tujuan utama menambahkan PTFE dalam jumlah yang banyak adalah untuk mempercepat penguapan air. Jika air tidak segera menguap, maka akan menghambat aliran oksigen dan menyebabkan masalah pada sel bahan bakar. Namun, jika terlalu banyak menggunakan PTFE, pori-pori yang ada pada bahan menjadi lebih sedikit dan kemampuan menghantarkan listriknya juga akan berkurang (Fu *et al.*, 2021). Selanjutnya semua bahan dicampur sehingga dihasilkan tinta katalis dan diaplikasikan kepermukaan GDL yang berukuran 4 x 4 cm menggunakan metode kuas dengan arah penguasaan vertikal dan horizontal secara bergantian. Hasil dapat dilihat pada Gambar 13.



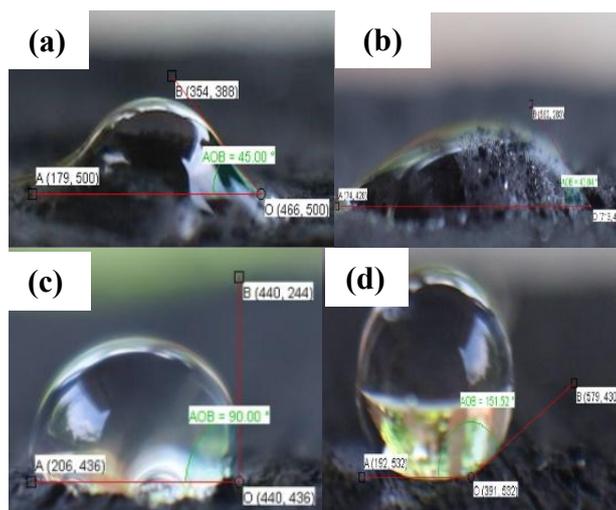
Gambar 13. Lapis katalis Pt/C 20%, (a) karbon binchotan, (b) karbon vulcan

## 4.7 Karakterisasi Lapis Katalis

### 4.7.1 Pengujian Sifat Hidrofobisitas

Efisiensi sel bahan bakar bergantung pada kemampuan molekul air untuk berpindah dari bagian dalam ke bagian luar tanpa terjebak di pori-pori lapisan GDL atau CL. Elektroda perlu memiliki sifat hidrofobik yang digunakan untuk memfasilitasi perpindahan air (Okonkwo & Otor, 2021). Pengujian sifat hidrofobisitas pada lapis katalis dengan sisi katodanya dilakukan dengan mengambil gambar melalui kamera dengan lensa mikro dan menghitung sudut kontak dari foto lengkungan cairan yang ditetesi oleh akuades pada permukaan sampel yang ditunjukkan pada Gambar 14. Suatu permukaan material yang bersifat hidrofobik memiliki sudut kontak lebih dari  $90^\circ$  (Miftahussyahro dan maharani, 2020). Selain bersifat konduktif, lapisan BL berupa *carbon paper* dan GDL pada *fuel cell* harus bersifat hidrofobik sehingga mencegah resiko terjadinya kebocoran pada elektroda (Rohendi *et al.*, 2016).

Gambar 14 menunjukkan nilai sudut kontak pada lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan dengan perbandingan 30:70 sebesar  $45^\circ$  dan nilai sudut kontak  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan 70:30 sebesar  $43,84^\circ$  yang menandakan bahwa lapis katalis tersebut masih memiliki sifat hidrofilik. Dibandingkan dengan penelitian pendahulu yang hanya menggunakan  $\text{Cu}_2\text{O}$  pada *catalyst layer*, hasil ini menunjukkan perubahan hidrofilisitas dari lapis katalis yaitu lapis katalis menjadi lebih hidrofobik. Sementara itu, lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 30:70 dihasilkan nilai sudut kontak sebesar  $90^\circ$  dan nilai sudut kontak yang dihasilkan pada lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 70:30 berupa  $151,52^\circ$  sehingga lebih memiliki sifat hidrofobik dibandingkan dengan lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan. Analisis sudut kontak menunjukkan bahwa lapisan katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan telah memenuhi kriteria sebagai lapisan pendukung.



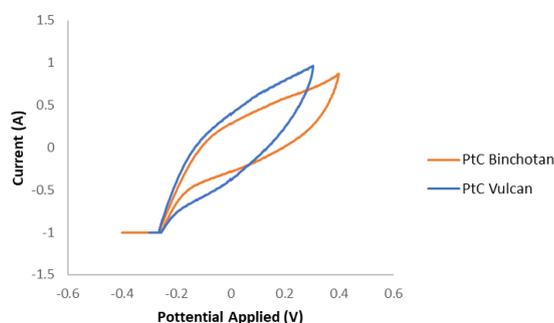
Gambar 14. Sudut kontak antara air dan permukaan lapis katalis (a)  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  30:70 (b)  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan 70:30 (c)  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 30:70 (d)  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 70:30

Perbedaan nilai sudut kontak antara jenis karbon vulcan dan karbon binchotan disebabkan perbedaan jenis karbon, sehingga mempengaruhi ukuran partikel karbon. Semakin besar ukuran partikel karbon yang dikuas permukaan kertas karbon maka semakin besar pula diameter pori yang dimiliki oleh suatu katoda. Hal ini mengakibatkan semakin kecil nilai sudut kontak yang dihasilkan (Guo *et al.*, 2020). Karbon binchotan yang digunakan memiliki ukuran partikel lebih besar dibandingkan dengan karbon vulcan sehingga karbon binchotan memiliki nilai sudut kontak yang lebih kecil dibandingkan karbon vulcan.

#### 4.7.2 Pengujian Sifat Elektrokimia Lapis Katalis dengan Metode *Cyclic Voltammetry* (CV)

Pengukuran sifat elektrokimia dengan variasi lapis katalis dilakukan menggunakan metode *cyclic voltammetry* (CV). Kurva yang dihasilkan dengan pengukuran CV berupa kurva voltammogram yang merupakan hubungan antara kerapatan arus terhadap tegangan. Terbentuknya puncak anodik (kurva atas) dan puncak katodik (kurva bawah) sebagai bentuk respon terjadinya reaksi oksidasi dan reaksi reduksi pada pengukuran CV karena adanya proses penangkapan dan pelepasan elektron pada elektroda (Yulianti *et al.*, 2019). Lapis katalis Pt/C, lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan dan vulcan dengan perbandingan 30:70 dan 70:30 diukur

menggunakan potensiostat untuk menentukan tegangan dan densitas arus pada lapisan katalis. Pengukuran sifat elektrokimia lapisan katalis dilakukan dengan metode *cyclic voltammetry* dengan *scan rate* 50 mV/s menggunakan larutan NaOH 1 M. Proses pengukuran CV ini melibatkan tiga elektroda, diantaranya elektroda kerja, elektroda pembanding, dan elektroda pembantu. Elektroda kerja dalam penelitian ini adalah elektroda Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C binchotan dan vulcan dengan perbandingan 30:70 dan 70:30, elektroda pembanding menggunakan Ag/AgCl, dan elektroda pembantu berupa batang platinum. Hasil kurva voltammogram pengukuran CV Pt/C dengan karbon bervariasi dapat dilihat pada Gambar 15.



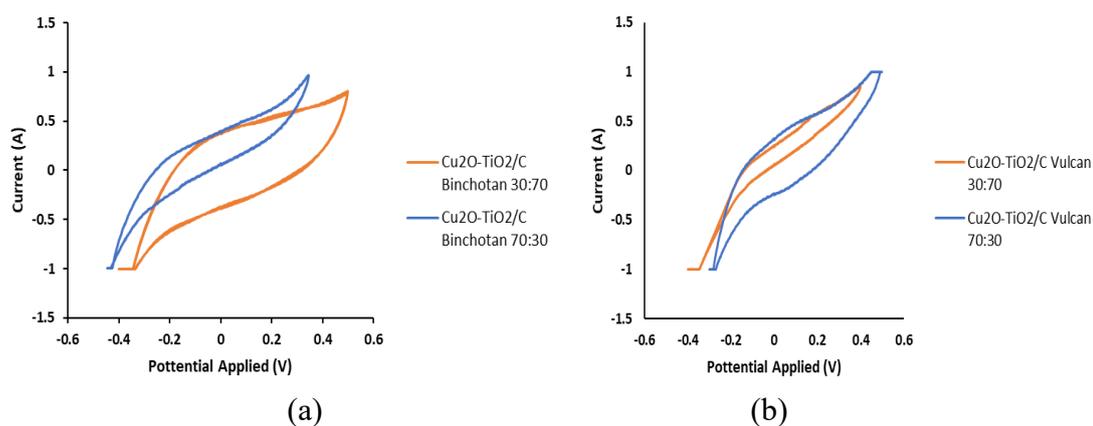
Gambar 15. Hasil CV lapis katalis Pt/C Binchotan dan vulcan

Hasil pengukuran menggunakan metode CV (Gambar 15) menunjukkan bahwa puncak katodik dan anodik tidak terlihat begitu jelas. Tetapi dapat diukur puncak anodik pada lapis katalis dengan katalis Pt/C binchotan terletak pada potensial tegangan -0.1 volt dan puncak katodiknya pada potensial tegangan 0.1 volt. Puncak anodik pada lapis katalis dengan katalis Pt/C vulcan terletak pada potensial tegangan -0.15 volt dan puncak katodik terdapat pada potensial tegangan -0.05 volt. Berdasarkan kurva voltammogram diperoleh nilai ECSA yang menunjukkan nilai ukuran luas permukaan elektroda yang aktif secara elektrokimia pada lapis katalis Pt/C dengan variasi karbon binchotan dan vulcan. Berdasarkan Tabel 3 diperoleh nilai ECSA pada Pt/C dengan variasi karbon vulcan lebih besar dibandingkan dengan Ptc variasi karbon binchotan.

Tabel 3. Nilai ECSA Pt/C binchotan dan vulcan

No.	Jenis Karbon Lapis Katalis Pt/C	Nilai ECSA (cm <sup>2</sup> /g)
1.	Binchotan	6.458033
2.	Vulcan	9.4804321

Nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA) menunjukkan jumlah situs aktif katalis yang tersedia dan terdistribusi dalam matriks karbon pada permukaan *Gas Diffusion Layer* (GDL). Situs aktif ini merupakan area di mana reaksi elektrokimia terjadi, seperti oksidasi atau reduksi. Semakin tinggi nilai ECSA, semakin besar jumlah situs aktif yang tersedia untuk reaksi, yang menunjukkan kinerja katalis dalam proses elektrokimia dapat meningkat. Distribusi katalis dalam matriks karbon pada GDL juga mempengaruhi efisiensi transfer massa dan elektron, serta stabilitas keseluruhan dari sistem elektrokimia tersebut (Hawa Yulianti *et al.*, 2019). Berdasarkan kurva pada Gambar 15 diketahui bahwa pada jenis lapis katalis Pt/C vulcan memiliki nilai ECSA lebih besar yaitu  $9.4804321 \text{ cm}^2/\text{g}$  dibandingkan dengan Pt/C karbon binchotan dengan nilai ECSA  $6.458033 \text{ cm}^2/\text{g}$ . *Range* puncak katodik dan anodik kurva voltammogram lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan dan lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan dengan persentasi 30:70 dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Hasil CV lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$ , (a) lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan 30:70 dan 70:30 (b) Hasil CV lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 30:70 dan 70:30

Adanya variasi GDL jenis karbon dan konsentrasi logam pada katalis yang digunakan menyebabkan hasil pengukuran yang berbeda-beda pada setiap lapis katalis. Puncak anodik pada lapis katalis dengan katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan 30:70 terletak pada potensial tegangan -0.05 volt dan puncak katodik terletak pada potensial tegangan 0.25 volt. Sedangkan Puncak anodik pada lapis katalis dengan katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan dengan persentasi 70:30 terletak pada tegangan potensial -0.2 volt dan puncak katodik tidak terlihat jelas. Puncak anodik pada lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$

vulcan 30:70 terletak pada tegangan potensial -0.15 Volt dan 0.17 volt sedangkan puncak katodik tidak terlihat jelas. Puncak anodik pada lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 70:30 terletak pada tegangan potensial -0.12 volt dan puncak katodik terletak pada tegangan potensial 0.08 volt. Nilai Nilai ECSA lapis katalis dengan variasi persentase lapis katalis dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai ECSA dengan variasi lapis katalis

No	Lapis Katalis $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$		Nilai ECSA ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
	Jenis karbon	Persentase katalis	
1	Binchotan	30:70	6.510059
2	Binchotan	70:30	6.35721
3	Vulcan	30:70	7.344437
4	Vulcan	70:30	6.902189

Berdasarkan Tabel 4 diperoleh nilai ECSA yang menunjukkan adanya aktivitas katalitik lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan dan  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan dengan perbandingan 30:70 dan 70:30. Nilai ECSA diperoleh dari perhitungan ECSA. Contoh perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 3. Berdasarkan Tabel 4, diperoleh nilai ECSA tertinggi dihasilkan oleh lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan dengan perbandingan 30:70 sebesar 7.344437  $\text{cm}^2/\text{g}$  dan nilai ECSA terendah diperoleh pada lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan dengan perbandingan 70:30 sebesar 6.35721  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Perbedaan nilai ECSA yang diperoleh disebabkan pada perbedaan ukuran partikel katalis yang digunakan (Zhang *et al.*, 2022). Dibandingkan dengan karbon binchotan, karbon vulcan memiliki area permukaan yang lebih luas dan partikel yang lebih halus. Ukuran partikel yang meningkat berkorelasi dengan penurunan nilai ECSA. Selain itu, distribusi katalis yang tidak seragam pada permukaan GDL juga berkontribusi pada penurunan ECSA (Yusof *et al.*, 2019).

#### 4.7.3 Pengujian Sifat Elektrokimia Lapis Katalis dengan Metode *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

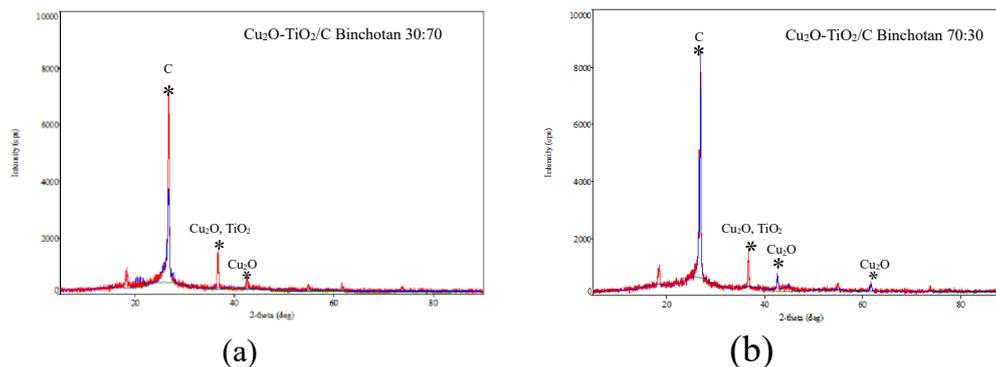
Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda dengan Metode *Scanning Electron Microscopy* (SEM) bertujuan untuk menganalisis morfologi permukaan elektroda dengan tingkat resolusi yang tinggi dan untuk mengetahui sebaran dari bahan yang



Hasil karakterisasi SEM lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 30:70 (Gambar 18) menunjukkan bahwa terdapat beberapa morfologi yaitu morfologi pertama yang terlihat jelas berupa sferik. Terdapat morfologi monolit dengan pori-pori. Morfologi sferik merupakan kumpulan partikel  $\text{Cu}_2\text{O}$  (merah muda). Bentuknya yang relatif bulat mengindikasikan pertumbuhan kristal yang lebih bebas. Dapat dilihat juga bahwa partikel berwarna kuning menandakan adanya unsur karbon pada elektroda, partikel berwarna *orange* menandakan unsur flourin yang berasal dari PTFE. *PolyTetraFluoroEthylene* (PTFE) merupakan polimer dengan struktur molekul yang teratur sebagian dan memiliki ukuran molekul yang besar (Sheldon *et al.*, 2023). Partikel berwarna ungu menandakan unsur oksida yang berasal dari logam, partikel berwarna merah menandakan adanya unsur Cu, dan terakhir partikel berwarna hijau menandakan adanya unsur sulfur yang berasal dari  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Berdasarkan Gambar 19 dapat dilihat bahwa  $\text{TiO}_2$  menempel dan menyebar pada permukaan karbon. Karbon dapat menghalangi penumpukan yang terjadi pada sesama partikel  $\text{TiO}_2$ , terhalangnya penumpukan partikel  $\text{TiO}_2$  ini diasumsikan akan menyebabkan luas permukaan partikel  $\text{TiO}_2$  semakin besar, yang nantinya akan meningkatkan aktivitas fotokatalitik  $\text{TiO}_2$  (Septiani dkk., 2015).

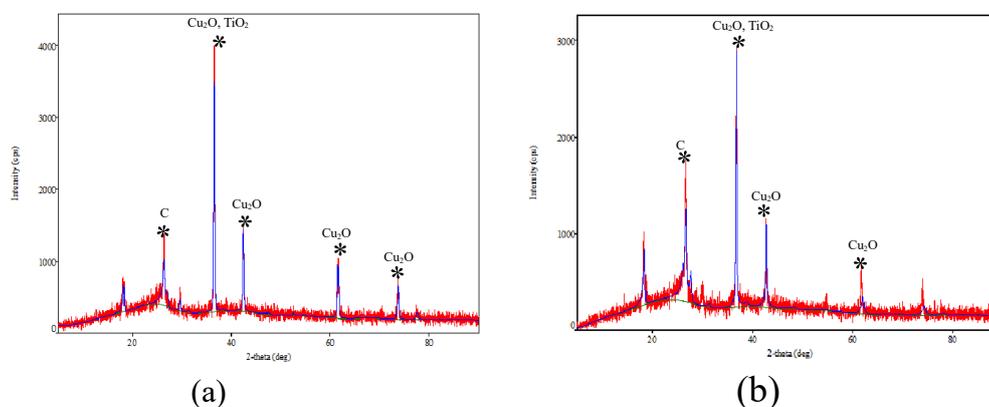
#### **4.7.4 Pengujian Sifat Elektrokimia Lapis Katalis dengan Metode *X-Ray Diffraction* (XRD)**

Pengujian Sifat Elektrokimia lapis katalis dengan Metode *X-Ray Diffraction* (XRD) bertujuan untuk mengidentifikasi struktur kristal suatu material memberikan data mengenai struktur kristal, parameter kisi kristal, ukuran butir kristal, serta jenis struktur kristal (Hartiningsih, 2023). Analisis XRD dapat menentukan keberadaan partikel unsur atau senyawa dan dapat mengukur sudut difraksi pada posisi  $2\theta$  serta bentuk dan intensitas puncak pada difraktogram (Yulianti *et al.*, 2019). Hasil pengukuran XRD dari lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan dengan perbandingan 30:70 dan 70:30 dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19. hasil karakterisasi XRD lapis katalis karbon binchotan, (a) lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan 30:70 b) lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan 70:30

Berdasarkan Gambar 19 diperoleh hasil pengukuran XRD elektroda  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan dengan persentase 30:70 dan 70:30 dengan metode semburan, menunjukkan pola difraksi dari unsur tersebut. Data puncak difraksi yang diperoleh dibandingkan dengan JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standard*) atau ICCD (*Integrated Circuit Card Identifier*). Data puncak difraksi yang diperoleh pada lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan dengan persentase 30:70 berada pada posisi  $2\theta = 26.8^\circ, 36.66^\circ$  dan  $42.56^\circ$ . Data puncak difraksi yang diperoleh elektroda  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan dengan persentase 30:70 pada posisi  $2\theta = 26.86^\circ, 36.66^\circ, 42.56^\circ$  dan  $61.66^\circ$ . Puncak difraksi unsur  $\text{TiO}_2$  pada posisi  $2\theta$  berada pada  $36.07^\circ$  sesuai dengan Rutile JCPDS *Card No.* 21-1276 (Rajaramanan *et al.*, 2021). Puncak difraksi unsur karbon pada posisi  $2\theta$  berada pada  $26^\circ$  sesuai dengan JCPDS *reference no.* 00-001-0640 (Patel *et al.*, 2021). Puncak difraksi unsur  $\text{Cu}_2\text{O}$  pada posisi  $2\theta$  berada pada  $36.33^\circ, 42.21^\circ$  dan  $61.29^\circ$  sesuai dengan ICDD no. 01-071-3645 (Budi *et al.*, 2023).



Gambar 20. Hasil karakterisasi XRD lapis katalis karbon Vulcan, (a) lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 30:70 (b) lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 70:30

Gambar 20 menunjukkan hasil pengukuran XRD elektroda  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan dengan persentase 30:70 dan 70:30 dengan metode semburan menunjukkan pola difraksi dari unsur tersebut. Data puncak difraksi yang diperoleh dibandingkan dengan JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*) atau ICDD (*International Centre for Diffraction Data*). Data puncak difraksi yang diperoleh (a) lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan dengan persentase 30:70 pada posisi  $2\theta = 26.48^\circ$ ,  $36.62^\circ$ ,  $42.4^\circ$ ,  $61.54^\circ$ , dan  $73.66^\circ$ . Data puncak difraksi yang diperoleh (b) lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan dengan persentase 70:30 pada posisi  $2\theta = 26.74^\circ$ ,  $36.86^\circ$ ,  $42.74^\circ$ , dan  $61.8$ . Puncak difraksi karbon pada posisi  $2\theta$  berada pada  $26^\circ$  sesuai dengan JCPDS *reference* no. 00-002-0456 (Patel *et al.*, 2021). Puncak difraksi  $\text{TiO}_2$  pada posisi  $2\theta = 36.07^\circ$  sesuai dengan Rutile JCPDS Card No. 21-1276 (Rajaramanan *et al.*, 2021). (JCPDS No. 84-1286). Puncak difraksi  $\text{Cu}_2\text{O}$  pada posisi  $2\theta$  berada pada  $36.33^\circ$ ,  $42.21^\circ$  dan  $61.29^\circ$ ,  $73^\circ$  sesuai dengan ICDD no. 01-071-3645 (Budi *et al.*, 2023). Ukuran kristal sangat mempengaruhi sifat fisik material. Kristal yang berukuran lebih kecil menghasilkan partikel yang lebih halus dan luas permukaan yang lebih besar. Hal ini dapat memberikan dampak signifikan pada berbagai sifat seperti reaktivitas dan sifat katalitik (Rohendi *et al.*, 2023).

#### 4.8 Uji Kinerja Membran Berbasis Binchotan

Pengujian kinerja MEA pada DMFC dilakukan dengan variasi konsentrasi metanol 5%, 10%, 15% dan 20% sebagai bahan bakar *fuel cell* yang masing-masing diuji dengan beban variasi 100 mA, 200 mA, 300 mA, 400 mA, 500 mA dan 600 mA.

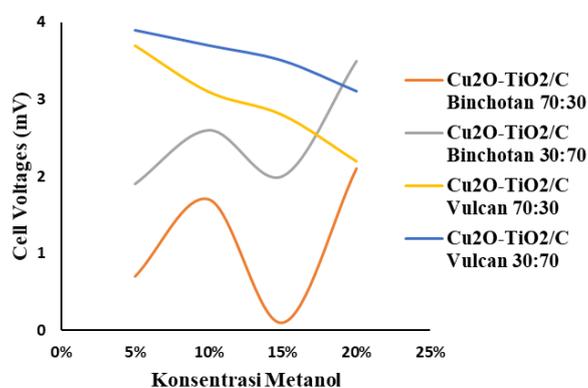
##### 4.8.1 Pengukuran Nilai *Open Circuit Voltage* (OCV)

Tegangan awal yang muncul tanpa adanya beba, yang dikenal sebagai OCV, diukur pada berbagai konsentrasi metanol untuk mengevaluasi kinerja MEA (Yulianti *et al.*, 2019). Kinerja MEA berbanding lurus dengan nilai OCV yang dihasilkan; semakin tinggi OCV, semakin optimal performa MEA (Rohendi *et al.*, 2019). Data hasil pengukuran kinerja arus terhadap tegangan MEA pada kondisi OCV dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Nilai OCV MEA dengan variasi persentase lapis katalis

No.	Persentasi Metanol	OCV (mV)			
		Cu <sub>2</sub> O-TiO <sub>2</sub> /C Binchotan 30:70	Cu <sub>2</sub> O-TiO <sub>2</sub> /C Binchotan 70:30	Cu <sub>2</sub> O-TiO <sub>2</sub> /C Vulcan 30:70	Cu <sub>2</sub> O-TiO <sub>2</sub> /C Vulcan 30:70
1.	5%	1,9	0,7	3,9	3,7
2.	10%	2,6	1,7	3,7	3,1
3.	15%	2,0	0,1	3,5	2,8
4.	20%	3,5	2,1	3,1	2,2

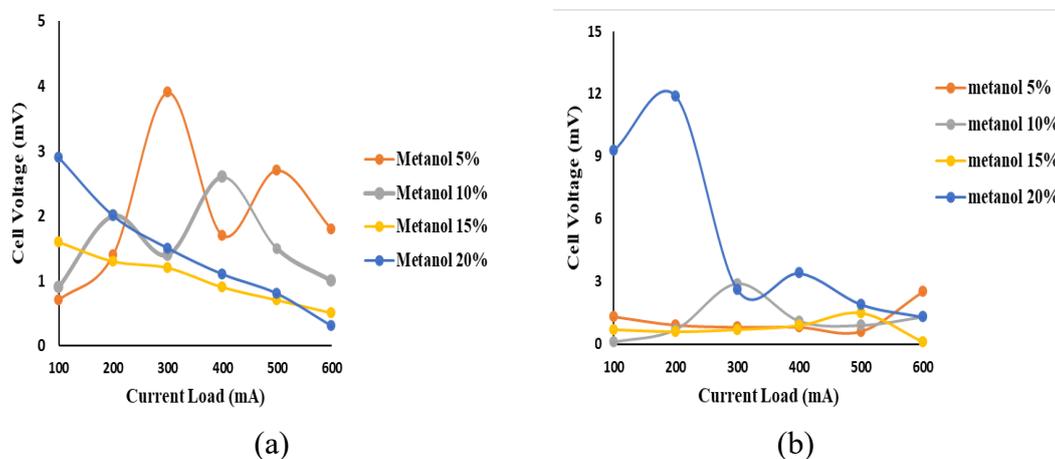
Data hasil pada Tabel 5 berupa nilai *Open Circuit Voltage* (OCV). Nilai OCV tertinggi dihasilkan oleh MEA dengan katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C vulcan 30:70 dengan persentase metanol 5% sebesar 3,5 mV dan nilai OCV terkecil didapatkan pada MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C binchotan 30:70 dengan persentase metanol 15% sebesar 0,1 mV. Secara umum MEA dengan katalis berbasis vulcan cenderung menghasilkan nilai OCV yang lebih tinggi dibandingkan dengan katalis berbasis binchotan. Hal ini mengindikasikan bahwa katalis vulcan lebih efektif dalam menghasilkan reaksi reduksi dan oksidasi pada sel bahan bakar. Variasi perbandingan katalis mempengaruhi perbedaan nilai OCV. Perbandingan 30:70 cenderung menghasilkan nilai OCV lebih tinggi dibandingkan dengan persentasi 70:30. Selain itu, Peningkatan konsentrasi metanol dapat menyebabkan fluktuasi atau ketidakstabilan pada nilai OCV sel bahan bakar. Hal ini disebabkan karena beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja sel bahan bakar salah satunya seperti kelebihan metanol yang menyebabkan matriks katoda dibanjiri oleh air, dimana air ini bukan berasal dari luar melainkan dari reaksi antara metanol dengan oksigen (O<sub>2</sub>) di dalam sel bahan bakar.

Gambar 21. Grafik OCV MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C

Grafik OCV (Gambar 21) menunjukkan bahwa terjadi peningkatan nilai OCV pada MEA dengan katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan 30:70. Sementara itu, pada MEA dengan katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan dengan perbandingan 30:70 dan 30:70 mengalami penurunan nilai OCV seiring bertambahnya konsentrasi metanol. Nilai OCV tertinggi terdapat pada MEA dengan katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 70:30 mencapai 3,7 mV pada konsentrasi metanol 5% dan nilai OCV paling rendah terdapat pada MEA dengan katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan 70:30 sebesar 0,1 mV pada konsentrasi metanol 15%. Konsentrasi metanol yang disuplay pada DMFC berpengaruh terhadap perpindahan laju metanol dari anoda ke katoda.

#### 4.8.2 Pengujian Kinerja MEA pada Beban Bervariasi

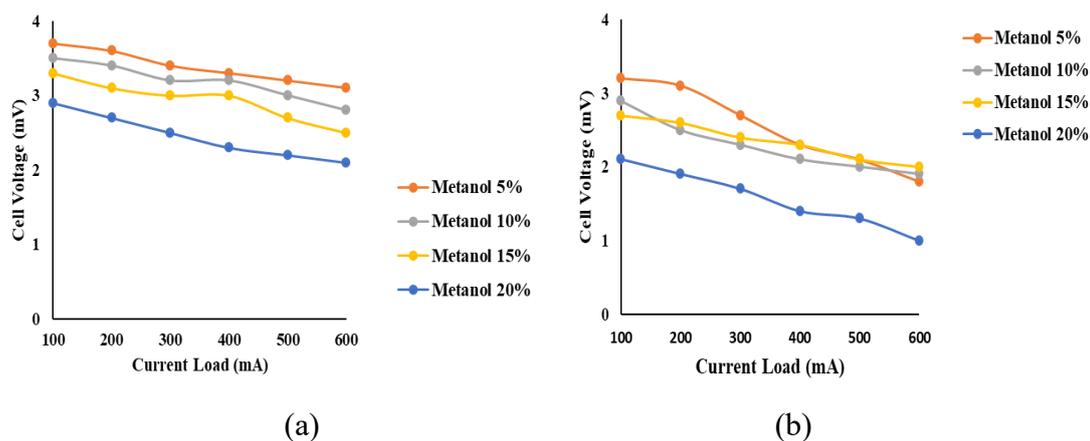
Pengujian MEA pada DMFC dilakukan dengan penambahan beban bervariasi diantaranya 100 mA, 200 mA, 300 mA, 400 mA, 500 mA dan 600 mA. Pengujian MEA dengan penambahan beban ini bertujuan untuk melihat ketahanan MEA pada berbagai konsentrasi metanol. Hasil uji kinerja MEA dengan beban bervariasi dapat dilihat pada Gambar 23.



Gambar 22. Grafik hubungan antara beban bervariasi dengan tegangan potensial, (a) MEA  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  Binchotan 30:70 (b) MEA  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  Binchotan 70:30

Grafik pada Gambar 22 menunjukkan bahwa penambahan beban mempengaruhi tegangan potensial dimana semakin tinggi beban maka tegangan potensial semakin menurun. Namun, penambahan beban juga akan meningkatkan daya keluaran DMFC hingga mencapai nilai maksimum. Setelah nilai maksimum tercapai, penambahan beban selanjutnya akan menyebabkan penurunan daya. Semakin tinggi tegangan

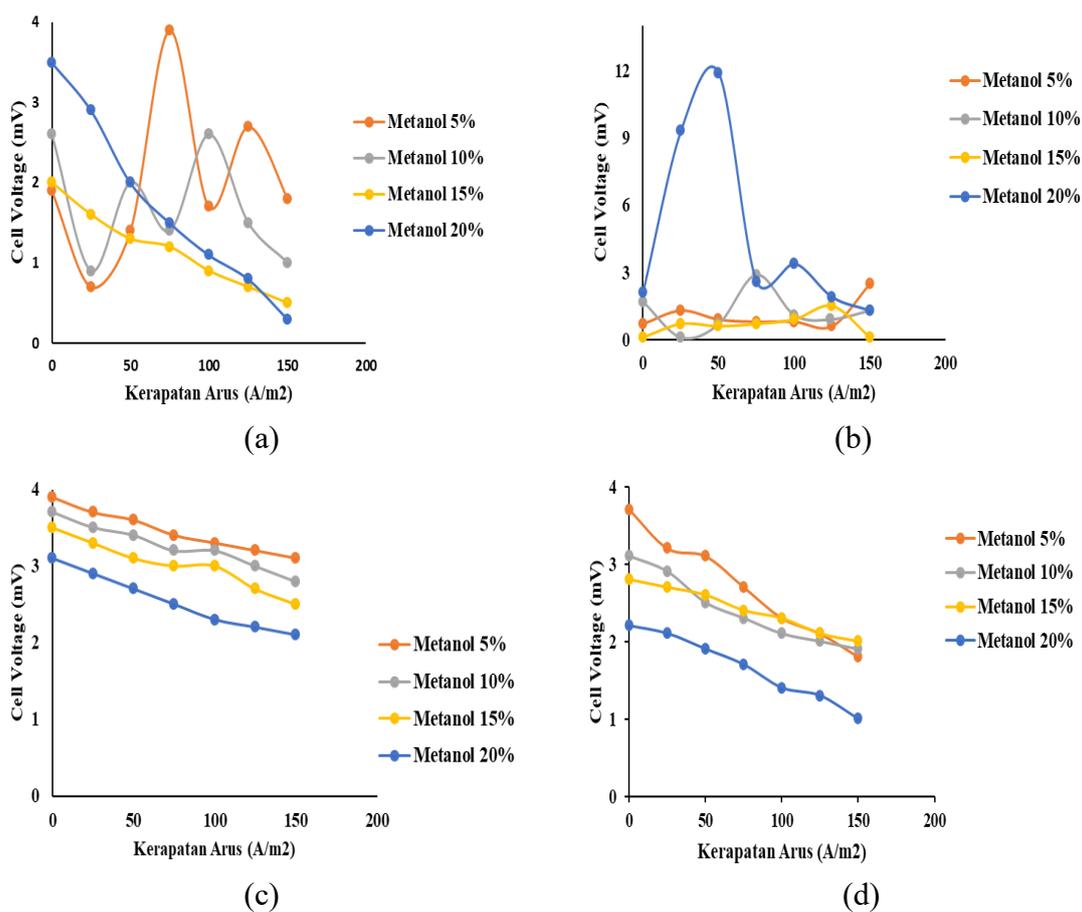
potensial, semakin besar energi listrik yang dapat dihasilkan. Namun, tegangan potensial yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada komponen sel bahan bakar. Berdasarkan Gambar 22, uji kinerja yang memiliki penurunan cukup stabil terdapat pada MEA dengan lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan 30:70 dengan konsentrasi metanol 20 % dimana penurunan tegangan potensial yang cukup baik seiring bertambahnya beban, namun pada metanol dengan konsentrasi 5% diperoleh tegangan yang tidak stabil terhadap penambahan beban. MEA dengan lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan 70:30 pada konsentrasi 15% terlihat menghasilkan tegangan yang rendah akan tetapi berdasarkan grafik yang diperoleh hasil ini cukup stabil dibandingkan dengan konsentrasi metanol lainnya. Hasil pengujian CCV pada MEA dengan lapis katalis  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan terlihat mengalami fluktuasi karena gugus fungsi pada karbon binchotan bersifat hidrofilik, dimana hidrofilik memiliki atom dengan elektronegativitas tinggi.



Gambar 23. Grafik hubungan antara beban bervariasi dengan tegangan potensial, (a) MEA  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 30:70 (b) MEA  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan 70:30

Grafik pada gambar 23 menunjukkan kinerja MEA  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan dengan perbandingan 30:70 memperoleh stabilitas terbaik pada konsentrasi metanol 5% dimana pada konsentrasi ini diperoleh penurunan tegangan yang stabil dengan bertambahnya beban. Sementara itu, kinerja MEA  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan dengan perbandingan 70:30 juga relatif stabil pada metanol dengan konsentrasi 5% dimana penurunannya stabil seiring bertambahnya beban. Berdasarkan data yang diperoleh, hasil uji kinerja MEA dengan variasi karbon vulcan menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan MEA yang menggunakan variasi karbon binchotan.

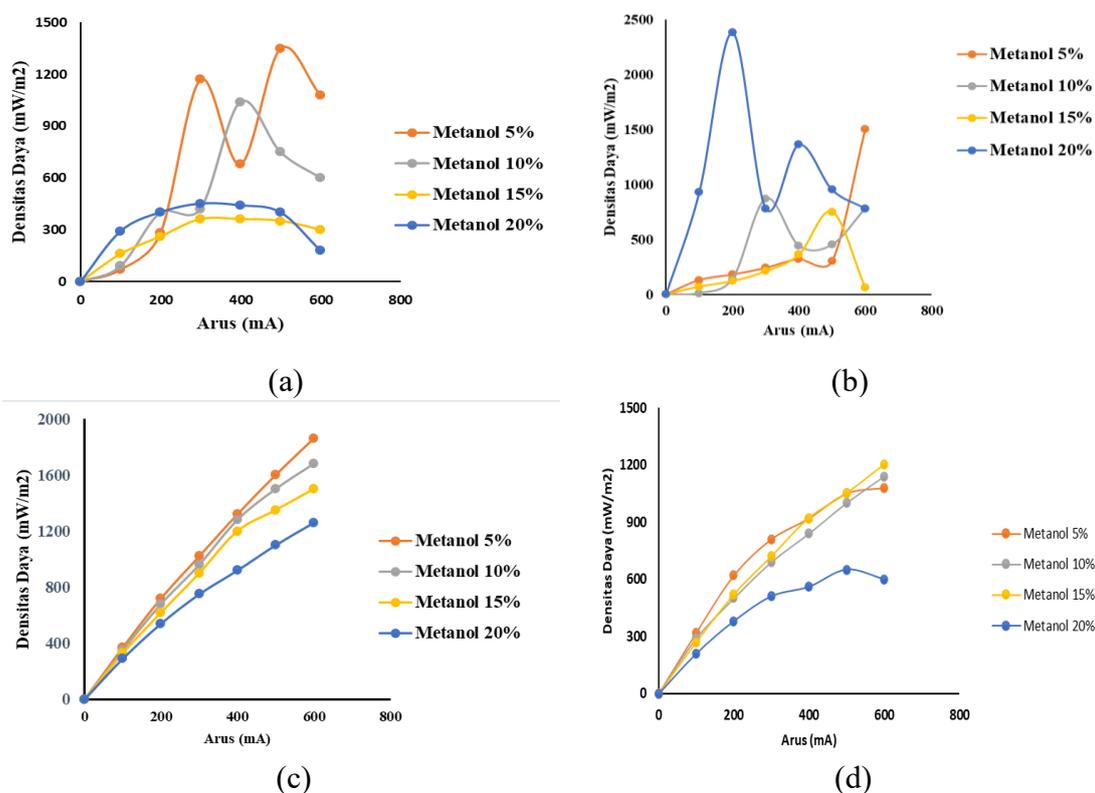
Kinerja MEA juga dapat dianalisis melalui kurva polarisasi. Kurva polarisasi terdiri dari I-V dan I-P. Kurva I-V merupakan hasil pembagian dari arus yang dihasilkan dengan luas permukaan elektroda dimana kurva ini menunjukkan hubungan antara kerapatan arus dan tegangan sedangkan kurva I-P menunjukkan hubungan antara arus dan densitas daya. Setiap garis pada grafik mewakili data untuk konsentrasi metanol yang berbeda, yaitu 5%, 10%, 15%, dan 20%. Kurva I-V dapat dilihat pada Gambar 24.



Gambar 24. Kurva I-V, (a) MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C Binchotan 30:70 (b) MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C Binchotan 70:30 (c) MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C vulcan 30:70 (d) MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C vulcan 70:30

Hasil yang diperoleh (Gambar 24) secara umum menunjukkan bahwa tegangan potensial cenderung menurun seiring dengan meningkatnya kerapatan arus untuk semua konsentrasi metanol. Fenomena ini merupakan hal yang umum terjadi dalam sel bahan bakar, di mana peningkatan beban (ditandai dengan peningkatan kerapatan arus) menyebabkan penurunan tegangan output. Grafik (a) pada konsentrasi 20% memiliki

penurunan tegangan stabil dengan bertambahnya kerapatan arus. Secara keseluruhan, konsentrasi metanol 5% dan 10% menunjukkan kinerja yang hampir sama dimana terjadi penurunan setelah mencapai puncak. Grafik (b) Konsentrasi metanol 5% memiliki tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan konsentrasi lainnya dan menunjukkan penurunan tegangan yang lebih stabil seiring dengan bertambahnya kerapatan arus. Kurva konsentrasi metanol 10%, 15% dan 20% menunjukkan penurunan tegangan setelah mencapai puncaknya. Grafik (c) dan (d) memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan dengan MEA yang menggunakan karbon binchotan. MEA dengan jenis karbon vulcan memiliki kemampuan mempertahankan tegangan lebih baik dibandingkan dengan jenis karbon binchotan serta mengalami penurunan tegangan yang stabil seiring bertambahnya kerapatan arus dan penambahan konsentrasi metanol. Penurunan yang tidak stabil pada jenis karbon binchotan disebabkan karena kurangnya sifat hidrofobik yang dimiliki oleh bahan yang digunakan.



Gambar 25. Kurva I-P, (a) MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C Binchotan 30:70 (b) MEA Cu<sub>2</sub>O-Binchotan 70:30 (c) MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C vulcan 30:70 (d) MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C vulcan70:30

Daya merupakan hasil perkalian antara tegangan dan kerapatan arus yang diperoleh (Binilang *et al.*, 2017). Daya yang dihasilkan akan sebanding dengan arus yang mengalir. MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C binchotan memperoleh daya tertinggi sebesar 1350 mW/cm<sup>2</sup> dihasilkan pada perbandingan 30:70 dengan konsentrasi metanol 5% tetapi tidak menghasilkan kenaikan yang stabil. Konsentrasi metanol 5% pada perbandingan 70:30 memiliki hasil kenaikan seiring bertambahnya arus dibandingkan dengan konsentrasi metanol lainnya. MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C vulcan memiliki daya tertinggi dihasilkan oleh perbandingan 70:30 dengan konsentrasi metanol 20% sebesar 2380 mW/cm<sup>2</sup>. Karbon vulcan memiliki hasil yang lebih stabil karena memperoleh kenaikan yang stabil dibandingkan dengan jenis karbon binchotan (Gambar 25). Kemampuan MEA dalam mempertahankan daya dipengaruhi oleh nilai konduktivitas dan aktivitas katalitiknya (Ye *et al.*, 2014). Ketika MEA disuplai dengan metanol berkonsentrasi rendah, kerapatan arus meningkat, maka densitas daya yang dihasilkan juga meningkat. Namun, saat konsentrasi metanol melebihi tingkat optimum, nilai tegangan dan kerapatan arus menurun, mengakibatkan penurunan densitas daya akibat terjadinya *crossover* metanol. *Crossover* ini dapat menyebabkan pembentukan metanol-oksida di katoda, yang menurunkan kinerja MEA. Penumpukan metanol yang signifikan pada lapisan katoda akibat *crossover* mengurangi ketersediaan oksigen. Efek negatif ini menyebabkan penurunan densitas daya setelah peningkatan konsentrasi metanol, sehingga kinerja MEA menurun karena metanol teroksidasi di katoda sehingga menghasilkan produk samping yang dapat menghambat kinerja sel bahan bakar dan mempercepat kerusakan membran (Ozden *et al.*, 2017).

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengukuran luas permukaan elektroda aktif (ECSA) menunjukkan bahwa GDL dengan karbon vulcan memiliki nilai ECSA sebesar 2,212174 cm<sup>2</sup>/g dan nilai ECSA karbon binchotan sebesar 3,525098 cm<sup>2</sup>/g.
2. Hasil pengujian hidrofobisitas pada karbon binchotan masih bersifat hidrofilik dan belum memenuhi standar, dengan nilai sudut kontak sebesar 45° dan 43,84°. Berdasarkan analisa CV menunjukkan nilai ECSA pada lapis katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C binchotan dengan perbandingan 30:70 memiliki nilai ECSA lebih tinggi dibandingkan dengan lapis katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C binchotan 70:30. Hasil pengamatan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa morfologi elektroda Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C binchotan memiliki dua fasa yang jelas. Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa puncak difraksi yang dihasilkan dari lapisan katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C binchotan dengan perbandingan 30:70 dan 70:30 terdeteksi pada posisi 2θ, yaitu 18,32°, 26,8°, 36,66°, 42,56°, dan 73,66°.
3. Secara umum tegangan berkurang seiring bertambahnya beban dan konsentrasi metanol tetapi terdapat penurunan yang paling stabil pada MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C vulcan 30:70 pada konsentarsi metanol 5% dengan tegangan awal 1,9 mV.

#### 5.2 Saran

Perlu dilakukan pengaplikasian tinta karbon untuk GDL dan CL menggunakan metode lain untuk mendapatkan metode terbaik, dan perlu dilakukannya variasi konsentrasi katalis lain untuk melihat perbandingan hasil yang diperoleh.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, H., Kuo, D., & Chen, Y. (2018). High-Efficient N-Type TiO<sub>2</sub>/P-Type Cu<sub>2</sub> Nanodiode Photocatalyst To Detoxify Hexavalent Chromium Under Visible Light Irradiation. *Journal of Materials Science, April*. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0096-0>
- 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, 176–177*, 709–717. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.04.055>
- Almomani, F., Al-Rababah, A., Tawalbeh, M., & Al-Othman, A. (2023). A Comprehensive Review Of Hydrogen Generation By Water Splitting Using 2D Nanomaterials: Photo Vs Electro-Catalysis. *Fuel, 332(P1)*, 125905. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.12590>
- Alshammari, M., Alhassan, S., Alshammari, K., Alotaibi, T., Taha, T. A. M., Alshammari, A. H., & Ismael, A. (2023). Synthesis of CaCO<sub>3</sub>/Cu<sub>2</sub>O/GO Nanocomposite Catalysts for Hydrogen Production from NaBH<sub>4</sub> Methanolysis. *Catalysts, 13(6)*. <https://doi.org/10.3390/catal13061010>
- 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 and Catalysis, 10(2)*, 169–174. <https://doi.org/10.9767/bcrec.10.2.7984.169-174>
- Báder, M., Németh, R., Sandak, J., & Sandak, A. (2020). FTIR Analysis Of Chemical Changes In Wood Induced By Steaming And Longitudinal Compression. *Cellulose, 27(12)*, 6811–6829. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03131-8>
- Baroutaji, A., Carton, J. G., Sajjia, M., & Olabi, A. G. (2015). *Materials Science And Materials Engineering Materials In Pem Fuel Cells*. 1–30.B
- Baruah, B., & Deb, P. (2021). Performance And Application Of Carbon-Based Electrocatalysts In Direct Methanol Fuel Cell. *Materials Advances, 2(16)*, 5344–5364. <https://doi.org/10.1039/d1ma00503k>
- Binilang, R. B., Tumaliang, H., Lisi, F., & Elektro-ft, J. T. (2017). Studi Analisa Rugi Daya Pada Saluran Distribusi Primer 20 Kv Di Kota Tahuna. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer, 6(2)*, 69–78.
- Budi, S., Takahashi, M., Sutrisno, M. G., Adi, W. A., Fairuza, Z., Kurniawan, B., Maenosono, S., & Umar, A. A. (2023). Phases Evolution And Photocatalytic Activity Of Cu<sub>2</sub>O Films Electrodeposited From A Non-Ph-Adjusted Solution. *Royal Society Open Science, 10(6)*. <https://doi.org/10.1098/rsos.230247>
- Cheng, N., Stambula, S., Wang, D., Banis, M. N., Liu, J., Riese, A., Xiao, B., Li, R., Sham, T. K., Liu, L. M., Botton, G. A., & Sun, X. (2016). Platinum Single-Atom And Cluster Catalysis Of The Hydrogen Evolution Reaction. *Nature Communications, 7*, 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms13638>
- Chia, C. H., Joseph, S. D., Rawal, A., Linser, R., Hook, J. M., & Munroe, P. (2014)

- Microstructural Characterization Of White Charcoal. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 109 (July 2012), 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.06.009>
- Elezovic, N. R., Radmilovic, V. R., & Krstajic, N. V. (2016). Platinum Nanocatalysts On Metal Oxide Based Supports For Low Temperature Fuel Cell Applications. *RSC Advances*, 6(8), 6788–6801. <https://doi.org/10.1039/c5ra22403a>
- Fathi, A. M., Mandour, H. S., & Hassane Anouar, E. (2021). Characteristics Of Multidentate Schiff Base Ligand And Its Complexes Using Cyclic Voltammetry, Fluorescence, Antimicrobial Behavior And DFT-Calculations. *Journal of Molecular Structure*, 1224, 129263. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129263>
- Fatimah, N., & Utami, B. (2017). Sintesis dan Analisis Spektra IR, Difraktogram XRD, SEM pada Material Katalis Berbahan Ni/zeolit Alam Teraktivasi dengan Metode Impregnasi. *JC-T (Journal Cis-Trans): Jurnal Kimia Dan Terapannya*, 1(1), 35–39. <https://doi.org/10.17977/um026v1i12017p035>
- Froning, D., Reimer, U., & Lehnert, W. (2021). Inhomogeneous Distribution of Polytetrafluorethylene in Gas Diffusion Layers of Polymer Electrolyte Fuel Cells. *Transport in Porous Media*, 136(3), 843–862. <https://doi.org/10.1007/s11242-021-01542-0>
- Fu, X., Ni, H., Zhang, F., Yang, Y., Shao, X., Huang, Z., Zhang, R., Liu, Q., & Hu, S. (2021). Polypyrrole Nanowires As A Cathode Microporous Layer For Direct Methanol Fuel Cell To Enhance Oxygen Transport. *International Journal of Energy Research*, 45(2), 3375–3384. <https://doi.org/10.1002/er.5976>
- Gong, Y., Chen, X., & Wu, W. (2024). Application Of Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy In Sample Preparation: Material Characterization And Mechanism Investigation. *Advances in Sample Preparation*, 11(June), 100122. <https://doi.org/10.1016/j.sampre.2024.100122>
- Hartiningsih, E. (2023). *Identifikasi Jenis Mineral Industri Dengan Xrd Pada Sampel Batupasir Formasi Ekmai, Distrik Ertsberg, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua Tengah*. 2(2).
- Hakim, A. R. (2018). Pengaruh Kadar Clay dalam Sulfonasi Polieter-Eter Ketone ( sPEEK ) terhadap Permeabilitas Methanol melalui Membran Direct Methanol Fuel Cell Effect of Clay Content in Sulfonated Poly-Ether – Ether Ketone ( sPEEK ) on Methanol Permeability via Direct Metha. *Eksergi*, 15(1), 9–15.
- Hawa Yulianti, D., 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>
- Hindryawati, N. 2020. Fotokatalis Dalam Pengolahan Limbah Tekstil. Deepublish: Yogyakarta
- Hossain, S., & Ahmed, S. (2023). *FTIR Spectrum Analysis To Predict The Crystalline And Amorphous Phases Of Hydroxyapatite : A Comparison Of Vibrational Motion To Re Fl*

- Ection* †. 14625–14630. <https://doi.org/10.1039/d3ra02580b>
- Juliantoni, Y., Hajrin, W., & Subaidah, W. A. (2020). Nanoparticle Formula Optimization of Juwet Seeds Extract (*Syzygium cumini*) using Simplex Lattice Design Method. *Jurnal Biologi Tropis*, 20(3), 416–422. <https://doi.org/10.29303/jbt.v20i3.2124>
- Kamsuwan, T., Guntida, A., Prasertthdam, P., & Jongsomjit, B. (2022). Differences in Deterioration Behaviors of Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts with Different Cu Contents toward Hydrogenation of CO and CO<sub>2</sub>. *ACS Omega*, 7(29), 25783–25797. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03068>
- Karim, N. A., Kamarudin, S. K., & Loh, K. S. (2017). Performance Of A Novel Non-Platinum Cathode Catalyst For Direct Methanol Fuel Cells. *Energy Conversion and Management*, 145, 293–307. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.003>
- Karmakar, S. (2019). Particle Size Distribution and Zeta Potential Based on Dynamic Light Scattering: Techniques to Characterise Stability and Surface distribution of Charged Colloids Studies on the interaction of antimicrobial peptide with phospholipid membranes. View projec. *Recent Trends in Materials: Physics and Chemistry, January*. <https://www.researchgate.net/publication/328577330>
- Kaur, A., Kaur, G., Singh, P. P., & Kaushal, S. (2021). Supported Bimetallic Nanoparticles As Anode Catalysts For Direct Methanol Fuel Cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(29), 15820–15849. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.037>
- Kumar, S. S., Ramakrishna, S. U. B., Rama Devi, B., & Himabindu, V. (2018). Phosphorus-Doped Carbon Nanoparticles Supported Palladium Electrocatalyst For The Hydrogen Evolution Reaction (HER) In PEM Water Electrolysis. *Ionics*, 24(10), 3113–3121. <https://doi.org/10.1007/s11581-018-2471-0>
- Kwon, H. C., Kim, M., Grote, J. P., Cho, S. J., Chung, M. W., Kim, H., Won, D. H., Zeradjanin, A. R., Mayrhofer, K. J. J., Choi, M., Kim, H., & Choi, C. H. (2018). Carbon Monoxide as a Promoter of Atomically Dispersed Platinum Catalyst in Electrochemical Hydrogen Evolution Reaction. *Journal of the American Chemical Society*, 140(47), 16198–16205. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b09211>
- Lediliocza, L., Saptari, S. A., & Priyono, S. (2020). Sintesis dan Karakterisasi Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> yang Dilapisi Karbon dengan Metode Solid State Reaction untuk Anoda Ion Lithium. *Al-Fiziya: Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation and Theoretical Physics*, 3(2), 103–113. <https://doi.org/10.15408/fiziya.v3i2.17271>
- Lestari, A. S., & Sartika, D. (2018). Preparasi Dan Karakterisasi Nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Menggunakan Metode Kopresipitasi. *Teknologi Technoscintia*, 11(1), 7–10.
- Lestari, W. W., Hartono, J., Wulansari, D. W. T., Pramuja, E., Azhari, F., & Kusumaningsih, T. (2023). Pengaruh Metode Sintesis secara Solvo-Hidrotermal dan Elektrokimia terhadap Morfologi Struktur HKUST-1 sebagai Katalis Heterogen dalam Reaksi Esterifikasi Asam Palmitat. *ALCHEMY Jurnal*

- Penelitian Kimia*, 19(1), 1. <https://doi.org/10.20961/alchemy.19.1.62466.1-13>
- Li, Y., Wen, Q., Qin, J., Zou, S., Ning, F., Bai, C., Pan, S., Jin, H., Xu, P., Shen, M., Song, Y., & Zhou, X. 2023. A High-Efficient And Low-Consumption Nanoimprint Method To Prepare Large-Area And High-Quality Nafion Array For The Ordered MEA Of Fuel Cell. *Chemical Engineering Journal*. 451. 138722.
- Lianah, L., Idris, F., & Krisantini, K. (2019). Short Communication: Analysis Of The Chemical Constituents And Micromorphology Of Bauhinia Scandens Using SEM-EDS Techniques. *Biodiversitas*, 20(7), 2055–2060. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d200736>
- Lo Vecchio, C., Sebastián, D., Alegre, C., Aricò, A. S., & Baglio, V. (2018). Carbon-Supported Pd And Pd-Co Cathode Catalysts For Direct Methanol Fuel Cells (Dmfcs) Operating With High Methanol Concentration. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 808, 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.02.042>
- Ma'aruf, H. M., & Widiarsa, F. A. (2016). Fuel Cell Sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif Pengisi. *Jurnal Teknik Mesin*, 12(1), 45–54.
- Majlan, E. H., Rohendi, D., Daud, W. R. W., Husaini, T., & Haque, M. A. (2018). Electrode for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89(April), 117–134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.007>
- Miftahussyahro.& Maharani, D., K. (2020). Synthesis and characterization of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Composite For Application Of Hydrfobic Properties On Glass. *UNESA Journal of Chemistry Faculty of Mathematics and Natural Sciences State University of Surabaya*, 9(2), 156–161.
- Murniati, A., Buchori., Gandasasmita, S. dan Nurachman. Z. 2012. Sintesis Dan Karakterissi Polipirol Pada Elektroda Kerja Baja Dengan Metode Voltametri Siklik. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 13(3): 210-215.
- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. (2019). How To Read And Interpret Ftir Spectroscope Of Organic Material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 97–118. <https://doi.org/10.17509/ijost.v4i1.15806>
- Novandarys Sugandi, J., Si, S. M., Rosi MSi, M., & Fisika, T. (2018). *Rancang Bangun Potensiostat Berbasis Mikrokontroler Potentiostat Design Based on Mikrokontroler*. 5(3), 1–8.
- Nugroho, I., Putri, N., Adji, J. E. P., Nur, S. R., & Sekarningrum, N. A. (2024). Tinjauan Kritis Kemampuan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) dalam Analisis dan Karakterisasi Senyawa Obat. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 10(15), 332-344.
- Ojemaye, M. O., & Okoh, A. I. (2021). Global Research Direction On Pt And Pt Based Electro-Catalysts For Fuel Cells Application Between 1990 And 2019: A Bibliometric Analysis. *International Journal of Energy Research*, 45(11), 15783–15796. <https://doi.org/10.1002/er.6907>

- 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>
- Ozden, A., Ercelik, M., Ozdemir, Y., Devrim, Y., & Colpan, C. O. (2017). Enhancement Of Direct Methanol Fuel Cell Performance Through The Inclusion Of Zirconium Phosphate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(33), 21501–21517. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.188>
- Patel, R., Fakeeha, A. H., Kasim, S. O., Sofiu, M. L., Ibrahim, A. A., Abasaeed, A. E., Kumar, R., & Al-fatesh, A. S. (2021). Optimizing Yttria-Zirconia Proportions In Ni Supported Catalyst System For H<sub>2</sub> Production Through Dry Reforming Of Methane. *Molecular Catalysis*, 510(February), 111676. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111676>
- Pattanayak, P., Pramanik, N., Kumar, P., & Kundu, P. P. (2018). Fabrication Of Cost-Effective Non-Noble Metal Supported On Conducting Polymer Composite Such As Copper/Polypyrrole Graphene Oxide (Cu<sub>2</sub>O/Ppy-GO) As An Anode Catalyst For Methanol Oxidation In DMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(25), 11505–11519. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.300>
- Pérez-Rodríguez, S., Pastor, E., & Lázaro, M. J. (2018). Electrochemical behavior of the carbon black Vulcan XC-72R: Influence of the surface chemistry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(16), 7911–7922. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.040>
- Putama Mursal, I. L. (2018). Karakterisasi Xrd Dan Sem Pada Material Nanopartikel Serta Peran Material Nanopartikel Dalam Drug Delivery System. *Pharma Xplore : Jurnal Ilmiah Farmasi*, 3(2), 214–221. <https://doi.org/10.36805/farmasi.v3i2.491>
- Putri, H. dan Farma. R. 2021. Pembuatan Karakterisasi Elektroda Karbon Aktif dari Biomassa Pelepah Aren Dengan Persentase KOH. *Jurnal Komunikasi Fisika Indonesia*. 1(18): 75-80.
- Rachman, H. A.A., Aritonang, H. F.M & Koleangan, H. S. J. (2017). Sintesis Dan Karakterisasi Nanopartikel Platina (Pt). *10(2)*, 50–55.
- Rajaramanan, T., Kumara, G. R. A., Velauthapillai, D., Ravirajan, P., & Senthilnathanan, M. (2021). Ni/N co-doped P<sub>25</sub> TiO<sub>2</sub> photoelectrodes for efficient Dye-Sensitized Solar Cells. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 135(April), 106062. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106062>
- Ramadhanti, Y. (2023). Peran Katalis Dalam Reaksi Kimia: Mekanisme Dan Aplikasi. *Hexatech: Jurnal Ilmiah Teknik*, 2(2), 74–78. <https://doi.org/10.55904/hexatech.v2i2.915>
- 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., 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. *J. Phys. Conf. Ser.* 1282. 10.1088/1742-6596/1282/1/012065
- Sania, G., Taer, E., & Aziz, H. (2022). Utilization of activated carbon from used robusta coffee ground activated using potassium hydroxide (KOH) as a material for supercapacitor electrodes. *Journal of Aceh Physics Society*, 11(1), 24–32. <https://doi.org/10.24815/jacps.v11i1.22190>
- Septiani, U., Gustiana, M., & -, S. (2015). Pembuatan Dan Karakterisasi Katalis  $\text{TiO}_2$ /Karbon Aktif Dengan Metode Solid State. *Jurnal Riset Kimia*, 9(1), 34. <https://doi.org/10.25077/jrk.v9i1.257>
- Sim, J., Kang, M., & Min, K. (2021). ScienceDirect Effects of basic gas diffusion layer components on PEMFC performance with capillary pressure gradient. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(54), 27731–27748. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.205>
- Sheldon, D. J., Parr, J. M., & Crimmin, M. R. (2023). Room Temperature Defluorination of Poly(tetrafluoroethylene) by a Magnesium Reagent. *Journal of the American Chemical Society*, 145(19), 10486–10490. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c02526>
- Shu, Q. Z., Xia, Z. X., Wei, W., Xu, X. L., Wang, S. L., Zhao, H., & Sun, G. Q. (2021). A novel gas diffusion layer and its application to direct methanol fuel cells. *Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Materials*, 36(2), 409–419. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(21\)60017-3](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(21)60017-3)
- Syarif, N. (2023). Ideasi Kreativitas Masyarakat Desa Berupa Kerajinan Tangan dengan Menggunakan Karbon Konduktif. *ABDINE: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 3(1), 39–48. <https://doi.org/10.52072/abdine.v3i1.509>
- Syarif, N., Rohendi, D., Bizzy, I., & Mardiyanto, M. (2023). Penyuluhan Manfaat dan Pembuatan Manik - Manik Binchotan Kepada Masyarakat Desa. *ABDINE: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 3(2), 199–207. <https://doi.org/10.52072/abdine.v3i2.683>
- 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>
- Sucahya, Transmissia N., N. Permatasari, A. D. Nandiyanto. 2016. Review: Fotokatalis Untuk Pengolahan Limbah Cair. *Jurnal Integrasi Proses*. 6 (1):1 - 15.
- Tai, Y., Yang, B., Li, J., Meng, L., Xing, P., & Wang, S. (2024). *Design and Preparation of Heterostructured  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$  Materials for Photocatalytic Applications*.
- Tarigan, M., A. 2022. Preparasi Anoda  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$  dan Katoda Pt/C dengan Dopping

Polianilin Serta Aplikasinya pada *Direct Methanol Fuel Cell*. Skripsi Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya. Tidak Dipublikasikan.

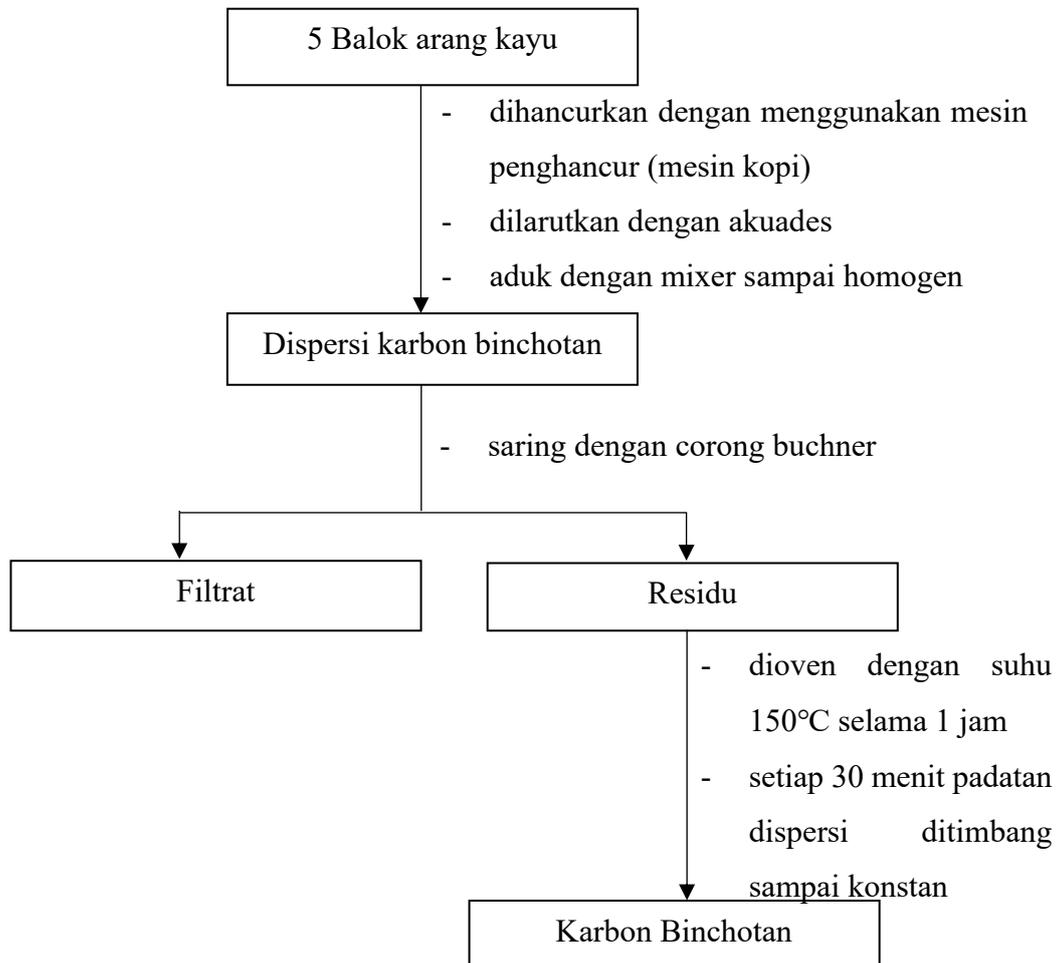
- Taufik, M., Suci, T., Kasih, D., & Khair, M. (2021). Pembuatan Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis Guineensis*) dengan Aktivator Gelombang Microwave. *Chemistry Journal of Universitas Negeri Padang*. 10(1): 40-44.
- Ulhakim, M. T., Sukarman, S., Khoirudin, K., Fazrin, N., Irfani, T., & Hakim, A. (2024). Determining The Crystallite Size of TiO<sub>2</sub>/EG-Water XRD Data Using the Scherrer Equation. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 14(1), 141. <https://doi.org/10.13057/ijap.v14i1.79195>
- Vietanti, F., Susanti, D., Purwaningsih, H., & Kurniawan, F. (2019). Pengaruh Reduktor Zink pada Sintesis Graphene terhadap Performa PdAu/Graphene sebagai Material Elektrokatalis DMFC. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan VII- Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya*, 379–384.
- VijayaDurga, C.; Srividya, A.; Ajitha, A.; Umamaheswara, R. V. (2014). An overview on cyclic voltammetry and its application in pharmaceutical analysis. *Int. J. Chem. Pharm. Sci.*, 5(2), 13–19.
- Wirasti., Rahmatullah, S., Wahyu Permadi, Y., & Nur Agmarina, S. (2021). Pengujian Karakter Nanopartikel Metode Gelasi Ionik Ekstrak Dan Tablet Daun Afrika (*Vernonia Amygdalina Del.*) Testing Of Nanoparticle Ionic Gelation Method Of Extract And Tablet Of Afrika Leaf (*Vernonia Amygdalina Del.*). *Jurnal Wiyata*, 147–151.
- Wu, K., Xing, L., & Ji, Y. (2023). Synthesis and Applications of Copper-Based Catalysts. *Catalysts*, 13(6), 973.
- Yang, L., Li, H., Yu, Y., Wu, Y., & Zhang, L. (2020). Assembled 3D MOF on 2D Nanosheets for Self-boosting Catalytic Synthesis of N-doped Carbon Nanotube Encapsulated Metallic Co Electrocatalysts for Overall Water Splitting. *Applied Catalysis B: Environmental*, 271(March), 118939. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118939>
- 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>
- 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>
- Yulianti, D. H., Rohendi, D., Syarif, N., & Rachmat, A. (2020). Characterization of electrode with various of Pt-Ru/C catalyst loading and the performance test of membrane electrode assembly (MEA) in passive direct methanol fuel cell (DMFC). *Key Engineering Materials*, 840 KEM, 558–565. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.840.558>

- Yusof, M. S. M., Jalil, A. A., Ahmad, A., Triwahyono, S., Othman, M. H. D., Abdullah, T. A. T., Firmansyah, M. L., Setiabudi, H. D., Johari, A., & Nabgan, W. (2019). Effect of Pt–Pd/C coupled catalyst loading and polybenzimidazole ionomer binder on oxygen reduction reaction in high-temperature PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 20760–20769. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.192>
- Zhang, D., Du, J., Quinson, J., & Arenz, M. (2022). On the electro-oxidation of small organic molecules: Towards a fuel cell catalyst testing platform based on gas diffusion electrode setups. *Journal of Power Sources*, 522, 230979. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.230979>

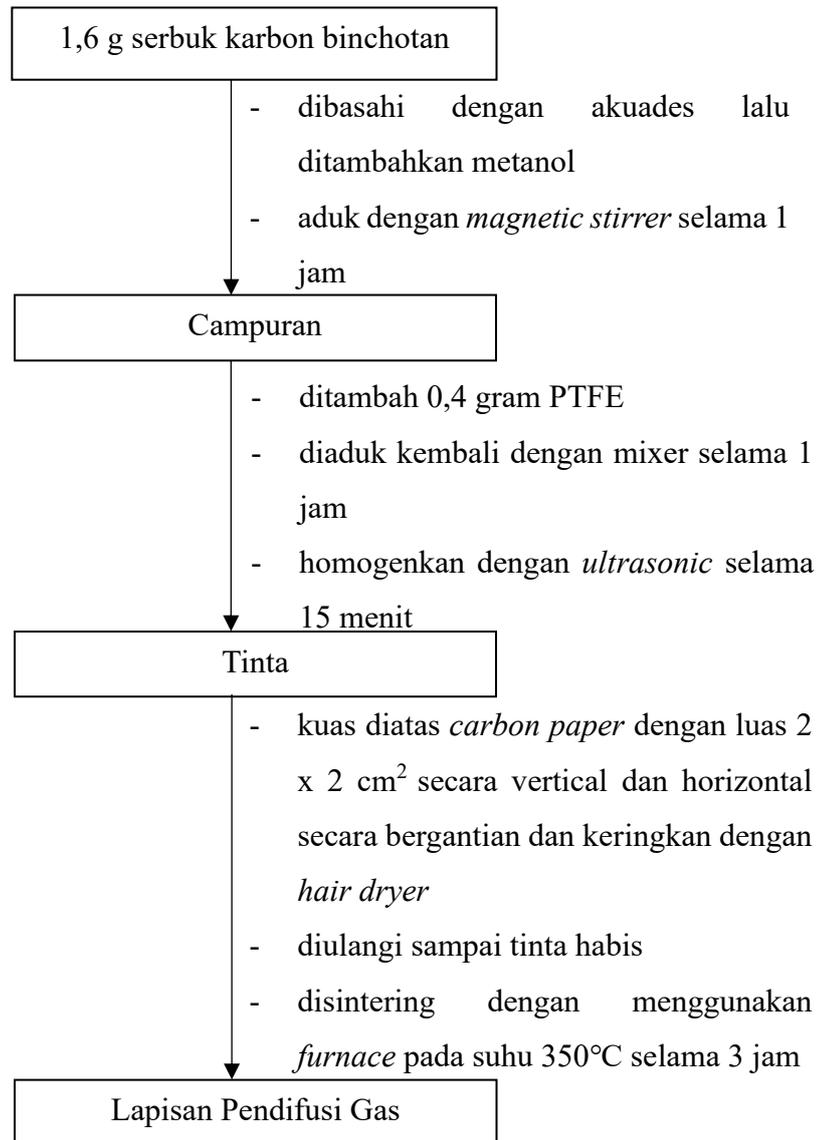
# LAMPIRAN

## Lampiran 1. Skema Kerja

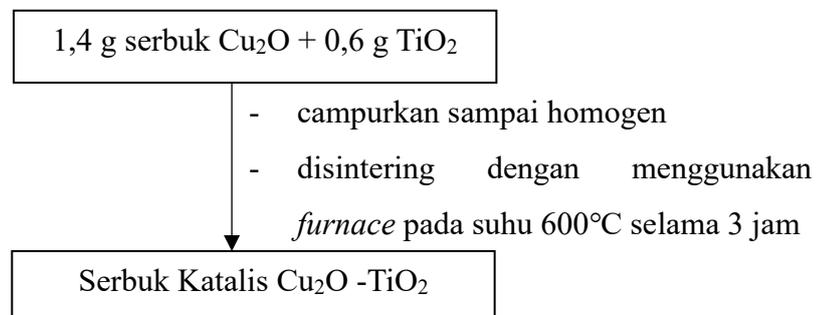
### 1. Pembuatan Serbuk Karbon Binchotan



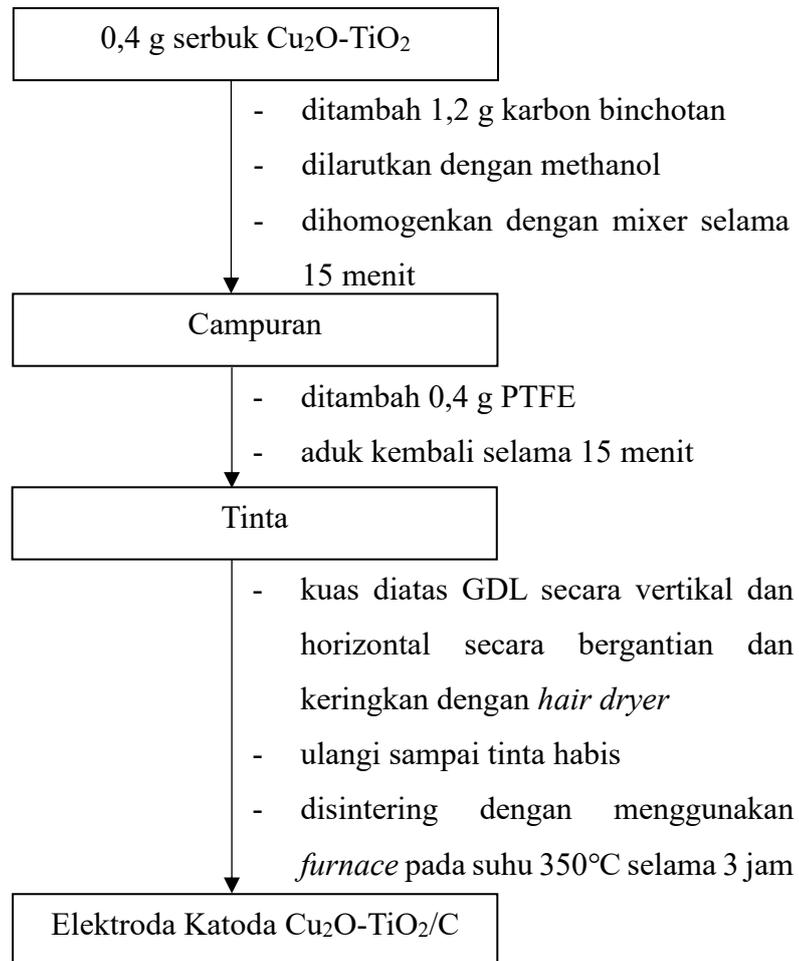
## 2. Pembuatan *Gas Diffusion Layer* (GDL)



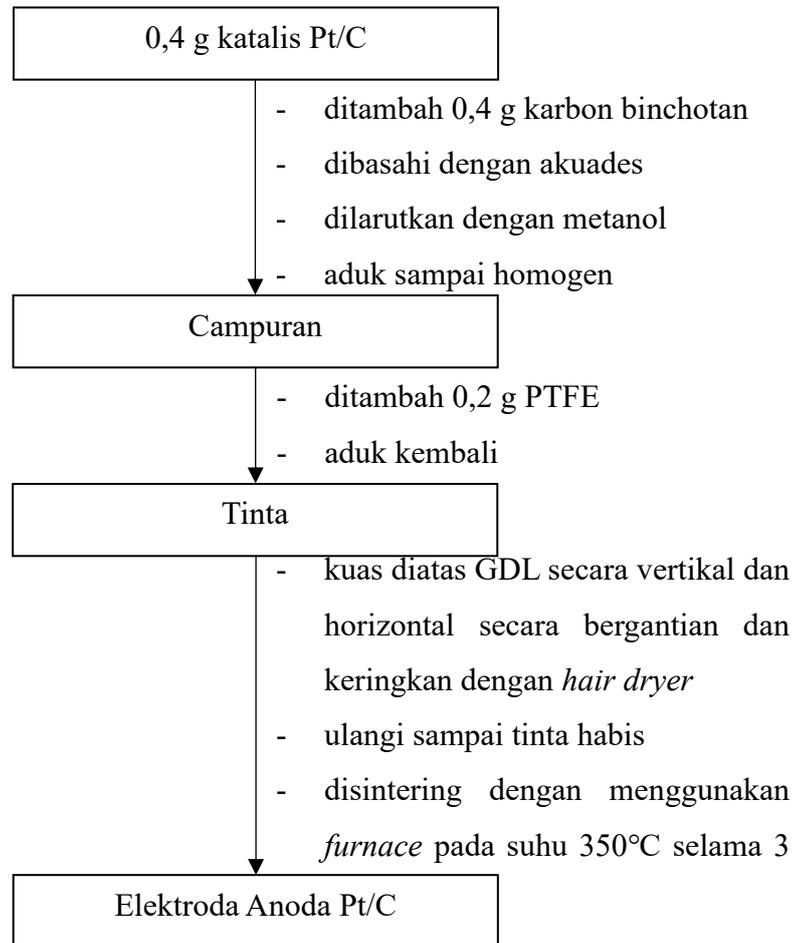
## 3. Preparasi Serbuk Katalis Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>



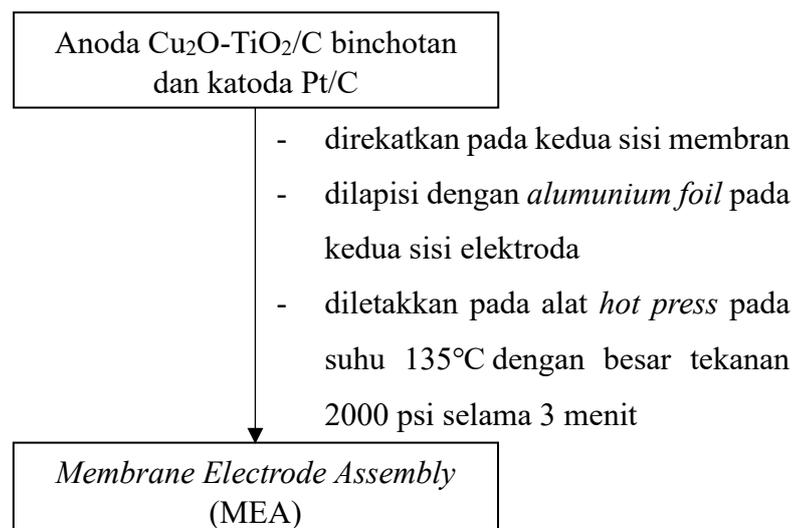
#### 4. Pembuatan Elektroda Katoda $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$



## 5. Pembuatan Elektroda Anoda Pt/C



## 6. Pembuatan *Membrane Electrode Assembly* (MEA)



## Lampiran 2. Perhitungan Komponen Elektroda

Elektroda pada penelitian ini dibuat dengan variasi perbandingan  $\text{Cu}_2\text{O} - \text{TiO}_2/\text{C}$  sebesar 30:70 dan 70:30, serta variasi karbon yang digunakan yaitu karbon binchotan dan karbon vulcan.

- Perhitungan Kandungan Serbuk Katalis  $\text{Cu}_2\text{O} - \text{TiO}_2$

Serbuk katalis  $\text{Cu}_2\text{O} - \text{TiO}_2$  dibuat sebanyak 2 gram, dimana masing-masing katalis dibuat dengan variasi 30:70 dan 70:30.

$\text{Cu}_2\text{O} - \text{TiO}_2$  (30:70)

$$\text{g Cu}_2\text{O} = \frac{30}{100} \times 2 = 0,3 \times 2 \text{ gr} = 0,6 \text{ gram}$$

$$\text{g TiO}_2 = \frac{70}{100} \times 2 = 0,7 \times 2 \text{ gr} = 1,4 \text{ gram}$$

$\text{Cu}_2\text{O} - \text{TiO}_2$  (70:30)

$$\text{g Cu}_2\text{O} = \frac{70}{100} \times 2 = 0,7 \times 2 \text{ gr} = 1,4 \text{ gram}$$

$$\text{g TiO}_2 = \frac{30}{100} \times 2 = 0,3 \times 2 \text{ gr} = 0,6 \text{ gram}$$

- Perhitungan Kandungan Komponen Lapisan Pendifusi Gas (GDL)

Komponen lapisan pendifusi gas (GDL) dibuat sebanyak 2 gram.

$$\text{g karbon} = \frac{80}{100} \times 2 = 1,6 \text{ gram}$$

$$\text{g PTFE} = \frac{20}{100} \times 2 = 0,4 \text{ gram}$$

- Perhitungan Komponen Elektroda Katoda  $\text{Cu}_2\text{O} - \text{TiO}_2/\text{C}$

Komponen Elektroda Katoda  $\text{Cu}_2\text{O} - \text{TiO}_2/\text{C}$  dibuat sebanyak 2 gram

$$\text{g serbuk katalis} = \frac{20}{100} \times 2 = 0,4 \text{ gram}$$

$$\text{g PTFE} = \frac{20}{100} \times 2 = 0,4 \text{ gram}$$

$$\text{g karbon} = \frac{60}{100} \times 2 = 1,2 \text{ gram}$$

- Perhitungan Komponen Elektroda Anoda Pt/C

Komponen Elektroda Anoda Pt/C dibuat sebanyak 1 gram

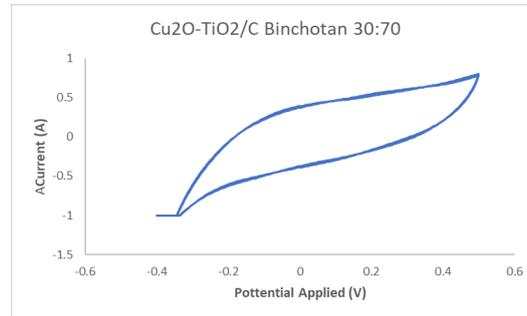
$$\text{g serbuk katalis} = \frac{40}{100} \times 1 = 0,4 \text{ gram}$$

$$\text{g karbon} = \frac{40}{100} \times 1 = 0,4 \text{ gram}$$

$$\text{g PTFE} = \frac{20}{100} \times 1 = 0,2 \text{ gram}$$

### Lampiran 3. Perhitungan Nilai ECSA Gas Diffussion Layer (GDL) Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C

- Perhitungan Nilai ECSA *Gas Diffussion Layer* (GDL) Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C Binchotan



Data hasil pengukuran *Cyclic Voltammetry*

No.	Time	Potential Applied (V)	Current (A)
1.	0.01	-0.3995	-1
2.	0.02	-0.399	-1
3.	0.03	-0.3985	-1
4.	.....	.....	.....
5.	.....	.....	.....
6.	.....	.....	.....
7.	.....	.....	.....
3600.	35.99	-0.3995	0.001
3601.	36	-0.4	0.001

$$i = \frac{1}{-0,48 - 0,5} \int_{0,5}^{-0,48} I(E) dE$$

Diketahui :

$$C_s = 0,022; 0,13$$

$$\begin{aligned} - \text{ECSA} &= \frac{C_{dl}}{C_s} \\ &= \frac{0,008325}{0,022} = 0,378398 \text{ cm}^2/\text{g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - \text{ECSA} &= \frac{C_{dl}}{C_s} \\ &= \frac{0,008325}{0,13} = 0,064037 \text{ cm}^2/\text{g} \end{aligned}$$

$$- \text{Rata-rata} = \frac{0,378398 + 0,064037}{2} = 0,221217 \text{ cm}^2/\text{g}$$

#### Lampiran 4. Perhitungan Nilai Kerapatan Arus

Rumus Kerapatan Arus :

$$J = \frac{I}{A}$$

dimana :

J = Kerapatan arus (A/cm<sup>2</sup>)

I = Arus listrik (A)

A = Luas permukaan (cm<sup>2</sup>)

- Perhitungan nilai kerapatan arus pada MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C binchotan dengan konsentrasi metanol 5%

- Current Load 100 mA

$$J = \frac{100}{4} = 25 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$$

- Current Load 200 mA

$$J = \frac{200}{4} = 50 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$$

- Current Load 300 mA

$$J = \frac{300}{4} = 75 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$$

- Current Load 400 mA

$$J = \frac{400}{4} = 100 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$$

- Current Load 500 mA

$$J = \frac{500}{4} = 125 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$$

- Current Load 600 mA

$$J = \frac{600}{4} = 150 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$$

### Lampiran 5. Perhitungan Nilai Densitas Daya

Rumus Densitas Daya :

$$P=V \times I$$

dimana :

P = Densitas daya (mW/cm<sup>2</sup>)

V = Tegangan (mV)

I = Kuat arus listrik (A)

- Perhitungan nilai kerapatan arus pada MEA Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C binchotan dengan konsentrasi metanol 5%

- Current Load 100 mA

$$P = 0,7 \times 100 \text{ mA} = 70 \text{ mW}$$

### Lampiran 6. Uji Kinerja MEA pada Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) dengan tegangan dan metanol bervariasi

#### 1. MEA dengan Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C binchotan

- MEA dengan Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C binchotan (30:70)

Metanol (%)	Hambatan (mA)	Tegangan (mV)	Luas Elektroda (cm)	Kerapatan Arus (mA/cm <sup>2</sup> )	Densitas Daya (mW/cm <sup>2</sup> )
5	0	1,9	4	0	0
	100	0,7	4	25	70
	200	1,4	4	50	280
	300	3,9	4	75	1170
	400	1,7	4	100	680
	500	2,7	4	125	1350
	600	1,8	4	150	1080
10	0	2,6	4	0	0
	100	0,9	4	25	90
	200	2	4	50	400
	300	1,4	4	75	420
	400	2,6	4	100	1040
	500	1,5	4	125	750
	600	1	4	150	600
15	0	2	4	0	0
	100	1,6	4	25	160
	200	1,3	4	50	260
	300	1,2	4	75	360
	400	0,9	4	100	360
	500	0,7	4	125	350
	600	0,5	4	150	300
20	0	3,5	4	0	0
	100	2,9	4	25	290
	200	2	4	50	400
	300	1,5	4	75	450
	400	1,1	4	100	440
	500	0,8	4	125	400
	600	0,3	4	150	180

- MEA dengan  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  binchotan (70:30)

Metanol (%)	Hambatan (mA)	Tegangan (mV)	Luas Elektroda (cm)	Kerapatan Arus (A/m <sup>2</sup> )	Densitas Daya (mW/m <sup>2</sup> )
5	0	0,7	4	0	0
	100	1,3	4	25	130
	200	0,9	4	50	180
	300	0,8	4	75	240
	400	0,8	4	100	320
	500	0,6	4	125	300
	600	2,5	4	150	1500
10	0	1,7	4	0	0
	100	0,1	4	25	10
	200	0,7	4	50	140
	300	2,9	4	75	870
	400	1,1	4	100	440
	500	0,9	4	125	450
	600	1,3	4	150	780
15	0	0,1	4	0	0
	100	0,7	4	25	70
	200	0,6	4	50	120
	300	0,7	4	75	210
	400	0,9	4	100	360
	500	1,5	4	125	750
	600	0,1	4	150	60
20	0	2,1	4	0	0
	100	9,3	4	25	930
	200	11,9	4	50	2380
	300	2,6	4	75	780
	400	3,4	4	100	1360
	500	1,9	4	125	950
	600	1,3	4	150	780

2. MEA dengan Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C vulcan

- MEA dengan Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C vulcan (30:70)

Metanol (%)	Hambatan (mA)	Tegangan (mV)	Luas Elektroda (cm)	Kerapatan Arus (A/m <sup>2</sup> )	Densitas Daya (mW/m <sup>2</sup> )
5	0	3,9	4	0	0
	100	3,7	4	25	370
	200	3,6	4	50	720
	300	3,4	4	75	1020
	400	3,3	4	100	1320
	500	3,2	4	125	1600
	600	3,1	4	150	1860
10	0	3,7	4	0	0
	100	3,5	4	25	350
	200	3,4	4	50	680
	300	3,2	4	75	960
	400	3,2	4	100	1280
	500	3	4	125	1500
	600	2,8	4	150	1680
15	0	3,5	4	0	0
	100	3,3	4	25	330
	200	3,1	4	50	620
	300	3	4	75	900
	400	3	4	100	1200
	500	2,7	4	125	1350
	600	2,5	4	150	1500
20	0	3,1	4	0	0
	100	2,9	4	25	290
	200	2,7	4	50	540
	300	2,5	4	75	750
	400	2,3	4	100	920
	500	2,2	4	125	1100
	600	2,1	4	150	1260

- MEA dengan  $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2/\text{C}$  vulcan (70:30)

Metanol (%)	Hambatan (mA)	Tegangan (mV)	Luas Elektroda (cm)	Kerapatan Arus (A/m <sup>2</sup> )	Densitas Daya (mW/m <sup>2</sup> )
5	0	3,7	4	0	0
	100	3,2	4	25	320
	200	3,1	4	50	620
	300	2,7	4	75	810
	400	2,3	4	100	920
	500	2,1	4	125	1050
	600	1,8	4	150	1080
10	0	3,1	4	0	0
	100	2,9	4	25	290
	200	2,5	4	50	500
	300	2,3	4	75	690
	400	2,1	4	100	840
	500	2	4	125	1000
	600	1,9	4	150	1140
15	0	2,8	4	0	0
	100	2,7	4	25	270
	200	2,6	4	50	520
	300	2,4	4	75	720
	400	2,3	4	100	920
	500	2,1	4	125	1050
	600	2	4	150	1200
20	0	2,2	4	0	0
	100	2,1	4	25	210
	200	1,9	4	50	380
	300	1,7	4	75	510
	400	1,4	4	100	560
	500	1,3	4	125	650
	600	1	4	150	600

## Lampiran 7. Gambar Alat dan Bahan Penelitian

### a. Alat yang digunakan



*Hot Press*



*Furnace*



*Stack MEA*



Potensiostat



Multimeter

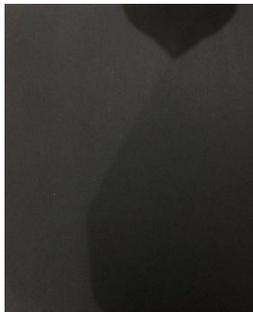


Neraca Analitik

## b. Bahan yang digunakan

Serbuk  $\text{Cu}_2\text{O}$ 

Karbon Vulkan

 $\text{TiO}_2$ *Carbon Paper*

Metanol



PTFE

**DAFTAR RIWAYAT HIDUP**

Nama : Rizki Hamidah Daulay  
 NIM : 08031382126101  
 Tempat/Tanggal Lahir : Pancaukan/ 28 Januari 2002  
 Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia  
 Bidang Ilmu Skripsi : Kimia Fisika  
 Rumah : Jln. Lintas Riau, Kec. Barumun Kab. Padang Lawas,  
 Sumatera Utara  
 No. Hp : 082272067562  
 Email : [rizkihamidahd@gmail.com](mailto:rizkihamidahd@gmail.com)

**Riwayat Pendidikan :**

- SD Negeri 0108 Bulusonik Tahun 2008 s.d 2014
- Madrasah Tsanawiyah Pp Ar-Raudhatul Hasanah Tahun 2014 s.d 2019
- Madrasah Aliyah Pp Ar-Raudhatul Hasanah Tahun 2019 s.d 2020
- Universitas Sriwijaya Tahun 2021 s.d 2025

**Pengalaman Organisasi :**

- Anggota Divisi PP Himaki (2021/2022)
- Anggota Imatabagsel (2021/2022)
- Badan Pengurus Harian Himaki (2022/2023)
- Badan Pengurus Harian Imatabagsel (2022/2023)

**Karya Ilmiah Hasil Studi :**

- Skripsi S1 (2025)  
 “Preparasi *Membrane Electrode Assembly* (MEA) Dengan Anoda Pt/C Dan Katoda Cu<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>/C Binchotan Sebagai Tinta Katalis Dan Aplikasinya Pada *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC)”