

**UJI KINERJA *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) YANG
DIBUAT DENGAN METODE CCM DAN CCS PADA *UNITIZED
REGENERATIVE FUEL CELL* (URFC)**

TESIS

Diajukan Sebagai Syarat Untuk Memperoleh Gelar Magister

Bidang Studi Kimia



Oleh:

Yollanda Nurcholifah

08092682327004

PROGRAM STUDI MAGISTER KIMIA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2025

HALAMAN PENGESAHAN

**UJI KINERJA *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) YANG
DIBUAT DENGAN METODE CCM DAN CCS PADA *UNITIZED
REGENERATIVE FUEL CELL* (URFC)**

TESIS

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Magister Kimia**

Oleh :

YOLLANDA NURCHOLIFAH

08031281924113

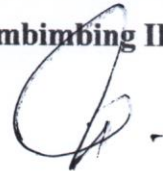
Palembang, 25 April 2025

Pembimbing I



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

Pembimbing II



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

Mengetahui,

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

HALAMAN PERSETUJUAN

Tesis dengan judul “Uji Kinerja *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang dibuat dengan Metode CCM dan CCS pada *Unitized Regenerative Fuel Cell* (URFC)” telah dipertahankan dihadapan Tim Penguji Sidang Tesis Program Studi Magister Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 25 April 2025 dan telah diperiksa, diperbaiki, dan disetujui sesuai dengan saran masukan yang diberikan.

Palembang, 25 April 2025

Pembimbing:

1. **Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D**
NIP. 196704191993031001
2. **Dr. Nirwan Syarif, M.Si.**
NIP. 197010011999031003

()
()

Penguji:

1. **Prof. Dr. Hasanudin, M.Si.**
NIP. 197205151997021003
2. **Prof. Dr. Elfita, M.Si.**
NIP. 196903261994122001

()
()

Mengetahui,


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


Koordinator Program Studi
Magister Kimia
Dr. Ferlinahayati, M.Si.
NIP. 197402052000032001

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Yollanda Nurcholifah
NIM : 08092682327004
Program Studi/BKU : Magister (S2) Kimia/Kimia Material dan Energi

Menyatakan bahwa tesis yang berjudul “**Uji Kinerja *Membrane Electrode Assembly (MEA)* yang dibuat dengan Metode CCM dan CCS pada *Unitized Regenerative Fuel Cell (URFC)***” ini adalah benar karya saya sendiri dan karya ilmiah ini belum pernah diajukan sebagai pemenuhan persyaratan untuk memperoleh gelar magister (S2) dari Universitas Sriwijaya maupun perguruan tinggi manapun.

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

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar – benarnya.

Palembang, 25 April 2025
Penulis



Yollanda Nurcholifah
NIM. 08092682327004

HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Yollanda Nurcholifah
NIM : 08092682327004
Fakultas/Jurusan : MIPA/Magister Kimia
Jenis Karya : Tesis

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: **“Uji Kinerja Membrane Electrode Assembly (MEA) yang dibuat dengan Metode CCM dan CCS pada Unitized Regenerative Fuel Cell (URFC)”** dengan hak bebas royalti non-eksklusif ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih, edit/memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sungguh – sungguhnya.

Palembang, 25 April 2025

Yang menyatakan,



Yollanda Nurcholifah

NIM. 08092682327004

HALAMAN PERSEMBAHAN

“Barang siapa yang menempuh jalan untuk mencari ilmu, maka Allah akan mudahkan baginya jalan menuju surga.”

(HR. Bukhari dan Muslim)

“... Niscaya Allah akan mengangkat (derajat) orang-orang yang beriman di antaramu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat. Dan Allah Maha Mengetahui apa yang kamu kerjakan.”

(Qs. Al-Mujadilah/58:11)

Tesis ini sebagai tanda syukurku kepada Allah Subhanahu Wa Ta’aala, Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat, karunia, dan kasih sayang-Nya yang tak terhingga.

Tesis ini saya persembahkan kepada:

- Kedua orang tuaku, Ayah Subagio dan Ibu Dina Perawaty yang selalu memberikan doa dan dukungan yang tiada henti.
- Kedua adikku, Bagass Giollana Alkhodri dan Jabbar Giollana Alghibran.
- Dosen pembimbing dan seluruh pendidik, yang telah berbagi ilmu, bimbingan, serta wawasan yang begitu berharga.
- Tim Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya, yang selalu memberikan inspirasi untuk terus berusaha dan belajar.
- Almamaterku (Universitas Sriwijaya)

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT atas segala Nikmat, Rahmat, dan Karunia yang telah dilimpahkan kepada penulis sehingga penulis akhirnya dapat menyelesaikan penulisan tesis yang berjudul “Uji Kinerja *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang dibuat dengan Metode CCM dan CCS pada *Unitized Regenerative Fuel Cell* (URFC)”. Shalawat serta Salam semoga selalu tercurah kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, serta para saudara umat Islam di manapun berada. Tesis ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Master Sains pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Kimia Universitas Sriwijaya.

Proses penyusunan tesis dan penelitian tidak terlepas dari berbagai hambatan dan rintangan yang penulis hadapi. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa semua ini dapat terwujud karena bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu tersayang **Dina Perawaty** dan Ayah tersayang **Subagio**, dengan penuh rasa syukur dan hormat, saya sampaikan ucapan terima kasih yang mendalam, atas cinta, kasih sayang, doa yang tiada putus, serta dukungan tanpa syarat yang selalu mengiringi setiap langkah saya. Terima kasih atas segala pengorbanan, baik dalam bentuk fasilitas, dukungan materi, maupun nasihat penuh hikmah yang menjadi pondasi kokoh dalam perjalanan pendidikan ini. Setiap pencapaian yang saya raih tidak akan terwujud tanpa kerja keras, kesabaran, dan keikhlasan kalian. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan keberkahan, kesehatan, dan kebahagiaan kepada Ayah dan Ibu, serta membalas segala kebaikan kalian dengan pahala yang berlipat ganda.
2. Kedua adik saya, **Bagass** dan **Jabbar**, terima kasih atas doa dan dukungannya kepadaku.
3. Bapak **Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D** selaku dosen pembimbing I, saya sampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala bimbingan, arahan, kesabaran, dan ilmu yang telah diberikan selama proses penelitian penyusunan tesis ini. Terima kasih atas waktu yang diluangkan,

koreksi yang membangun, serta motivasi yang telah membantu saya menyelesaikan penelitian dan tesis ini. Dedikasi Bapak dalam membimbing saya adalah hal yang sangat berharga dan Saya juga mohon maaf apabila terdapat kekeliruan atau kekurangan dalam proses ini. Semoga segala yang telah Bapak berikan menjadi amal jariyah dan mendapatkan balasan terbaik dari Allah SWT.

4. Bapak **Dr. Nirwan Syarif, M.Si.** selaku dosen pembimbing II atas segala bimbingan, kesabaran dan waktu yang diluangkan kepada penulis selama menjalankan penelitian dan penyusunan skripsi hingga selesai. Setiap masukan yang diberikan sangat berarti bagi saya. Saya mohon maaf jika ada kekeliruan atau kekurangan dalam penelitian ini.
5. Bapak **Prof. Dr. Hasanudin, M.Si.** dan Ibu **Prof. Dr. Elfita, M.Si.** selaku dosen pembahas atau penguji, terima kasih atas masukan dan saran terkait penelitian dan dalam penyelesaian tesis.
6. Seluruh **Dosen Jurusan Magister Kimia FMIPA**, Universitas Sriwijaya yang telah membimbing dan memberikan ilmu kepada penulis selama masa perkuliahan, terima kasih atas setiap pelajaran kehidupan yang diberikan.
7. **Diri sendiri**, yang sudah mengorbankan waktu dan tenaga dalam menjalankan penelitian sampai menyelesaikan tesis ini. Perasaan suka dan duka yang dirasakan saat perjalanan kemarin telah terbalaskan dengan selesainya karya ini. Semangat untuk perjalanan selanjutnya. Mari banggakan keluarga, terutama Ibu dan Ayah yang meletakkan harapan besar kepadamu.
8. **Muhammad Daffa Aulia Rahman.** Terima kasih karena selalu memberikan ruang dan waktu kepada penulis dalam menyampaikan semua kesedihan atau kebahagiaan yang dirasakan oleh penulis selama masa penelitian sampai dengan menyelesaikan tesis. Terima kasih atas doa, semangat, dan rasa pengertian yang diberikan kepada penulis. Mari sukses bersama demi masa depan yang cerah!
9. Mentor PUR (**Kak Reka dan Kak Dwi**), terima kasih banyak kak atas semua dukungan dan ilmu yang diberikan. Terima kasih telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian hingga tesis. Semoga Allah membalas kebaikan-kebaikan kakak sekalian.

SUMMARY

PERFORMANCE TEST OF MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA) MANUFACTURED USING CCM AND CCS METHODS IN A UNITIZED REGENERATIVE FUEL CELL (URFC)

Yollanda Nurcholifah: Supervised by Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D and
Dr. Nirwan Syarif, M.Si.

Master of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Science, Sriwijaya University.

xvi + 95 pages, 10 tables, 23 pictures, 11 appendices

This study compares the performance testing of Membrane Electrode Assemblies (MEAs) made using the CCS method with single-layer and three-layer catalyst electrodes, and MEAs made using the CCM method with three-layer catalysts. The analysis of the electrodes using the CV method showed that the ECSA values of Pt/C and Pt-Ru/C with three layers of catalysts were $75.2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{g}$ and $121.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{g}$, respectively, while the ECSA values for Pt/C and Pt-Ru/C with a single catalyst layer were 21×10^{-2} and $12.9 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{g}$, respectively. This was supported by electrode characterization data using XRD, which showed that the electrode with Pt/C catalyst had a larger average crystal size compared to Pt-Ru/C, with a size of 21.665 nm, while Pt-Ru/C had an average crystal size of 14.328 nm. XRF characterization showed that the Pt/C spectrum only displayed a peak for Pt without any indication of Ru, consistent with a composition almost entirely of Pt (96.491%), while the Pt-Ru/C spectrum displayed a strong peak for Pt at 9-12 keV (Pt $L\alpha$ and Pt $L\beta$) and a peak for Ru at 18-23 keV (Ru $K\alpha$ and Ru $K\beta$). Although the intensity of Pt in Pt/C was higher, the absence of Ru reduced the ECSA value as there was no synergy to enhance catalytic performance, unlike in Pt-Ru/C. SEM characterization of the MEA CCS with three-layer catalyst electrodes showed an average catalyst layer thickness of 164.817 μm , with a neat and uniform arrangement on both sides of the Nafion-212 membrane, while the MEA CCS with a single catalyst layer exhibited a thinner catalyst layer, with a thickness of 141.349 μm . The MEA CCM with three catalyst layers had a catalyst layer thickness of 109.521 μm and showed a less uniform surface. The MEA CCS with three-layer catalyst electrodes achieved the highest RTE of 100% at a current density of 4 mA/cm^2 , whereas the MEA CCM with three-layer catalyst electrodes had an RTE of 40.38% at the same current density, and the MEA CCS with a single-layer catalyst had a lower RTE of 21.81%.

Keywords: URFC, Round-Trip Efficiency (RTE), Pt-Ru/C, Membrane Electrode Assembly (MEA), ECSA.

RINGKASAN

UJI KINERJA *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) YANG DIBUAT DENGAN METODE CCM DAN CCS PADA *UNITIZED* *REGENERATIVE FUEL CELL* (URFC)

Yollanda Nurcholifah: dibimbing oleh Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D dan
Dr. Nirwan Syarif, M.Si.

Program Studi Magister Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Sriwijaya

xi + 95 halaman, 10 tabel, 23 gambar, 11 lampiran

Pada penelitian ini dilakukan perbandingan uji kinerja MEA yang dibuat menggunakan metode CCS dengan elektroda satu dan tiga lapisan katalis serta MEA menggunakan metode CCM dengan tiga lapisan katalis. Hasil analisis elektroda dengan metode CV menunjukkan nilai ECSA Pt/C dan Pt-Ru/C dengan tiga lapisan katalis berturut-turut adalah $75,2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{g}$ dan $121,6 \times 10^{-2}$, sementara nilai ECSA Pt/C dan Pt-Ru/C dengan satu lapisan katalis berturut-turut adalah 21×10^{-2} dan $12,9 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{g}$. Hal ini didukung oleh data karakterisasi elektroda dengan XRD yang menunjukkan bahwa elektroda dengan katalis Pt/C memiliki rata-rata ukuran kristal lebih besar dibandingkan dengan Pt-Ru/C, yaitu sebesar 21,665 nm, sementara Pt-Ru/C memiliki rata-rata ukuran kristal sebesar 14,328 nm. Hasil karakterisasi XRF menunjukkan spektrum Pt/C hanya menunjukkan puncak Pt tanpa indikasi Ru, yang sesuai dengan komposisi yang hampir seluruhnya Pt (96,491%), sementara pada spektrum Pt-Ru/C, terlihat puncak kuat untuk Pt pada energi 9-12 keV (Pt L α dan Pt L β) dan puncak untuk Ru pada energi 18-23 keV (Ru K α dan Ru K β). Meskipun intensitas Pt pada Pt/C lebih tinggi, tidak adanya Ru mengurangi nilai ECSA karena tidak ada sinergi yang meningkatkan kinerja katalitik seperti pada Pt-Ru/C. Hasil karakterisasi SEM pada MEA CCS dengan elektroda tiga lapisan katalis memiliki ketebalan lapisan katalis sebesar 164,817 μm serta tersusun rapi dan rata di kedua sisi membran Nafion-212, sementara MEA CCS dengan satu lapisan katalis menunjukkan lapisan katalis yang lebih tipis dibandingkan MEA CCS dengan tiga lapisan katalis, yaitu dengan ketebalan sebesar 141,349 μm , dan MEA CCM dengan tiga lapisan katalis, memiliki rata-rata ketebalan lapisan katalis sebesar 109,521 μm dan terlihat memiliki permukaan membran dan lapisan katalis yang tidak rata. MEA CCS dengan elektroda tiga lapisan katalis memiliki nilai RTE tertinggi sebesar 100% pada densitas arus 4 mA/cm², sementara pada densitas arus yang sama nilai RTE MEA CCM dengan elektroda tiga lapisan katalis memiliki RTE sebesar 40,38%, sedangkan MEA CCS dengan elektroda satu lapisan katalis memiliki RTE yang lebih rendah, yaitu 21,81%.

Kata Kunci : URFC, *Round-Trip Efficiency* (RTE), Pt-Ru/C, *Membrane Electrode Assembly* (MEA), dan ECSA.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
SUMMARY	ix
RINGKASAN	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	5
1.3. Hipotesis Penelitian	5
1.4. Tujuan Penelitian.....	5
1.5. Manfaat penelitian	6
1.6. Kerangka Berpikir	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 <i>Regenerative Fuel Cell</i> (RFC).....	8
2.2 Jenis <i>Regenerative Fuel Cell</i> (RFC).....	9
2.2.1 <i>Unitized Regenerative Fuel Cell</i> (URFC)	9
2.2.1 <i>Discrete Regenerative Fuel Cell</i> (DRFC)	11
2.3 <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA).....	12
2.4 Metode Pembuatan MEA	13
2.4.1 Metode Pembuatan MEA Berdasarkan Target Penempelan Katalis	13
2.4.1.1 <i>Metode Catalyst Coated Substrate</i> (CCS).....	13
2.4.1.2 <i>Metode Catalyst Coated Membrane</i> (CCM).....	14
2.4.2. Metode Pembuatan MEA Berdasarkan Metode Pelapisan Katalis	15
2.4.2.1 Metode Penyemprotan (<i>Spraying</i>)	15

2.4.2.2 Metode <i>Doctor Blade</i>	17
2.4.2.3 Metode <i>Inkjet Printing</i>	17
2.5 Katalis	18
2.5.1 Katalis Pt/C	18
2.5.2 Katalis Pt-Ru/C	19
2.6 Karakterisasi Elektroda dan MEA	19
2.6.1 Penentuan Sifat Elektrokimia dengan Metode <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	19
2.6.2 Pengukuran Konduktivitas Listrik dengan Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	20
2.6.3 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	22
2.6.4 <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	23
2.6.5 <i>Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X-Ray</i> (SEM-EDX)	23
2.7 Pengukuran Kinerja URFC	24
2.7.1 Kurva Polarisasi pada URFC	24
2.7.2 <i>Round Trip Efficiency</i> (RTE) URFC	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1 Waktu dan Tempat	26
3.2 Alat dan Bahan	26
3.2.1 Alat	26
3.2.2 Bahan	26
3.3 Prosedur Penelitian	26
3.3.1 Preparasi <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)	26
3.3.2 Preparasi Tinta Katalis untuk Elektroda Tiga Lapisan Katalis	27
3.3.2.1 Preparasi Tinta Katalis Lapisan Pertama	27
3.3.2.2 Preparasi Tinta Katalis Lapisan Kedua dan Ketiga	27
3.3.3 Preparasi Tinta Katalis untuk Elektroda Satu Lapisan Katalis	27
3.3.4 Preparasi MEA dengan Metode CCS	28
3.3.4.1 Preparasi MEA dengan Tiga Lapisan Katalis	28
3.3.4.2 Preparasi MEA dengan Satu Lapisan Katalis	28
3.3.5 Preparasi MEA dengan Metode CCM	28
3.3.6 Karakterisasi Elektroda	28

3.3.6.1 Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda Pt/C dan Pt-Ru/C dengan Satu dan Tiga Lapisan Katalis Menggunakan Metode CV	29
3.3.6.2 Pengujian Konduktivitas Listrik Elektroda Pt/C dan Pt-Ru/C dengan Satu dan Tiga Lapisan Katalis Menggunakan Metode EIS.....	29
3.3.7 Karakterisasi MEA.....	30
3.3.8 Uji Kinerja MEA dan URFC.....	30
3.3.9 Analisis Data	30
3.3.9.1 Analisis CV	30
3.3.9.2 Analisis EIS.....	31
3.3.9.3 Analisis Kinerja MEA pada Mode <i>Fuel Cell</i>	32
3.3.9.4 Analisis Kinerja MEA pada Mode <i>Fuel Cell</i>	33
3.3.9.5 Analisis Nilai <i>Round Trip Efficiency</i> (RTE).....	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1 Hasil Karakterisasi Elektroda.....	36
4.1.1 Penentuan Nilai ECSA Elektroda Pt/C dan Pt-Ru/C dengan Satu dan Tiga Lapisan Katalis	36
4.1.2 Penentuan Nilai Konduktivitas Listrik Elektroda Pt/C dan Pt-Ru/C dengan Satu dan Tiga Lapisan Katalis ..	38
4.2 Karakterisasi Elektroda Pt/C dan Pt-Ru/C dengan XRD dan XRF	41
4.3 Pembuatan dan Karakterisasi SEM dari MEA.....	43
4.4 Hasil Kinerja MEA pada Mode FC.....	46
4.4.1 Pengukuran OCV	46
4.4.2 Kurva Polarisasi pada MEA.....	48
4.5 Laju Produksi Hidrogen terhadap Densitas Arus pada Mode WE.....	52
4.6 Kinerja URFC	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	60
5.1 Kesimpulan	60
5.2 Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN.....	70

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Komponen URFC.	9
Gambar 2. Skema DRFC.	12
Gambar 3. Preparasi MEA menggunakan metode CCS atau CCG dan CCM	13
Gambar 4. Preparasi MEA menggunakan metode CCS.	14
Gambar 5. Sub-komponen CCM.	15
Gambar 6. Skema <i>spraying</i>	16
Gambar 7. Skema proses pelapisan tinta dan elektroda dengan <i>inkjet printing</i>	18
Gambar 8. Voltammogram.	20
Gambar 9. Plot Nyquist.	22
Gambar 10. Karakteristik Kurva Polarisasi.	25
Gambar 11. Bentuk umum kurva I-V.	33
Gambar 12. Bentuk umum kuva I-P.	33
Gambar 13. Voltammogram elektroda dengan satu dan tiga lapisan katalis..	37
Gambar 14. Kurva Nyquist elektroda dengan satu dan tiga lapisan katalis. ..	39
Gambar 15. Difraktogram elektroda dengan katalis Pt/C dan Pt-Ru/C.	42
Gambar 16. Spektrum XRF dari elektroda Pt/C dan elektroda Pt-Ru/C.	43
Gambar 17. Hasil karakterisasi <i>cross section</i> MEA menggunakan SEM	45
Gambar 18. Diagram OCV pada ketiga jenis MEA	47
Gambar 19. Kurva polarisasi pada mode <i>fuel cell</i>	48
Gambar 20. Laju produksi hidrogen pada densitas arus yang berbeda	53
Gambar 21. Kurva polarisasi pada mode <i>fuel cell</i> dan elektrolisis	54
Gambar 22. Nilai RTE pada densitas arus yang bervariasi	56
Gambar 23. MEA yang sudah digunakan pada uji kinerja URFC	58

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Reaksi elektrokimia mode elektroliser dan mode <i>fuel cell</i> pada URFC	10
Tabel 2. Spesifikasi dan kinerja dari campuran lapisan katalis yang berbeda pada URFC.....	11
Tabel 3. Tabel <i>scan rate</i> terhadap <i>peak height</i> , <i>base start</i> , dan <i>base end</i>	31
Tabel 4. Parameter impedansi terhadap konduktivitas.....	32
Tabel 5. Data penentuan kinerja MEA berdasarkan kurva I-V dan I-P	33
Tabel 6. Analisis data kinerja URFC.....	35
Tabel 7. Nilai ECSA dari elektroda dengan satu dan tiga lapisan katalis	35
Tabel 8. Konduktivitas listrik dari elektroda dengan satu dan tiga lapisan katalis.....	41
Tabel 9. Komposisi unsur elektroda dengan katalis Pt/C dan Pt-Ru/C.....	43
Tabel 10. RTE pada variasi densitas arus konstan pada URFC MEA	57

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Skema Kerja.....	72
Lampiran 2. Perhitungan Pembuatan <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)	76
Lampiran 3. Perhitungan Katalis Pt/C dan Pt-Ru/C untuk tiga lapisan katalis.....	77
Lampiran 4. Perhitungan Katalis Pt/C dan Pt-Ru/C untuk satu lapisan katalis.....	77
Lampiran 5. Perhitungan Nilai ECSA.....	79
Lampiran 6. Perhitungan Nilai Konduktivitas Listrik.....	83
Lampiran 7. Data Hasil Karakterisasi XRD Pt/C.....	85
Lampiran 8. Data Hasil Karakterisasi XRD Pt-Ru/C.....	86
Lampiran 9. Data Hasil Uji Kinerja pada Mode <i>Fuel Cell</i>	87
Lampiran 10. Perhitungan Laju Produksi Hidrogen	90
Lampiran 11. Alat dan Bahan yang digunakan	92

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketersediaan cadangan bahan bakar fosil semakin terbatas seiring dengan meningkatnya kebutuhan serta konsumsi energi oleh masyarakat di dunia (Yelegen *et al.*, 2023). Terbatasnya cadangan bahan bakar fosil sebagai sumber energi telah mendorong upaya pengembangan teknologi elektrokimia sebagai penyimpanan serta konversi energi, yaitu *fuel cell* dan elektroliser (Kadyk *et al.*, 2023). Perangkat elektrokimia *fuel cell* memiliki efisiensi konversi energi yang tinggi tanpa adanya polusi suara dan udara (Ren *et al.*, 2020). Namun, *fuel cell* memiliki kendala, yaitu kurangnya infrastruktur dalam produksi hidrogen sebagai bahan bakar *fuel cell*. *Fuel cell* dan unit produksi hidrogen harus diintegrasikan untuk mencapai produksi hidrogen yang efisien dan ekonomis. Hidrogen dapat dihasilkan dari bahan baku terbarukan, seperti air, kemudian air digunakan dalam proses elektrolisis untuk dipecah menjadi molekul hidrogen dan oksigen (Malik *et al.*, 2023). Oleh karena itu, terdapat perangkat tunggal yang saat ini menjadi fokus penelitian dengan menggabungkan mode elektrolisis atau elektroliser (pengisian ulang hidrogen) dan mode *fuel cell* (pembangkit listrik) sebagai konversi dan penyimpanan energi yang disebut dengan *unitized regenerative fuel cell* (URFC) (Rocha *et al.*, 2023).

Salah satu komponen terpenting dalam URFC, yaitu *membrane electrode assembly* (MEA) yang merupakan pusat reaksi elektrokimia (reaksi sel volta maupun sel elektrolisis). Komponen MEA terdiri dari dua lapisan katalis (katoda dan anoda) dan *proton exchange membrane* (PEM). Optimalisasi komponen serta metode pembuatan MEA penting untuk meningkatkan kinerja URFC. Dalam perangkat elektrokimia URFC, persiapan MEA secara signifikan mempengaruhi kinerja sel (Eun *et al.*, 2019). Oleh karena itu, perlu dilakukan pengujian dengan membandingkan metode preparasi MEA berdasarkan target penempelan katalis dan metode pelapisan katalis sehingga menemukan MEA yang menghasilkan kinerja tinggi pada URFC.

Proses pembuatan MEA berdasarkan target penempelan katalis, dibagi

menjadi dua metode, yaitu metode *catalyst coated substrate* (CCS) dan *catalyst coated membrane* (CCM). Pada metode CCS, elektroda difusi gas (GDE) atau elektroda diperoleh dengan menempelkan lapisan katalis atau *catalyst layers* (CL) ke atas *gas diffusion layers* (GDL), kemudian PEM diapit diantara dua elektroda, untuk membentuk MEA dengan pengepresan panas. Metode CCS memiliki keunggulan tertentu, yaitu proses persiapannya relatif sederhana, dan PEM tidak membengkok atau berubah bentuk. Dalam metode CCM, CL diterapkan pada kedua sisi PEM, diikuti dengan penempatan GDL katoda dan anoda pada kedua CL untuk membentuk MEA tipe CCM. Penggunaan metode CCM dapat mencapai peningkatan penggunaan katalis yang efektif dan penurunan resistensi transpor proton yang signifikan pada antarmuka PEM atau CL (Li *et al.*, 2024).

Pembuatan MEA menggunakan metode CCM berbeda dengan metode CCS, seperti yang telah dilakukan pada penelitian Rahmah (Rahmah *et al.*, 2021) hanya terdapat satu lapisan katalis. Pada lapisan katalis tersebut terdapat *polytetrafluoroethylene* (PTFE) dan *nafion solution*. Seharusnya, PTFE berada di dekat dengan GDL yang juga mengandung PTFE. Namun, PTFE harus disintering agar terdistribusi merata. Tantangan yang didapatkan apabila lapisan katalis hanya satu lapisan, yaitu sintering tidak dapat dilakukan karena *nafion solution* tidak tahan terhadap suhu tinggi, sehingga PTFE masih terakumulasi. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan solusi pembuatan MEA dengan metode CCS yang mana lapisan katalis pada elektrodanya terdiri dari tiga lapisan, yaitu lapisan katalis pertama terdiri atas komponen utama katalis dan PTFE, lapisan kedua dengan komponen utama katalis dan *nafion solution*, serta lapisan katalis ketiga berupa *nafion solution*.

Lapisan elektroda pada MEA yang dibuat dengan metode CCS pada penelitian ini terdiri atas tiga lapisan, yaitu lapisan pertama berupa *backing layer* (BL), lapisan kedua berupa *macro porous layer* (MPL) dan lapisan ketiga berupa lapisan katalis. Gabungan antara BL dan MPL selanjutnya dinamakan GDL. Tinta katalis lapisan pertama (katalis, 2-propanol, dan PTFE) ditempelkan pada permukaan GDL, lapisan kedua berupa tinta katalis lapisan kedua (katalis, 2-propanol, dan *nafion solution*) ditempelkan pada lapisan pertama, dan lapisan ketiga berupa pelapisan *nafion solution* pada lapisan ketiga. Lapisan pertama yang

ditempelkan pada GDL bertujuan untuk mengurangi rintangan antarmuka karena permukaan pertama GDL juga mengandung PTFE. Lapisan kedua yang mengandung nafion *solution* ditempatkan lebih dekat dengan membran, sementara lapisan ketiga berupa lapisan nafion *solution* mengurangi rintangan antar muka antara lapisan kedua dan membran elektrolit. Hal ini akan mengatasi salah satu kelemahan utama pada pembuatan MEA metode CCS pada penelitian Rahmah (Rahmah *et al.*, 2021).

Terdapat tantangan utama dalam pengembangan MEA pada URFC yaitu menemukan dan merancang katalis yang efisien serta tahan terhadap kondisi pengoperasian URFC. Pada mode elektroliser, katalis elektroda positif dan negatif harus memiliki aktivitas katalitik yang baik terhadap katalisis reaksi evolusi oksigen (OER) dan reaksi evolusi hidrogen (HER), kemudian saat URFC beroperasi dalam mode *fuel cell*, katalis pada elektroda positif dan negatif harus memiliki kemampuan yang tinggi untuk mengkatalisis reaksi reduksi oksigen (ORR) dan reaksi oksidasi hidrogen (HOR). Hal ini menandakan bahwa katalis yang sama harus mempunyai sifat bifungsional yang baik untuk mengkatalisis sepasang reaksi yang terjadi pada elektroda positif (ORR/OER) dan sepasang reaksi yang terjadi pada elektroda negatif (HOR/HER) (Mladenovic *et al.*, 2023).

Salah satu katalis yang paling efektif untuk proses HER yang lamban, yaitu katalis Pt/C karena katalis Pt/C memiliki energi adsorpsi hidrogen yang optimal, energi *overpotential* yang rendah, dan kinetika yang cepat. Bahan pendukung Pt berupa karbon sangat konduktif, sehingga dapat memfasilitasi transfer elektron yang dapat meningkatkan kinerja dan selektivitas katalitik (Jiang *et al.*, 2024). Pengembangan elektrokatalis berbasis Pt dengan satu atau lebih logam sebagai paduan dan bentuk struktur nano lainnya bisa menjadi strategi yang menjanjikan untuk mengatasi masalah kinerja katalitik untuk ORR dan OER. Khususnya, rutenium (Ru) dan iridium (Ir) adalah elemen sekunder paling aktif dengan Pt untuk meningkatkan elektrokatalitik bifungsional oksigen menuju ORR dan OER (Ravichandran *et al.*, 2022). Material Ru, Ir dan oksidanya diperlukan sebagai katalis dalam pembuatan elektroda OER untuk menghindari degradasi yang cepat selama pengoperasian dalam mode elektroliser pada URFC (Wang *et al.*, 2023). Katalis Ir langka dan mahal, sehingga Ru dianggap sebagai katalis yang baik untuk

menggantikan Ir karena lebih aktif untuk OER pada mode elektroliser dan jauh lebih murah (Hrbek *et al.*, 2022).

Penelitian Hassan (Hassan *et al.*, 2022) membuat elektroda oksigen pada URFC menggunakan metode CCS dengan menyemprotkan katalis Pt-IrOx di atas kertas karbon sebagai elektroda oksigen dan Pt-Ru/C untuk elektroda hidrogen. Nilai *Round trip efficiency* (RTE) URFC didapatkan sebesar 48% sebelum degradasi awal. Setelah degradasi awal, diperoleh RTE sebesar 44%. Pada akhir siklus RTE akhir bernilai 41% pada 500 mA/cm². Pembuatan elektroda pada penelitian Urbina (Urbina *et al.*, 2023) menggunakan metode CCM langsung melalui pencetakan inkjet dengan printer yang diendapkan pada membran Nafion (N212, Ionpower). Rasio Pt terhadap IrOx pada elektroda oksigen divariasikan dari 1:1, 3:1, dan 9:1 (Pt:IrOx), sedangkan elektroda hidrogen menggunakan katalis Pt/C. Hasil nilai RTE URFC didapatkan sebesar 47, 50,6, dan 48,7% pada 500 mA/cm² untuk rasio masing-masing 1:1, 3:1, dan 9:1 (Pt:IrOx).

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka penelitian ini menggunakan katalis Pt/C sebagai elektroda hidrogen dan katalis Pt-Ru/C sebagai elektroda oksigen dengan loading katalis keduanya sebesar 1 mg/ cm² serta pembuatan MEA menggunakan metode *catalyst coated membrane* (CCM) dan *catalyst coated substrate* (CCS) dengan teknik *spraying*. Elektroda dengan metode CCS yang dibuat akan dikarakterisasi dengan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan metode *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS), *X-Ray Diffraction* (XRD), dan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Sementara MEA CCS yang dibuat dengan elektroda satu dan tiga lapisan katalis serta MEA CCM dengan tiga lapisan katalis akan dianalisis ketebalannya dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Sementara itu, kinerja dari MEA yang dibuat dengan dua metode (CCM dan CCS) dikarakterisasi dengan metode melalui *Open Circuit Voltage* (OCV) dan kurva polarisasi serta densitas daya yang dihasilkan pada densitas arus yang bervariasi dalam mode *fuel cell*, sementara dalam mode elektrolisis akan dilakukan analisis laju produksi hidrogen yang dihasilkan, serta nilai RTE pada masing-masing MEA CCS dengan elektroda satu dan tiga lapisan katalis dan MEA CCM dengan tiga lapisan katalis.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana perbedaan karakteristik elektroda dengan metode CCS tiga lapisan katalis dan satu lapisan katalis dengan katalis Pt-Ru/C dan Pt/C yang dibuat dengan metode CCS melalui analisis menggunakan metode CV, EIS, XRD, dan XRF serta karakteristik MEA CCS dengan elektroda tiga lapisan katalis, satu lapisan katalis dan MEA CCM tiga lapisan katalis melalui analisis SEM?
2. Bagaimana perbandingan kinerja MEA CCS dengan elektroda tiga lapisan katalis, satu lapisan katalis dan MEA CCM tiga lapisan katalis pada *stack* URFC melalui analisis OCV, kurva polarisasi, densitas daya yang dihasilkan pada densitas arus yang bervariasi, laju produksi hidrogen, dan nilai RTE yang dihasilkan?

1.3 Hipotesis Penelitian

1. Penyemprotan atau *spraying* tinta katalis pada GDL lebih efektif dibandingkan pada membran karena lapisan Pt yang dibentuk dengan penyemprotan ke GDL menunjukkan permukaan yang lebih homogen dan berpori dibandingkan yang disemprotkan ke membran sehingga mencegah URFC dari *flooding* pada kepadatan arus tinggi dalam mode *fuel cell* (Bhosale *et al.*, 2020).
2. MEA yang dibuat dengan metode CCM dapat meningkatkan antarmuka langsung antara katalis dengan membran dan pemanfaatan katalis yang lebih baik dibandingkan metode CCS (Bhosale *et al.*, 2020).
3. Penggunaan dua metode penempelan katalis (CCM dan CCS) memengaruhi karakter dan kinerja dari MEA (Eun *et al.*, 2019).
4. Metode elektroda lapisan katalis terdiri dari tiga lapisan lebih baik dibandingkan dengan satu lapisan, karena mengurangi rintangan antarmuka antara lapisan katalis dengan GDL dan membran elektrolit.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Mengkaji karakteristik elektroda dengan metode CCS tiga lapisan katalis dan satu lapisan katalis dengan katalis Pt-Ru/C dan Pt/C yang dibuat dengan metode CCS melalui analisis menggunakan metode CV, EIS, XRD, dan XRF

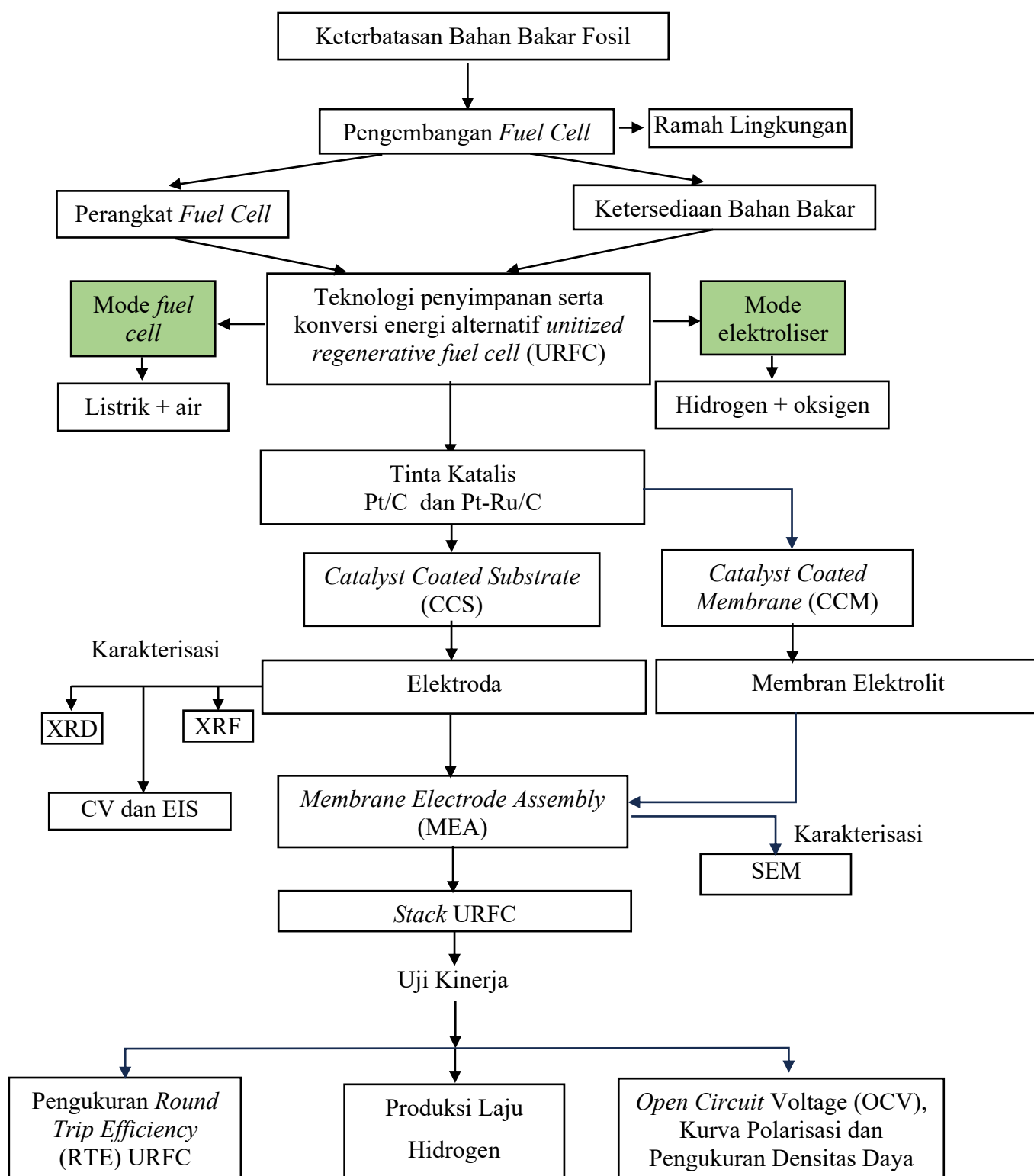
serta karakteristik MEA CCS dengan elektroda tiga lapisan katalis, satu lapisan katalis dan MEA CCM tiga lapisan katalis melalui analisis SEM.

2. Mengukur kinerja MEA CCS dengan elektroda tiga lapisan katalis, satu lapisan katalis dan MEA CCM tiga lapisan katalis pada *stack* URFC melalui analisis OCV, kurva polarisasi, densitas daya yang dihasilkan pada densitas arus yang bervariasi, laju produksi hidrogen, dan nilai RTE yang dihasilkan.

1.5 Manfaat penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah menemukan kinerja terbaik antara MEA metode CCM dan CCS pada *stack* URFC dengan katalis Pt-Ru/C dan Pt/C sehingga dapat digunakan sebagai konversi dan penyimpanan energi dengan efisien tinggi.

1.6 Kerangka Berpikir



DAFTAR PUSTAKA

- A.Fouad, A., El-Sonbati, A. Z., Diab, M. A., R.Elsayad, M., & Gomaa, E. A. (2024). Thermodynamic Solvation Parameters, Cyclic Voltammetry for CdBr₂ in Sodium Chloride Supporting Electrolyte Alone and in Interaction with Succinic Acid Solutions with Tafel Slopes Application. *Journal of Molecular Liquids*, 399(March), 124368. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124368>
- Abdel-Motagali, A., Al Bacha, S., M. A. El Rouby, W., Bigarré, J., & Millet, P. (2023). Evaluating the Performance of Hybrid Proton Exchange Membrane for PEM Water Electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.330>
- Alabbadi, A. A., & AlZahrani, A. A. (2024). Nuclear Hydrogen Production Using PEM Electrolysis Integrated with APR1400 power plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 60(December 2023), 241–260. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.133>
- Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). X-Ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. *Minerals*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/min12020205>
- Allegretta, I., Legrand, S., Alfeld, M., Gattullo, C. E., Porfido, C., Spagnuolo, M., Janssens, K., & Terzano, R. (2022). SEM-EDX Hyperspectral Data Analysis for the Study of Soil Aggregates. *Geoderma*, 406(October 2021), 115540. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115540>
- Arzaee, N. A., Mohamad Noh, M. F., Halim, A. A., Faizal Abdul Rahim, M. A., Haziqah Mohd Ita, N. S., Mohamed, N. A., Farhana Mohd Nasir, S. N., Ismail, A. F., & Mat Teridi, M. A. (2021). Cyclic Voltammetry - a Promising Approach Towards Improving Photoelectrochemical Activity of Hematite. *Journal of Alloys and Compounds*, 852. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156757>
- Ashdot, A., Kattan, M., Kitayev, A., Tal-Gutelmacher, E., Amel, A., & Page, M. (2021). Design Strategies for Alkaline Exchange Membrane–Electrode Assemblies: Optimization for Fuel Cells and Electrolyzers. *Membranes*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/membranes11090686>
- Bhosale, A. C., Ghosh, P. C., & Assaud, L. (2020). Preparation Methods of Membrane Electrode Assemblies for Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Unitized Regenerative Fuel Cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 133). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110286>
- Bilo, F., Cirelli, P., & Borgese, L. (2024). Elemental Analysis of Particulate Matter by X-Ray Fluorescence Methods: a Green Approach to Air Quality Monitoring. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 170(11), 117427. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117427>
- Bredar, A. R. C., Chown, A. L., Burton, A. R., & Farnum, B. H. (2020). Electrochemical Impedance Spectroscopy of Metal Oxide Electrodes for

- Energy Applications. *ACS Applied Energy Materials*, 3(1), 66–98. <https://doi.org/10.1021/acsaem.9b01965>
- Cammarata, A., & Mastropasqua, L. (2023). Theoretical Analysis of Mixed Open-Circuit Potential for High Temperature Electrochemical Cells Electrodes. *Frontiers in Energy Research*, 11(May), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1120343>
- Chattot, R., Mirolo, M., Martens, I., Kumar, K., Martin, V., Gasmi, A., Dubau, L., Maillard, F., Castanheira, L., & Drnec, J. (2023). Beware of Cyclic Voltammetry! Measurement Artefact in Accelerated Stress Test of Fuel Cell Cathode Revealed by Operando X-Ray Diffraction. *Journal of Power Sources*, 555(September 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232345>
- Chen, W., Meng, K., Zhou, H., Zhou, Y., Deng, Q., & Chen, B. (2023). Optimization Research on Round-Trip Efficiency of A CHP System Based on 10 Kw-Grade Unitized Regenerative Fuel Cell. *Energy Conversion and Management*, 280(01), 116800. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116800>
- Choi, M., Kim, J. K., Kim, J., Yang, S., Park, J. E., Kim, O. H., & Cho, Y. H. (2018). PtRu/C Catalyst Slurry Preparation for Large-Scale Decal Transfer with High Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *RSC Advances*, 8(63), 36313–36322. <https://doi.org/10.1039/c8ra07754a>
- Elgrishi, N., Rountree, K. J., McCarthy, B. D., Rountree, E. S., Eisenhart, T. T., & Dempsey, J. L. (2018). A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry. *Journal of Chemical Education*, 95(2), 197–206. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00361>
- Eon Chae, J., Choi, J., Lee, S., Park, C., & Kim, S. (2023). Effects of Fabrication Parameters of Membrane–Electrode Assembly for High-Performance Anion Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, November. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.11.063>
- Eun, J., Karuppannan, M., Joong, O., & Cho, Y. (2019). Development of High-Performance Membrane-Electrode Assembly in Unitized Regenerative Fuel Cells. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 80, 527–534. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.08.029>
- Feng, L., Li, K., Chang, J., Liu, C., & Xing, W. (2015). Nanostructured PtRu/C Catalyst Promoted by Cop as an Efficient and Robust Anode Catalyst in Direct Methanol Fuel Cells. *Nano Energy*, 15, 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.05.007>
- Goodship, V., Middleton, B., & Cherrington, R. (2016). Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality. In R. Cherrington & J. Liang (Eds.), *Elsevier*. William Andrew. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-34061-8.00002-8>
- Gulotta, T. M., Salomone, R., Mondello, G., Saija, G., & Lanuzza, F. (2023). Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of a unitized regenerative fuel cell

- stack: a preliminary study. *Innovation, Quality and Sustainability for a Resilient Circular Economy. The Role of Commodity*, 901(08), 166007. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166007>
- Guo, Q., Guo, H., Ye, F., & Ma, C. F. (2023). Experimental and Numerical Studies of Mode Switching Performance and Water Transfer in Unitized Regenerative Fuel Cells with Different Channel Structures. *Energy Conversion and Management*, 280(February), 116810. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116810>
- Handayani, N. A., Krisanti, E. A., Kartohardjono, S., & Mulia, K. (2020). Cyclic Voltammetry and Oxidation Rate Studies of Ferrous Gluconate Complex Solutions for Preparation of Chitosan-Tripolyphosphate Microparticles. *Journal of Chemistry*, 2020(i). <https://doi.org/10.1155/2020/3417204>
- Hassan, N., N., Ganesan, P., Lando, A. A., Mustain, W. E., & Colón-Mercado, H. R. (2022). Stable, High-Performing Bifunctional Electrodes for Anion Exchange Membrane-Based Unitized Regenerative Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, 541(April). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231599>
- Holder, C. F., & Schaak, R. E. (2019). Tutorial on Powder X-ray Diffraction for Characterizing Nanoscale Materials. *ACS Nano*, 13(7), 7359–7365. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b05157>
- Hosseini, M. G., & Mahmoodi, R. (2017). The Comparison of Direct Borohydride-Hydrogen Peroxide Fuel Cell Performance with Membrane Electrode Assembly Prepared by Catalyst Coated Membrane Method and Catalyst Coated Gas Diffusion Layer Method Using Ni@Pt/C as Anodic Catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(15), 10363–10375. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.022>
- Hrbek, T., Kůš, P., Košutová, T., Veltruská, K., Dinhová, T. N., Dopita, M., Matolín, V., & Matolínová, I. (2022). Sputtered Ir–Ru Based Catalysts for Oxygen Evolution Reaction: Study of Iridium Effect on Stability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(49), 21033–21043. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.224>
- Ikani, N., Pu, J. H., & Cooke, K. (2024). Analytical Modelling and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) to Evaluate Influence of Corrosion Product on Solution Resistance. *Powder Technology*, 433(November 2023), 119252. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119252>
- Jiang, B., Liu, S., Cheng, L., Zhou, L., Cui, H., Liu, M., Wen, M., Wang, C., Wang, W., Li, S., & Sun, X. (2024). Mass Synthesis of Pt/C Catalysts with High Pt Loading for Low-Overpotential Hydrogen Evolution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 58(November 2023), 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.183>
- Kadyk, T., Sun, Y., Kaur, J., Kulikovskiy, A., & Eikerling, M. (2023). Frequency Response Diagnostics of Electrochemical Energy Devices. *Current Opinion in Electrochemistry*, 42, 101378. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2023.101378>

- Kaur, P., & Guha, A. (2023). Characterization of Atmospheric Aerosols by SEM-EDX in A Rural-Continental Environment-A Seasonal Approach. *Materials Today: Proceedings*, 30(6). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.144>
- Klinge, M., Britton, B., Breitwieser, M., Vierrath, S., Zengerle, R., Holdcroft, S., & Thiele, S. (2016). A Completely Spray-Coated Membrane Electrode Assembly. *Electrochemistry Communications*, 70, 65–68. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2016.06.017>
- Krasnova, A. O., Glebova, N. V., Kastsova, A. G., Rabchinskii, M. K., & Nechitailov, A. A. (2023). Thermal Stabilization of Nafion with Nanocarbon Materials. *Polymers*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/polym15092070>
- Lee, J., Lee, H., Kim, J. H., Pham, T. A., Jang, S., & Kim, S. M. (2023). Investigation of Optimized Spraying Process for Directly Coated Electrode in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, November, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.11.041>
- Li, P., Qiu, D., Peng, L., & Lai, X. (2022). Kw-Grade Unitized Regenerative Fuel Cell Stack Design for High Round-Trip Efficiencies. *Energy Conversion and Management*, 270(09), 116277. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116277>
- Li, P., Qiu, D., Peng, L., Shen, S., & Lai, X. (2022). Analysis of Degradation Mechanism in Unitized Regenerative Fuel Cell Under the Cyclic Operation. *Energy Conversion and Management*, 254(01), 115210. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115210>
- Li, Y., Jiang, G., Yang, Y., Song, W., Yu, H., Hao, J., & Shao, Z. (2023). PtIr/CNT as Anode Catalyst with High Reversal Tolerance in PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(93), 36500–36511. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.144>
- Li, Y., Liu, L., Xing, Y., & Zhang, G. (2024). An Asymmetric Membrane Electrode Assembly for High-Performance Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 55(November 2023), 357–364. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.280>
- Lim, B. H., Majlan, E. H., Tajuddin, A., Husaini, T., Wan Daud, W. R., Mohd Radzuan, N. A., & Haque, M. A. (2021). Comparison of Catalyst-Coated Membranes and Catalyst-Coated Substrate for PEMFC Membrane Electrode Assembly: A Review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 33, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.07.044>
- Liu, G., Peng, S., Hou, F., Wang, X., & Fang, B. (2023). Preparation and Performance Study of the Anodic Catalyst Layer via Doctor Blade Coating for PEM Water Electrolysis. *Membranes*, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.3390/membranes13010024>
- Liu, L., Xing, Y., Fu, Z., Li, Y., Li, Z., & Li, H. (2023). An ePTFE-Reinforced Membrane Electrode Assembly Based on A Wet-Contact Interface Design

- Strategy for High-Performance Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, 575(May), 233221. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233221>
- Lou, F., & Chen, D. (2015). Aligned Carbon Nanostructures Based 3D Electrodes for Energy Storage. *Journal of Energy Chemistry*, 24(5), 559–586. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.08.013>
- Ma, X., Wang, L., Jin, H., Chen, W., Liu, P., Wang, J., & Li, W. (2024). Properties of Gradient Ni-P-PTFE Coatings on Stainless Steel with Different Polytetrafluoroethylene Concentrations. *Thin Solid Films*, 799(December 2023), 140397. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2024.140397>
- Mazzeo, F., Di Napoli, L., & Carello, M. (2024). Assessing Open Circuit Voltage Losses in PEMFCs: A New Methodological Approach. *Energies*, 17(11). <https://doi.org/10.3390/en17112785>
- Meda, U. S., Rajyaguru, Y. V., & Pandey, A. (2023). Generation of Green Hydrogen Using Self-Sustained Regenerative Fuel Cells: Opportunities and Challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(73), 28289–28314. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.430>
- Mei, B. A., Munteshari, O., Lau, J., Dunn, B., & Pilon, L. (2018). Physical Interpretations of Nyquist Plots for EDLC Electrodes and Devices. *Journal of Physical Chemistry C*, 122(1), 194–206. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b10582>
- Mladenovic, D., Mladenovic, A., Santos, D., M., F., Yurtcan, A., B., Miljanic, S., Mentus, S., & Sljukic, B. (2023). Transition Metal Oxides for Bifunctional ORR / OER Electrocatalysis in Unitized Regenerative Fuel Cells. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 946(August). <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117709>
- Morales S., L., Gochi-Ponce, Y., Altamirano-Gutiérrez, A., & Fernández, A. M. (2021). Influence of the Pt_xRuI_y Electrocatalysts Composition Toward Oxygen Evolution and Reduction Reactions For Unitized Regenerative Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(51), 26019–26026. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.197>
- Nánai, L., Szabó, A., Gyulavári, T., Budai, J., & Hernadi, K. (2019). Manual Spray Coating: a Cheap and Effective Method to Build Catalyst Layers for Carbon Nanotube Forest Growth. *Thin Solid Films*, 689(May), 137491. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.137491>
- Niblett, D., Guo, Z., Holmes, S., Niasar, V., & Prosser, R. (2022). Utilization of 3D Printed Carbon Gas Diffusion Layers in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(55), 23393–23410. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.134>
- Noh, H., Park, Y., Bhadouria, A., & Tackett, B. M. (2024). Effects of Electrochemical Active Surface Area Of Cu on Electrochemical CO₂ Reduction in Acidic Electrolyte Using Cu Nanoparticles on Surfactant-Treated

- Carbon. *Journal of Catalysis*, 437(June), 115662. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2024.115662>
- Ouyang, T., Liu, W., Chen, J., Shi, X., & Liang, L. (2024). Revelation Mechanism of Polarisation Process and Strategies for High Performance in Microfluidic Fuel Cells: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 222(December 2023), 125160. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125160>
- P.S., J., & Sutrave, D. S. (2018). A Brief Study of Cyclic Voltammetry and Electrochemical Analysis. *International Journal of ChemTech Research*, 11(9), 77–88. <https://doi.org/10.20902/ijctr.2018.110911>
- Paul, B., & Andrews, J. (2017). PEM Unitised Reversible/Regenerative Hydrogen Fuel Cell Systems: State of the Art and Technical Challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(February), 585–599. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.112>
- Pu, Z., Zhang, G., Hassanpour, A., Zheng, D., Wang, S., Liao, S., Chen, Z., & Sun, S. (2021). Regenerative Fuel Cells: Recent Progress, Challenges, Perspectives and Their Applications for Space Energy System. *Applied Energy*, 283(May 2020), 116376. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116376>
- Qiao, J. N., Guo, H., Chen, H., & Ye, F. (2022). Improving Round-Trip Energy Efficiency of A Unitized Regenerative Fuel Cell by Adopting Staircase Flow Channel and Counter Flow Configuration. *Energy Conversion and Management*, 271(July), 116345. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116345>
- Radestia Rahmah, D., Rohendi, D., Syarif, N., Rachmat, A., Sya'baniah, N. F., & Hawa Yulianti, D. (2021). Characterization of Electrode with Cu₂O-ZnO/C and Pt-Ru/C Catalyst for Electrochemical Reduction CO₂ to CH₃OH. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 6(1), 8–13. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v6.i1.08>
- Rahim Malik, F., Yuan, H. B., Moran, J. C., & Tippayawong, N. (2023). Overview of Hydrogen Production Technologies for Fuel Cell Utilization. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 43, 101452. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101452>
- Ravichandran, S., Bhuvanendran, N., Xu, Q., Maiyalagan, T., Xing, L., & Su, H. (2022). Ordered Mesoporous Pt-Ru-Ir Nanostructures as Superior Bifunctional Electrocatalyst for Oxygen Reduction/Oxygen Evolution Reactions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 608, 207–218. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.09.171>
- Regmi, Y. N., Peng, X., Fornaciari, J. C., Wei, M., Myers, D. J., Weber, A. Z., & Danilovic, N. (2020). A Low Temperature Unitized Regenerative Fuel Cell Realizing 60% Round Trip Efficiency and 10 000 Cycles of Durability for Energy Storage Applications. *Energy and Environmental Science*, 13(7), 2096–2105. <https://doi.org/10.1039/c9ee03626a>

- Ren, X., Wang, Y., Liu, A., Zhang, Z., Lv, Q., & Liu, B. (2020). Current Progress and Performance Improvement of Pt/C Catalysts for Fuel Cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(46), 24284–24306. <https://doi.org/10.1039/d0ta08312g>
- Rocha, A., Ferreira, R. B., Falcão, D. S., & Pinto, A. M. F. R. (2023). Experimental Study on A Unitized Regenerative Fuel Cell Operated in Constant Electrode Mode: Effect of Cell Design And Operating Conditions. *Renewable Energy*, 215(May), 0–10. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.128>
- Rohendi, D., Majlan, E. H., Yulianti, D. H., Juwita, Syarif, N., Rachmat, A., Sumboja, A., Nyimas, F. S., & Amelia, I. (2024). Performance of Membrane Electrode Assembly Using Pt/C and CoFe/N-C Catalystsin Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 28(2), 388–396.
- Roy, A., & G, S. R. A. (2022). A Review on X-Ray Diffraction. *International Journal of Pharmaceutical Research and Applications*. 7(2), 786–788. <https://doi.org/10.35629/7781-0702786788>
- Sebbahi, S., Assila, A., Alaoui Belghiti, A., Laasri, S., Kaya, S., Hlil, E. K., Rachidi, S., & Hajjaji, A. (2024). A Comprehensive Review of Recent Advances in Alkaline Water Electrolysis for Hydrogen Production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 82(August), 583–599. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.428>
- Shang, Y., Han, L., Ding, R., Li, Y., Liang, Q., & Guo, Z. (2024). Enhancing PEMFC Performance at High Current Density by Incorporating PTFE Emulsion Into Catalytic Layer. *Journal of Power Sources*, 623(June), 235462. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235462>
- Soleimani, A., & Gorgani. (2016). Printing on Polymers: Fundamentals and Applications. In J. Izdebska & S. Thomas (Eds.), *Elsevier*. William Andrew. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37468-2.00014-2>
- Song, H., Shao, X., Zhang, H., Jiang, P., Wen, X., & Zhan, Z. (2024). Effects of Nafion Content in the Catalyst Layer of PEMFC on the Transport Phenomenon Among Nanoscale Particles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 67(December 2023), 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.115>
- Thangarasu, S., Jung, H. Y., Wee, J. H., Kim, Y. A., & Roh, S. H. (2021). A New Strategy of Carbon – Pb Composite As A Bipolar Plate Material for Unitized Regenerative Fuel Cell System. *Electrochimica Acta*, 391(07), 138921. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138921>
- Turtayeva, Z., Xu, F., Celzard, A., & Maranzana, G. (2022). Manufacturing Catalyst-Coated Membranes by Ultrasonic Spray Deposition for PEMFC : Identification of Key Parameters and Their Impact on PEMFC Performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.043>
- Urbina, L. P., Liu, J., Semagina, N., & Secanell, M. (2023). Low Loading Inkjet

- Printed Bifunctional Electrodes for Proton Exchange Membrane Unitized Regenerative Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, 580(May), 233448. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233448>
- Vediyappan, V., Lai, Q., Fujisaki, T., Andrews, J., Sone, Y., Kwati, L., & Matsumoto, H. (2024). Pressurized Water Electrolysis Using Hydrophobic Gas Diffusion Layer With a New Electrolyzer Cell Structure. *Solid State Ionics*, 416(January), 116678. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2024.116678>
- Vermaak, L., Neomagus, H. W. J. P., & Bessarabov, D. G. (2021). The CO Tolerance of Pt/C and Pt-Ru/C Electrocatalysts in a High-Temperature Electrochemical Cell Used for Hydrogen Separation. *Membranes*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/membranes11090670>
- Wang, H., Zhang, Y., Jin, P., Cai, X., Du, J., Zhang, W., Wang, H., & Li, R. (2024). Dynamic Thermodynamic Performance Analysis of A Novel Pumped Thermal Electricity Storage (N-PTES) System Coupled With Liquid Piston. *Journal of Energy Storage*, 84(PB), 110836. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110836>
- Wang, Q., Zheng, W., Li, B., Zheng, J. P., Cui, G., Hao, L., & Ming, P. (2024). Simulation-Based Study of Local Hydrogen Crossover Dynamics and Their Effects on Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Chemical Engineering Journal*, 499(June), 156408. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156408>
- Wang, Q., Zhou, Y. W., Jin, Z., Chen, C., Li, H., & Cai, W. Bin. (2021). Alternative Aqueous Phase Synthesis of A PtRu/C Electrocatalyst for Direct Methanol Fuel Cells. *Catalysts*, 11(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/catal11080925>
- Wang, S., Weber, A. Z., & Peng, X. (2023). Advances and Prospects to Achieve High-Performing and Durable Proton-Exchange-Membrane Unitized Regenerative Fuel Cells. *Current Opinion in Electrochemistry*, 40, 101340. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2023.101340>
- Wang, Y., Leung, D. Y. C., Xuan, J., & Wang, H. (2016). A Review on Unitized Regenerative Fuel Cell Technologies, Part-A: Unitized Regenerative Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 961–977. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.046>
- Xu, G., Du, X., Ding, W., Ma, S., Zhang, L., Li, J., Huang, J., Song, J., & Liang, D. (2024). Nano-Pd Loaded Composite Membrane for Reduced Hydrogen Crossover in Proton Exchange Membrane Water Electrolysis via Recasting Method. *Renewable Energy*, 235(April). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121285>
- Yelegen, N., Kümük, B., Kaplan, R. N., İlbaş, M., & Kaplan, Y. (2023). Numerical and Experimental Studies on Unitized Regenerative Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(35), 12969–12981. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.210>
- Yoon, H., Matteini, P., & Hwang, B. (2023). Effect of the Blade-Coating Conditions on the Electrical and Optical Properties of Transparent Ag Nanowire Electrodes. *Micromachines*, 14(1), 1–6.

<https://doi.org/10.3390/mi14010114>

- Yu, J., He, Q., Yang, G., Zhou, W., Shao, Z., & Ni, M. (2019). Recent Advances and Prospective in Ruthenium-Based Materials for Electrochemical Water Splitting. *ACS Catalysis*, 9(11), 9973–10011. <https://doi.org/10.1021/acscatal.9b02457>
- Yuan, X.-Z., Song, C., Haijiang, W., & Zhang, J. (2010). *Electrochemical Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells*. Springer.
- Zabara, M. A., Katırcı, G., Civan, F. E., Yürüm, A., Gürsel, S. A., & Ülgüt, B. (2024). Insights Into Charge Transfer Dynamics of Li Batteries Through Temperature-Dependent Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Utilizing Symmetric Cell Configuration. *Electrochimica Acta*, 485. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144080>
- Zhang, S., Wang, Z., Zhang, R., He, Y., & Cen, K. (2023). Comprehensive Study and Optimization of Membrane Electrode Assembly Structural Composition in Proton Exchange Membrane Water Electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(91), 35463–35476. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.280>
- Zhang, X., Zhao, Y., Xu, L., Hu, Z., Zhao, G., Sun, H., Li, J., & Ouyang, M. (2022). Polarization Decomposing of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Considering Liquid Water Accumulation. *Journal of The Electrochemical Society*, 169(12), 124517. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/aca6a8>