

**PENGARUH KOMPOSISI Pt:Fe PADA KATALIS Pt-Fe/C TERHADAP  
PRODUKSI HIDROGEN DENGAN ELEKTROLISIS AIR BERBASIS  
MEMBRAN PENUKAR PROTON (PEMWE)**

**SKRIPSI**

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



**Oleh:**

**SALSABILLA NABIGHA**

**08031282126035**

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

**2025**

## HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi dengan judul “Pengaruh Komposisi Pt:Fe pada Katalis Pt-Fe/C Terhadap Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Air Berbasis Membran Penukar Proton (PEMWE)” telah diseminarkan di hadapan Tim Penguji Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 10 Januari 2025 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, 11 Januari 2025

Ketua:

1. Fahma Riyanti, M.Si.

NIP. 197204082000032001

(  )

Anggota:

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

NIP. 196704191993031001

(  )

2. Dr. Heni Yohandini Kusumawati. M.Si.

NIP. 197011152000122004

(  )

3. Dr. Neza Rahayu Palapa, M.Si.

NIP. 199505292022032017

(  )

Mengetahui,

Dekan FMIPA  
  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA  
FAKULTAS  
MATEMATIKA DAN  
ILMU PENGETAHUAN ALAM

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

NIP. 197111191997021001

Ketua Jurusan Kimia  
  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA  
JURUSAN  
KIMIA  
FAKULTAS  
MATEMATIKA DAN  
ILMU PENGETAHUAN ALAM

Prof. Dr. Muharni, M.Si.

NIP. 196903041994122001

**HALAMAN PENGESAHAN**

**PENGARUH KOMPOSISI Pt:Fe PADA KATALIS Pt-Fe/C TERHADAP  
PRODUKSI HIDROGEN DENGAN ELEKTROLISIS AIR BERBASIS  
MEMBRAN PENUKAR PROTON (PEMWE)**

**SKRIPSI**

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

Oleh:

**SALSABILLA NABIGHA**

**08031282126035**

Indralaya, 11 Januari 2025

Menyetujui,

**Pembimbing I**

**Pembimbing II**



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

**NIP. 196704191993031001**



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

**NIP. 197011152000122004**

Mengetahui,

**Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



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

**NIP. 197111191997021001**

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Salsabilla Nabigha

NIM : 08031282126035

Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia

Menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri dan karya ilmiah ini belum pernah diajukan sebagai pemenuhan persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana (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, 11 Januari 2025

Penulis



Salsabilla Nabigha

NIM. 08031282126035

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

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

Nama : Salsabilla Nabigha

NIM : 08031282126035

Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia

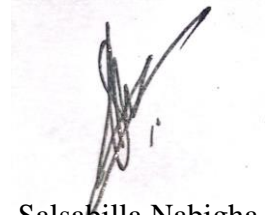
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “hak bebas royalti non-eksklusif (*non-exclusively royalty-free right*) atas karya ilmiah yang berjudul: “Pengaruh Komposisi Pt:Fe pada Katalis Pt-Fe/C Terhadap Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Air Berbasis Membran Penukar Proton (PEMWE)”. Dengan hak bebas royalti non-eksklusif ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih, edit/memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tugas akhir atau skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sungguh- sungguhnya.

Indralaya, 11 Januari 2025

Penulis



Salsabilla Nabigha

NIM. 08031282126035

## **HALAMAN PERSEMBAHAN**

“You can’t skip chapters, that’s not how life work. You have to read every line, meet every character. You won’t enjoy all of it. Some chapters will make you cry for weeks. You will read things you don’t want to read, you will have moments when you don’t want the pages to end. But you have to keep going. Stories keep the world revolving. Live yours, don’t miss out”

**-Unknown-**

“And He is with you wherever you are”

**(QS. Al-Hadid: 4)**

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur hanyalah milik Allah SWT karena berkat rahmat, pertolongan dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “Pengaruh Komposisi Pt:Fe pada Katalis Pt-Fe/C Terhadap Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Air Berbasis Membran Penukar Proton (PEMWE)”. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains pada Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.

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

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orangtuaku Abi Supawit dan Umi Setia Wati yang telah berkorban menemani tiap langkah dan prosesku, memberikan segala dukungan, motivasi serta semangat hingga penulis mencapai tahap ini. No words could ever suffice to express my love for Umi dan Abi.
2. Kedua adikku Athiyya Fitri Nawwafa dan M. Athala Mahardika yang telah banyak memberikan keceriaan dan kehangatan walaupun tidak ditunjukkan. I got a good siblings, grow to maturity and encourage each other, always.
3. Bapak Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya.
4. Ibu Prof. Muharni, M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
5. Bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si. selaku Sekretaris Jurusan Kimia
6. Ibu Fahma Riyanti, M.Si. dan Ibu Dr. Neza Rahayu Palapa, M.Si. selaku pembahas seminar hasil dan penguji sidang sarjana penulis.

7. Kak Nyimas Febrika Sya'baniah atau Kak Reka selaku mentor, kakak, teman, yang telah banyak sekali memberikan ilmu, bimbingan dan kesabarannya selama proses penyelesaian karya ilmiah ini.
8. Kakak-kakak mentor di PUR (Kak Reka, Kak Dwi, Kak Yollan, Kak Hawa), terima kasih banyak atas semua ilmu, bimbingan, dukungan dan motivasi selama proses penelitian berlangsung hingga karya ilmiah ini dapat selesai.
9. Kak Iin dan Mbak Novi selaku admin Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya yang telah memberikan banyak bantuan dan pengertiannya selama proses perkuliahan berlangsung hingga lulus.
10. Keluarga besar Azizur Khan dan Wangsit, terima kasih telah memberikan dukungan selama penulis menjalani perkuliahan.
11. PUR 21 Gang (Diana, Cia, Agnes, Yanti, Vina, Dera, Raihan), terima kasih atas dukungan, semangat dan suka duka kalian untuk satu sama lain selama proses penelitian di PUR. I am so thankful to have the chance to work alongside you!
12. PKG Squad (Diana, Sabil, Sodifa, Mutiah, Winda, Widya, Adel, Savir), terima kasih atas semua tawa, sedih, makanan, rahasia dan memori yang kita bagikan satu sama lain. Terima kasih telah menjadi bagian dari kehidupan hectic penulis dan memberikan dukungan terbaik untuk penulis. From strangers to the gang, from friends to best friends. Love you guys, always.
13. Kunyuk Ogeb (Cae, Tasya, Silvi), terima kasih telah menjadi tempat berkeluh kesah serta tempat berbagi kesedihan dan kebahagiaan. Terima kasih telah menjadi sahabat penulis, my charging station, you guys are such an incredible part of writer's life.
14. Ngirup Cuko Gang (Yayak, Nisa, Gede, Ozi), terima kasih telah menemani masa huru-hara perkuliahan penulis dari maba hingga tahap ini, sukses buat kita semua guys!
15. Diana Oktarina, terima kasih telah menjadi teman seperjuangan penulis yang selalu memberikan nasihat, mengingatkan perkara kebaikan serta dukungannya baik material maupun moril, sukses buat Didi!
16. Keluarga besar Lawrensium, terima kasih atas segala suka duka yang telah dilewati selama perkuliahan, see you on top guys!

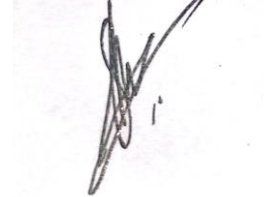


17. Untuk seseorang, thank you for all the days you made me feel loved and appreciated. Thank you for coming into writer's life!
18. Last but not least kepada diri penulis, Salsabilla Nabigha, I know things have been tough for you and you have shattered into pieces many times, I am incredibly proud of you that you still have not given up, and remember you had so many people who loved you.

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

Indralaya, 11 Januari 2025

Yang menyatakan,



Salsabilla Nabigha

NIM. 08031282126035

**SUMMARY**  
**EFFECT OF Pt:Fe COMPOSITION IN Pt-Fe/C CATALYST ON**  
**HYDROGEN PRODUCTION BY WATER ELECTROLYSIS BASED ON**  
**PROTON EXCHANGE MEMBRANE (PEMWE)**

Salsabilla Nabigha, supervised by Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D

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

+ 97 pages, 15 figures, 6 tables, 14 appendices.

Pt-Fe/C catalyst composition ratio of Pt:Fe = 1:0; 1:3; 1:1; 3:1 and 0:1 was successfully synthesized using impregnation and ball milling method. Pt-Fe/C catalyst was sprayed on the surface of Gas Diffusion Layer (GDL) in the form of ink to form Catalyst Layer (CL), spraying was done three times until Pt-Fe/C electrode was formed. The formed Pt-Fe/C electrodes were characterized using Cyclic Voltammetry (CV), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), and Linear Sweep Voltammetry (LSV) methods. CV and LSV characterization aims to determine the electrochemical properties of the electrode, while EIS characterization aims to determine the conductivity of the electrode. The results of CV characterization obtained the highest ECSA value in the 1:0 composition of 2,11 m<sup>2</sup>/g. The results of EIS characterization obtained the highest conductivity value in the composition 1:0 of 0,09 S / cm. The results of LSV characterization obtained the highest Q value in the 1:0 composition of 0,015 C. After the characterization process, the electrodes were assembled into Membrane Electrode Assembly (MEA) with other components and electrolysis was carried out to determine the hydrogen production rate of each MEA. The results showed that the best MEA to produce hydrogen is fastest in the composition of 0:1 with a current of 2 A in 92 seconds with 2,7 mL/s hydrogen production rate.

Keywords: Pt-Fe/C catalyst, MEA, PEMWE, Hydrogen Production Rate

Citation: 86 citations (2015-2024)

## RINGKASAN

### **PENGARUH KOMPOSISI Pt:Fe PADA KATALIS Pt-Fe/C TERHADAP PRODUKSI HIDROGEN DENGAN ELEKTROLISIS AIR BERBASIS MEMBRAN PENUKAR PROTON (PEMWE)**

Salsabilla Nabigha, dibimbing oleh Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D

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

+ 97 halaman, 15 gambar, 6 tabel, 14 lampiran.

Katalis Pt-Fe/C dengan komposisi Pt:Fe sebesar 1:0; 1:3; 1:1; 3:1 dan 0:1 berhasil disintesis menggunakan metode impregnasi dan *ball milling*. Katalis Pt-Fe/C disemprotkan di atas permukaan *Gas Diffusion Layer* (GDL) dalam bentuk tinta untuk membentuk *Catalyst Layer* (CL). Elektroda Pt-Fe/C yang terbentuk dikarakterisasi menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV), *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS), dan *Linear Sweep Voltammetry* (LSV). Karakterisasi CV dan LSV bertujuan untuk mengetahui sifat elektrokimia elektroda, sedangkan karakterisasi EIS bertujuan untuk mengetahui konduktivitas elektroda. Hasil karakterisasi CV didapatkan nilai ECSA tertinggi pada komposisi Pt:Fe = 1:0 sebesar 2,11 m<sup>2</sup>/g. Hasil karakterisasi EIS didapatkan nilai konduktivitas tertinggi pada komposisi Pt:Fe = 1:0 sebesar 0,09 S/cm. Hasil karakterisasi LSV didapatkan nilai Q tertinggi pada komposisi Pt:Fe = 1:0 sebesar 0,015 C. Setelah proses karakterisasi, elektroda dirakit menjadi *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan komponen lain dan dilakukan proses elektrolisis air untuk mengetahui laju produksi hidrogen masing-masing MEA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MEA terbaik untuk menghasilkan hidrogen tercepat pada komposisi Pt:Fe = 0:1 dengan arus 2 A selama 92 detik dengan laju produksi hidrogen sebesar 2,7 mL/s.

Kata kunci : katalis Pt-Fe/C, MEA, PEMWE, Laju Produksi Hidrogen

Sitasi : 86 sitasi (2015-2024).

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN</b> .....	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH</b> .....	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH</b> .....	<b>v</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>vii</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>x</b>
<b>RINGKASAN</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>xvii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>18</b>
1.1 Latar Belakang .....	18
1.2 Rumusan Masalah.....	20
1.3 Tujuan Penelitian .....	20
1.4 Manfaat Penelitian .....	20
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>21</b>
2.1 Hidrogen .....	21
2.2 Elektrolisis Air .....	22
2.2.1 PEMWE .....	23
2.3 Komponen Penyusun PEMWE.....	24
2.3.1 <i>Membrane Electrode Assembly (MEA)</i> .....	24
2.3.1.1 <i>Gas Diffusion Layer (GDL)</i> .....	25
2.3.1.2 <i>Catalyst Layer (CL)</i> .....	26
a. Platina (Pt).....	27
b. Besi (Fe) .....	27
c. Karbon (C).....	28
2.3.2 Pengumpul Arus ( <i>Current Collectors</i> ).....	28
2.3.3 Gasket.....	29
2.3.4 Pelat Bipolar ( <i>Bipolar Plate</i> ) dan Pelat Penutup ( <i>End Plate</i> ).....	29

2.4	Sintesis Katalis.....	30
2.5	Karakterisasi Elektroda.....	31
2.5.1	CV.....	31
2.5.2	EIS.....	32
2.5.3	LSV.....	33
2.6	Faktor yang Mempengaruhi Laju Produksi Hidrogen.....	34
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>36</b>
3.1	Waktu dan Tempat.....	36
3.2	Alat dan Bahan.....	36
3.3	Prosedur Penelitian .....	36
3.3.1	Pembuatan GDL.....	36
3.3.2	Sintesis Katalis Pt-Fe/C .....	37
3.3.3	Pembuatan Elektroda Pt-Fe/C.....	37
3.3.4	Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda Menggunakan Metode CV.....	38
3.3.5	Pengukuran Nilai Konduktivitas Elektrik Elektroda Menggunakan Metode EIS.....	39
3.3.6	Pengukuran Sifat Elektrokimia Elektroda Menggunakan Metode LSV.....	39
3.3.7	Aktivasi Membran.....	39
3.3.8	Pembuatan MEA.....	40
3.3.9	Produksi Hidrogen pada Komposisi Katalis Bervariasi.....	40
3.4	Analisis Data.....	40
3.4.1	Analisis Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda dengan Metode CV.....	40
3.4.2	Analisis Konduktivitas Elektrik Elektroda .....	41
3.4.3	Analisis Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda dengan Metode LSV.....	41
3.4.4	Analisis Laju Produksi Hidrogen.....	41
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>43</b>
4.1	Sintesis Katalis Pt-Fe/C .....	43
4.2	Karakterisasi Elektroda.....	44

4.2.1 CV .....	44
4.2.2 EIS .....	46
4.2.3 LSV .....	49
4.3 Produksi Hidrogen .....	51
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>54</b>
5.1 Kesimpulan .....	54
5.2 Saran .....	54
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>55</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>64</b>
<b>DAFTAR RIWAYAT HIDUP .....</b>	<b>97</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.</b> PEMWE.....	23
<b>Gambar 2.</b> Skema komponen penyusun PEMWE.....	24
<b>Gambar 3.</b> Skema MEA .....	25
<b>Gambar 4.</b> Skema pengukuran CV .....	32
<b>Gambar 5.</b> Plot voltammogram CV secara umum.....	32
<b>Gambar 6.</b> Kurva Nyquist secara umum .....	33
<b>Gambar 7.</b> Voltammogram LSV secara umum .....	34
<b>Gambar 8.</b> Kurva voltammogram elektroda Pt-Fe/C berbagai komposisi Pt:Fe.	45
<b>Gambar 9.</b> Kurva Nyquist dan sirkuit elektroda komposisi Pt:Fe = 1:0 .....	47
<b>Gambar 10.</b> Kurva Nyquist dan sirkuit elektroda komposisi Pt:Fe = 1:3 .....	47
<b>Gambar 11.</b> Kurva Nyquist dan sirkuit elektroda komposisi Pt:Fe = 1:1 .....	47
<b>Gambar 12.</b> Kurva Nyquist dan sirkuit elektroda komposisi Pt:Fe = 3:1 .....	48
<b>Gambar 13.</b> Kurva Nyquist dan sirkuit elektroda komposisi Pt:Fe = 0:1 .....	48
<b>Gambar 14.</b> Kurva voltammogram LSV elektroda berbagai komposisi Pt:Fe....	50
<b>Gambar 15.</b> Laju produksi hidrogen.....	52

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1.</b> Massa bahan pembuatan GDL .....	37
<b>Tabel 2.</b> Perbandingan komposisi Pt:Fe dan massa milling Pt/C dan Fe/C .....	37
<b>Tabel 3.</b> Massa bahan pembuatan elektroda Pt-Fe/C .....	38
<b>Tabel 4.</b> Data hasil voltammogram elektroda Pt-Fe/C berbagai komposisi Pt:Fe	45
<b>Tabel 5.</b> Nilai $R_p$ , $R_s$ , dan konduktivitas elektroda Pt-Fe/C berbagai komposisi Pt:Fe .....	49
<b>Tabel 6.</b> Data voltammogram LSV elektroda Pt-Fe/C berbagai komposisi Pt:Fe	50



## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1.</b> Pembuatan GDL .....	65
<b>Lampiran 2.</b> Sintesis Katalis Pt-Fe/C .....	66
<b>Lampiran 3.</b> Pembuatan Elektroda .....	67
<b>Lampiran 4.</b> Aktivasi Membran .....	69
<b>Lampiran 5.</b> Pembuatan MEA.....	70
<b>Lampiran 6.</b> Produksi Hidrogen .....	71
<b>Lampiran 7.</b> Perhitungan Pembuatan GDL .....	72
<b>Lampiran 8.</b> Perhitungan Pembuatan Katalis Pt-Fe/C.....	73
<b>Lampiran 9.</b> Perhitungan Pembuatan Elektroda Pt-Fe/C Berbagai Komposisi Pt:Fe .....	75
<b>Lampiran 10.</b> Kurva, Tabel, dan Perhitungan Hasil Pengukuran CV .....	76
<b>Lampiran 11.</b> Kurva, Tabel, dan Perhitungan Hasil Pengukuran EIS.....	83
<b>Lampiran 12.</b> Kurva, Tabel, dan Perhitungan Hasil Pengukuran LSV .....	87
<b>Lampiran 13.</b> Perhitungan Laju Produksi Hidrogen .....	91
<b>Lampiran 14.</b> Alat dan Bahan.....	95

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia mengkonsumsi energi yang bergantung pada bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas alam yang telah berlangsung lama. Hal ini juga menyebabkan Indonesia mengalami dampak masalah emisi yang tinggi, *International Energy Agency (IEA) (2022)* melaporkan bahwa Indonesia menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 651.671 megaton (Ansari, 2017; Setyawan *et al.*, 2020). Penggunaan bahan bakar fosil meninggalkan sisa gas atau zat padat yang tidak dapat digunakan lagi, sehingga menyebabkan polusi pada lingkungan. Hal ini menyebabkan teralihnya fokus peneliti untuk mengidentifikasi sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan. Pengaplikasian sumber energi terbarukan seperti panas bumi, matahari, angin, biomassa, *biofuel*, dan hidrogen dapat memenuhi peningkatan kebutuhan energi dan tingkat polusi yang rendah (Amin *et al.*, 2022; Güney, 2019; Manullang & Sinaga, 2022). Sumber energi terbarukan hidrogen menarik perhatian yang signifikan untuk penelitian yang berfokus pada produksi *green hydrogen* (Kesarwani *et al.*, 2024). Hidrogen terbukti menjadi pilihan alternatif pengganti bahan bakar fosil sebab eksistensi hidrogen yang melimpah di alam dan pembakarannya menghasilkan energi dalam jumlah yang besar, serta hanya menghasilkan uap air sebagai produk samping (Farias *et al.*, 2022). Atom hidrogen pada keadaan suhu dan tekanan standar bersifat tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, tidak beracun dan mudah terbakar (Zohuri, 2019).

Hidrogen dapat dihasilkan dari biomassa, dekomposisi termal, dekomposisi fotokatalitik, dan proses elektrolisis yang memanfaatkan air (Rizwan *et al.*, 2021). Hidrogen dari proses elektrolisis dianggap murni, bersih, dan memberi dampak baik ke lingkungan (Camargo *et al.*, 2023). Elektrolisis air untuk menghasilkan hidrogen diketahui memiliki empat jenis, diantaranya, *Alkaline Water Electrolysis (AWE)*, *Solid Oxide Water Electrolysis (SOE)*, *Anion Exchange Membrane Water Electrolysis (AEMWE)*, dan *PEMWE* (El-Shafie, 2023; Wang *et al.*, 2021). PEMWE diketahui sebagai teknologi yang efisien untuk menghasilkan hidrogen dengan kemurnian tinggi. PEMWE memiliki konsumsi energi yang lebih rendah,

efisiensi yang lebih tinggi, desain yang *compact*, densitas arus dan stabilitas yang tinggi, serta laju produksi hidrogen yang tinggi dibandingkan teknologi elektrolisis lain (El-Shafie, 2023; Nugroho *et al.*, 2022). Komponen PEMWE diantaranya MEA, pengumpul arus, gasket, pelat bipolar dan pelat penutup (Arunachalam & Han, 2024; Kumar & Himabindu, 2019).

MEA sebagai inti sel elektrolisis terdiri dari dua sel, yaitu katoda dan anoda (Kumar & Himabindu, 2019). Masing-masing katoda dan anoda MEA terdiri atas GDL dan CL. GDL diketahui sebagai media berpori untuk mengangkut elektron dan panas secara efektif, untuk mempertahankan membran dari hidrasi terdapat lapisan hidrofobik berupa *Microporous Layer* (MPL) (Xing *et al.*, 2019). CL diketahui sebagai komponen penting dalam PEMWE yang memiliki efek besar terhadap peningkatan kinerja elektroliser (Yang *et al.*, 2024). Pengikat partikel pada CL terbagi menjadi dua sifat, diantaranya sifat hidrofobik seperti *Polytetrafluoro Ethylene* (PTFE) dan sifat hidrofilik seperti *Perfluorosulfonate Acid* (PFSA) yang dikenal dengan *nafion* (Wicaksono *et al.*, 2021).

Katalis yang ideal untuk reaksi elektrolisis yaitu logam mulia berupa platina (Pt), rubidium (Ru), dan iridium (Ir) (Zhang *et al.*, 2023). Katalis Pt menunjukkan porositas yang cukup dan dapat mempercepat pengangkutan elektron dan reaktan selama proses elektrokatalik (Dao *et al.*, 2019). Katalis Pt komersial memiliki kelemahan berupa luas permukaan spesifik yang rendah, partikel cenderung menggumpal, biaya yang tinggi, serta daya tahan untuk reaksi evolusi hidrogen dan kinerja katalitik yang terbatas (Dao *et al.*, 2019; Liang *et al.*, 2024). Kombinasi katalis antara Pt dengan logam transisi seperti Fe, Co, Ni, dan Cu dapat mengoptimalkan konfigurasi permukaan dan struktur elektronik pada Pt, sehingga kinerja katalitik meningkat. Atom Fe pada katalis Pt-Fe dapat menyesuaikan sifat permukaan katalis dan meningkatkan kemampuan adsorpsi spesies perantara (Kuang *et al.*, 2024).

Produksi hidrogen berbasis PEMWE dilakukan pada penelitian ini menggunakan katalis Pt-Fe/C yang divariasikan komposisi Pt:Fe nya. Variasi komposisi katalis bertujuan untuk mengetahui pengaruh komposisi Pt:Fe pada katalis Pt-Fe/C terhadap produksi hidrogen berbasis PEMWE. Karakterisasi pada elektroda dilakukan dengan metode CV, EIS dan LSV sehingga karakteristik serta

sifat elektrokimia elektroda dan konduktivitasnya dapat diketahui. Laju produksi hidrogen dilakukan menggunakan metode desakan air dengan mencatat waktu yang diperlukan agar volume air berkurang dalam gelas ukur. Komposisi Pt:Fe pada katalis Pt-Fe/C terbaik untuk menghasilkan hidrogen akan diketahui pada penelitian ini.

## **1.2 Rumusan Masalah**

1. Bagaimana karakteristik elektroda Pt-Fe/C dengan berbagai komposisi Pt:Fe untuk elektrolisis air?
2. Bagaimana pengaruh komposisi Pt:Fe pada katalis Pt-Fe/C terhadap laju produksi hidrogen secara elektrolisis air berbasis PEMWE?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

1. Melakukan karakterisasi elektroda dengan berbagai komposisi katalis Pt-Fe/C dengan berbagai komposisi Pt:Fe untuk elektrolisis air.
2. Menentukan pengaruh komposisi Pt:Fe pada katalis Pt-Fe/C terhadap laju produksi hidrogen secara elektrolisis air berbasis PEMWE.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan teknologi elektrolisis air berbasis PEMWE untuk produksi hidrogen dengan kemurnian yang tinggi dengan katalis Pt-Fe/C. Hidrogen yang dihasilkan kemudian dapat turut serta digunakan sebagai bahan bakar *fuel cell* untuk mendukung *net zero emission*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adhiyanti, N., Rohendi, D., Syarif, N., & Rachmat, A. (2021). Preparation and Characterization of Ti-Co/C catalyst for PEMFC Cathode. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 6(3), 109–114. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v6.i3.109>
- Akyüz, E. S., Telli, E., & Farsak, M. (2024). Hydrogen generation electrolyzers: Paving the way for sustainable energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 81(July), 1338–1362. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.175>
- Amin, M., Shah, H. H., Fareed, A. G., Khan, W. U., Chung, E., Zia, A., Rahman Farooqi, Z. U., & Lee, C. (2022). Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(77), 33112–33134. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.172>
- Amrute, A. P., De Bellis, J., Felderhoff, M., & Schüth, F. (2021). Mechanochemical Synthesis of Catalytic Materials. *Chemistry - A European Journal*, 27(23), 6819–6847. <https://doi.org/10.1002/chem.202004583>
- Ansari, A. M. D. (2017). Environmental Impacts of Non-Renewable Energy Sources. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 5(1), 2320–2882. [www.ijcrt.org](http://www.ijcrt.org)
- Arunachalam, M., & Han, D. S. (2024). Efficient solar-powered PEM electrolysis for sustainable hydrogen production: an integrated approach. *Emergent Materials*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s42247-024-00697-y>
- Baez-Cotto, C. M., Foster, J., Godoy, A. O., Van Cleve, T., Young, E., Pylypenko, S., Jankovic, J., Ulsh, M., & Mauger, S. (2024). Shelf-life of ball-milled catalyst inks for the fabrication of fuel cell electrodes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 93(September), 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.273>
- Becker, H., Murawski, J., Shinde, D. V., Stephens, I. E. L., Hinds, G., & Smith, G. (2023). Impact of impurities on water electrolysis: a review. *Sustainable Energy and Fuels*, 7(7), 1565–1603. <https://doi.org/10.1039/d2se01517j>
- Bessarabov, D., Wang, H., Li, H., & Zhao, N. (2015). *PEM Electrolysis for Hydrogen Production*. CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Burggräf, P., Adlon, T., Lehde, N., & Llamas, C. F. (2023). Decision support on membrane electrode assembly (MEA) production and factory concepts. *Procedia CIRP*, 120, 1357–1362. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.176>
- Cahyotomo, A., Panglipur, H. S., Tirta, A. P., Hayat, M., & Madiabu, M. J. (2022). Deteksi Metil Paraben secara Voltametri Menggunakan Elektrode Pasta Karbon. *Warta Akab*, 46(1), 16–20. <https://doi.org/10.55075/wa.v46i1.79>
- Cai, J., He, J., Yu, Z., Li, J., Fan, X., Liang, W., & Dai, H. (2024). Enhanced catalytic activity and stability in CO oxidation of the Pt/TiO<sub>2</sub> catalyst by CoOx doping. *Surfaces and Interfaces*, 51(April).

<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.104716>

- Camargo, L., Comas, D., Escorcía, Y. C., Alviz-Meza, A., Carrillo Caballero, G., & Portnoy, I. (2023). Bibliometric Analysis of Global Trends around Hydrogen Production Based on the Scopus Database in the Period 2011–2021. *Energies*, *16*(1). <https://doi.org/10.3390/en16010087>
- Chai, H., Koo, B., Son, S., & Jung, S. P. (2024). Validity and Reproducibility of Counter Electrodes for Linear Sweep Voltammetry Test in Microbial Electrolysis Cells. *Energies*, *17*(11), 1–16. <https://doi.org/10.3390/en17112674>
- Chen, M., Zhao, C., Sun, F., Fan, J., Li, H., & Wang, H. (2020). Research progress of catalyst layer and interlayer interface structures in membrane electrode assembly (MEA) for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system. *ETransportation*, *5*. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100075>
- Chun, H., Chang, J. H., Kim, J. woong, Sim, J., & Min, K. (2024). Durability analysis of polymer electrolyte membrane fuel Cell's gas diffusion layer based on distribution relaxation time analysis: Influence of the presence or absence of a micro-porous layer. *International Journal of Hydrogen Energy*, *71*(May), 831–844. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.154>
- Cieluch, M., Düerkop, D., Kazamer, N., Wirkert, F., Podleschny, P., Rost, U., Schmiemann, A., & Brodmann, M. (2024). Manufacturing and investigation of MEAs for PEMWE based on glass fibre reinforced PFSA/ssPS composite membranes and catalyst-coated substrates prepared via catalyst electrodeposition. *International Journal of Hydrogen Energy*, *52*, 521–533. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.310>
- Dao, V. D., Adilbish, G., Lee, I. H., & Yu, Y. T. (2019). Enhanced electrocatalytic property of Pt/C electrode with double catalyst layers for PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(45), 24580–24590. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.156>
- Demnitz, M., Lamas, Y. M., Barros, R. L. G., Bouter, Anouk de Leeuw den Schaaf, J. van der, & Groot, M. T. de. (2024). Effect of iron addition to the electrolyte on alkaline water electrolysis performance. *IScience*, *27*(1). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108695>
- El-Shafie, M. (2023). Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. *Results in Engineering*, *20*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426>
- 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>
- Farias, C. B. B., Barreiros, R. C. S., da Silva, M. F., Casazza, A. A., Converti, A., & Sarubbo, L. A. (2022). Use of Hydrogen as Fuel: A Trend of the 21st Century. *Energies*, *15*(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/en15010311>

- Gavrilyuk, A. (2013). Hydrogen Energy for Beginners. In *Sustainability (Switzerland)* (20131115th ed., Vol. 11, Issue 1). CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Groot, M. T. De, & Vermeulen, P. (2024). Advanced characterization of alkaline water electrolysis through electrochemical impedance spectroscopy and polarization curves. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 974(September), 118709. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2024.118709>
- Güney, T. (2019). Renewable energy, non-renewable energy and sustainable development. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 26(5), 389–397. <https://doi.org/10.1080/13504509.2019.1595214>
- Ham, K., Bae, S., & Lee, J. (2024). Classification and technical target of water electrolysis for hydrogen production. *Journal of Energy Chemistry*, 95, 554–576. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2024.04.003>
- Hidayati, I. P., Ekadewi, P., Arbianti, R., & Utami, T. S. (2021). Activated carbon-Fe catalyst modification on stainless steel cathode affects hydrogen production in microbial electrolysis cell. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 749(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/749/1/012071>
- Houam, S., Affoune, A. M., Atek, I., Kesri, F., Saad Guermeche, R., Chelaghmia, M. L., Nacef, M., Khelifi, O., & Banks, C. E. (2023). Determination of the standard rate constant for soluble-soluble quasi-reversible electrochemical systems by linear sweep voltammetry: Application to the electrochemical oxidation on screen-printed graphite electrodes. *Electrochimica Acta*, 449. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142200>
- Hu, M., & Cao, G. (2022). The effect of the backing layer design on the mass transfer in a proton exchange membrane fuel cell. *Energy Conversion and Management*, 269(August), 116086. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116086>
- Hu, Q., Wang, H., Dai, C., Lei, X., Wang, B., & Liu, X. (2024). Research advances in high-entropy alloy catalysts for water electrolysis under acidic conditions. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 964(May). <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2024.118313>
- Hu, S., Xiao, Y., Gong, F., Xiao, S., Wu, W., Yang, Y., Hua, L., & Chen, S. (2024). Highly efficient Li-CO<sub>2</sub> batteries with regulated discharge product enabled by a hetero-structured N-C/Fe<sub>3</sub>C/Fe cathodic catalyst. *Journal of Power Sources*, 624(September). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235592>
- Jo, M., Cho, H. S., & Na, Y. (2020). Comparative analysis of circular and square end plates for a highly pressurized proton exchange membrane water electrolysis stack. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(18). <https://doi.org/10.3390/APP10186315>
- Júnior, M. E. S., Palm, M. O., Duarte, D. A., & Catapan, R. C. (2023). Catalytic Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Monolithic Foam for Ethanol Reforming Fabricated by the

- Competitive Impregnation Method. *ACS Omega*, 8(7), 6507–6514. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06870>
- Kesarwani, R., Bhatnagar, A., Verma, S. K., Hudson, M. S. L., & Shaz, M. A. (2024). Enhancement in hydrogen sorption behaviour of MgH<sub>2</sub> catalyzed by graphene quantum dots. *International Journal of Hydrogen Energy*, 67(September 2023), 1026–1032. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.160>
- Kim, T., Choi, W., Shin, H. C., Choi, J. Y., Kim, J. M., Park, M. S., & Yoon, W. S. (2020). Applications of voltammetry in lithium ion battery research. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 11(1), 14–25. <https://doi.org/10.33961/jecst.2019.00619>
- Kuang, L., Zhang, L., Lü, S., Wei, J., Zhou, Y., Qin, H., He, J., Zhang, Z., Ni, H., & He, Y. (2024). Atomically dispersed high-loading Pt-Fe/C metal-atom foam catalyst for oxygen reduction in fuel cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 973(September 2023), 172928. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172928>
- Kumar, S. S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 442–454. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>
- Kwan, J. T. H., Daniel, L., Wang, W. J., Yao, K. L. W., Shehata, D. S., & Wilkinson, D. P. (2024). New multi-functional catalyst coated membrane structure for improved water electrolysis. *Journal of Power Sources*, 591(September 2023). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233872>
- Lamy, C., & Millet, P. (2020). A critical review on the definitions used to calculate the energy efficiency coefficients of water electrolysis cells working under near ambient temperature conditions. *Journal of Power Sources*, 447(October 2019), 227350. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227350>
- Lee, W., Pyun, I., & Na, Y. (2024). Concentric circular flow field to improve mass transport in large-scale proton exchange membrane water electrolysis cells. *Energy Reports*, 12(September), 3645–3653. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.049>
- Lei, S., Gao, H., Feng, R., Dai, H., Bernardo, E., Zhang, H., Cheng, Z., Zhang, X., Deng, M., Li, P., & Wang, L. (2024). Effect of calcination temperature on the activity of basalt tailings for the lightweight geopolymer from microwave curing. *Materials Chemistry and Physics*, 328(September). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129991>
- Liang, Q., Meng, F., Li, W., Zou, X., Song, K., Ge, X., Jiang, Z., Liu, Y., Liu, M., Li, Z., Dong, T., Chen, Z., Zhang, W., & Zheng, W. (2024). Atom-by-atom optimizing the surface termination of Fe-Pt intermetallic catalysts for alkaline hydrogen evolution reaction. *Science Bulletin*, 69(8), 1091–1099. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.02.004>
- López-Arenal, J., Moshtaghioun, B. M., Gómez-García, D., & Ortiz, A. L. (2024). Affordable spark plasma sintering of superhard Al-doped ZrB<sub>2</sub> nanoceramics



- from ZrH<sub>2</sub>, B, and Al mechanically activated by shaker milling. *Ceramics International*, 50(9), 15856–15866. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.065>
- Manullang, E., & Sinaga, N. (2022). Potential and Challenges of Hydrogen Development as New Renewable Energy in Indonesia. *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*, 7(2), 55–62. <https://doi.org/10.21070/r.e.m.v7i2.1647>
- Maya, J. C., Chejne, F., Gómez, C. A., Montoya, J., Chaquea, H., & Pecha, B. (2023). Analysis of the performance a PEM-type electrolyzer in variable energy supply conditions. *Chemical Engineering Research and Design*, 196, 526–541. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.07.002>
- Mohammed, S., Eljack, F., Al-Sobhi, S., & Kazi, M. K. (2024). A systematic review: The role of emerging carbon capture and conversion technologies for energy transition to clean hydrogen. *Journal of Cleaner Production*, 447(January), 141506. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141506>
- Mu, M., Liu, W., Xi, W., Yu, A., & Shi, L. (2024). Numerical investigation of anisotropic gas diffusion layers with graded porosity and wettability in anion exchange membrane fuel cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 226(January), 27–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125493>
- Munjewar, S. S., Thombre, S. B., & Mallick, R. K. (2017). A comprehensive review on recent material development of passive direct methanol fuel cell. *Ionics*, 23(1). <https://doi.org/10.1007/s11581-016-1864-1>
- Nugroho, D., Arief Budiman, Eko Agus Suyono, & Wahyu Wilopo. (2022). Designing PEM Electrolysis-Based Hydrogen Reactors In The Area of Baron Beach Of Yogyakarta, Indonesia. *Frontiers in Renewable Energy*, 1(1), 38–43. <https://doi.org/10.22146/free.v1i1.3816>
- Nurhidayah, V., Manurung, P., & Ginting, E. (2021). Pengaruh Laju Penambahan Doping Fosfor terhadap Struktur Kristal dan Luas Permukaan Spesifik Nanotitania dengan Metode Sol Gel. *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*, 2(2), 72–79. <https://doi.org/10.23960/jemit.v2i2.135>
- Ouabi, H., Lajouad, R., Kissaoui, M., & El Magri, A. (2024). Hydrogen production by water electrolysis driven by a photovoltaic source: A review. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 8(March), 100608. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100608>
- Padha, B., Verma, S., Mahajan, P., & Arya, S. (2022). Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Performance Analysis and Challenges in Fuel Cell Applications. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 13(2), 167–176. <https://doi.org/10.33961/jecst.2021.01263>
- Parekh, A. (2022). Recent developments of proton exchange membranes for PEMFC: A review. *Frontiers in Energy Research*, 10(September).

<https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.956132>

- Pashchenko, D. (2024). Green hydrogen as a power plant fuel: What is energy efficiency from production to utilization? *Renewable Energy*, 223(June 2023), 120033. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120033>
- Pawłowska, S., Lankauf, K., Błaszczak, P., Karczewski, J., Górnicka, K., Cempura, G., Jasiński, P., & Molin, S. (2023). Tailoring a low-energy ball milled MnCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel catalyst to boost oxygen evolution reaction performance. *Applied Surface Science*, 619(February). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.156720>
- Pilz, F. H., & Kielb, P. (2023). Cyclic voltammetry, square wave voltammetry or electrochemical impedance spectroscopy? Interrogating electrochemical approaches for the determination of electron transfer rates of immobilized redox proteins. *BBA Advances*, 4(June). <https://doi.org/10.1016/j.bbadv.2023.100095>
- Puspitasari, D. A., Supriyono, Kartikowati, C. W., Fauziyah, M., Gapsari, F., Pratiwi, V. M., Butar-Butar, D. A. H. B., D.N, I. M., Maghfiroh, R. P., Prasetya, Y. B., I.R, R. A., H, I. A., Rajabi, R., & Abdul, U. K. Z. (2024). Calcination Temperature Effect on Characteristic Properties of Na<sub>2/3</sub> [Fe<sub>1/2</sub>Mn<sub>1/2</sub>]O<sub>2</sub> Synthesized by Sol-Gel Reaction. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 8(1), 45–48.
- Rahmani, Z., & Ghamamy, S. (2015). Synthesis and Characterization of Nickel (II) Chloride Nanoparticles with The Study of Their Thermal Behavior. *International Journal of Nano Dimension*, 6(4), 401–407.
- Rizwan, M., Alstad, V., & Jaschke, J. (2021). Design considerations for industrial water electrolyzer plants. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 37120–37136. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.018>
- Saito, Y., & Kikuchi, T. (2014). Voltammetry: Theory, Types and Application. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1). Nova Science Publishers, Inc.
- Saputry, A. P., Lestariningsih, T., & Astuti, Y. (2019). The Effect of Ratio LiBOB:TiO<sub>2</sub> of Electrolyte Polymer Sheets as separators on the Electrochemical Performance of LTO-Based Lithium-Ion Batteries. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 22(4), 136–142. <https://doi.org/10.14710/jksa.22.4.136-142>
- Selpiana, S., Bahrin, D., Habibie, M. R., & Samara, F. S. (2023). Preparation and Characterization of Catalyst Zn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst Using Dry and Wet Impregnation Method. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 8(1), 25–33. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v8.i1.25>
- Setyawan, D., Dyarto, R., Setiawan, H., Tenrini, R. H., & Damayant, S. A. (2020). Examining the driving forces affecting energy intensity during financial crisis: Evidence from asean-6 countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(5), 71–81. <https://doi.org/10.32479/ijeep.9565>
- Sharma, R., Gyergyek, S., & Andersen, S. M. (2022). Critical thinking on baseline

- corrections for electrochemical surface area (ECSA) determination of Pt/C through H-adsorption/H-desorption regions of a cyclic voltammogram. *Applied Catalysis B: Environmental*, 311(November 2021), 0–11. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121351>
- Shomope, I., Al-Othman, A., Tawalbeh, M., Alshraideh, H., & Almomani, F. (2024). Machine learning in PEM water electrolysis: A study of hydrogen production and operating parameters. *Computers and Chemical Engineering*, 194(November 2024), 108954. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108954>
- Sihotang, A., Heriyanti, S. I., Murti, S. D. S., Yanti, F. M., Riski Gusti, D., Ichsan, A. F., Putri, A. A., & Riski Gusti, D. (2022). The Effect of Metal Impregnation Of Fe Cu And Co on Surface Area of ZSM-5 Catalyst Analyzed Using Surface Area Analyzer (AAS). *Al-Kimia*, 10(2), 170–179. <https://doi.org/10.24252/al-kimia.v10i2.32912>
- Siracusanò, S., Van Dijk, N., Backhouse, R., Merlo, L., Baglio, V., & Aricò, A. S. (2018). Degradation issues of PEM electrolysis MEAs. *Renewable Energy*, 123, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.024>
- Soriano, R. M., Rojas, N., Nieto, E., de Guadalupe González-Huerta, R., & Sandoval-Pineda, J. M. (2021). Influence of the gasket materials on the clamping pressure distribution in a PEM water electrolyzer: Bolt torques and operation mode in pre-conditioning. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(51), 25944–25953. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.076>
- Spanos, I., Masa, J., Zeradjanin, A., & Schlögl, R. (2021). The Effect of Iron Impurities on Transition Metal Catalysts for the Oxygen Evolution Reaction in Alkaline Environment: Activity Mediators or Active Sites? *Catalysis Letters*, 151(7), 1843–1856. <https://doi.org/10.1007/s10562-020-03478-4>
- 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>
- Thomas, F. ., & Henze, G. (2001). Introduction to Voltammetric Analysis: Theory and Practice. In *CSIRO Publishing*. CSIRO Publishing. <https://doi.org/10.5860/choice.40-0916>
- Wallnöfer-Ogris, E., Grimmer, I., Ranz, M., Höglinger, M., Kartusch, S., Rauh, J., Macherhammer, M. G., Grabner, B., & Trattner, A. (2024). A review on understanding and identifying degradation mechanisms in PEM water electrolysis cells: Insights for stack application, development, and research. *International Journal of Hydrogen Energy*, 65(March), 381–397. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.017>
- Wang, S., Lu, A., & Zhong, C. J. (2021). Hydrogen production from water electrolysis: role of catalysts. In *Nano Convergence* (Vol. 8, Issue 1, pp. 1–23). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1186/s40580-021-00254-x>

- Wang, T., Cao, X., & Jiao, L. (2022). PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects. *Carbon Neutrality*, *1*(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00022-8>
- Wicaksono, M. A., Noerochim, L., & Purniawan, A. (2021). Analisis Pengaruh Variasi Rasio Berat Nafion/Karbon pada Lapisan Katalis Membrane Electrode Assembly terhadap Performa Elektrokimia PEM Fuel Cell (PEMFC). *Jurnal Teknik ITS*, *10*(2), B98–B103. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v10i2.63997>
- Wu, F., Zeng, L., Pei, A., Feng, Y., & Zhu, L. (2024). Pt-on-CoNi alloy nanoparticles supported on N and P co-doped graphene catalyst for highly efficient hydrogen evolution by acidic water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, *63*(February), 1128–1136. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.138>
- Xie, M., Chu, T., Wang, T., Wan, K., Yang, D., Li, B., Ming, P., & Zhang, C. (2021). Preparation, performance and challenges of catalyst layer for proton exchange membrane fuel cell. *Membranes*, *11*(11), 1–33. <https://doi.org/10.3390/membranes11110879>
- Xing, L., Shi, W., Su, H., Xu, Q., Das, P. K., Mao, B., & Scott, K. (2019). Membrane electrode assemblies for PEM fuel cells: A review of functional graded design and optimization. *Energy*, *177*, 445–464. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.084>
- Xu, L., Li, W., Luo, J., Chen, L., He, K., Ma, D., Lv, S., & Xing, D. (2023). Carbon-based materials as highly efficient catalysts for the hydrogen evolution reaction in microbial electrolysis cells: Mechanisms, methods, and perspectives. *Chemical Engineering Journal*, *471*(June). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144670>
- Xue, F. M., Su, J. C., Li, P. P., & Zhang, Y. (2021). Application of proton exchange membrane electrolysis of water hydrogen production technology in power plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *631*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/631/1/012079>
- Yang, P., Huang, J., Li, J., Luo, K., Zhang, L., Fu, Q., Zhu, X., & Liao, Q. (2024). Insights into the effect of drying temperature on catalyst layer structure and PEM water electrolysis performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, *52*(September 2023), 170–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.108>
- Ye, Z., Qie, Y., Fan, Z., Liu, Y., Shi, Z., & Yang, H. (2019). Soft magnetic Fe<sub>5</sub>C<sub>2</sub>-Fe<sub>3</sub>C@C as an electrocatalyst for the hydrogen evolution reaction. *Dalton Transactions*, *48*(14), 4636–4642. <https://doi.org/10.1039/c9dt00328b>
- Zhang, J., Yang, M., Zhu, X., Dang, J., Ma, J., Liu, B., Huang, T., Ouyang, M., & Yang, F. (2023). The role of Pt doping on electrochemical performance and cost of alkaline water electrolysis catalysts. *Chemical Engineering Journal*, *476*(July), 146576. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146576>

- Zheng, T., Zhou, W., Gao, Y., Yu, W., Liu, Y., Zhang, C., Zheng, C., Wan, S., Lin, J., & Xiang, J. (2019). Active Impregnation Method for Copper Foam as Catalyst Support for Methanol Steam Reforming for Hydrogen Production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58(11), 4387–4395. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05241>
- Zhou, Y., Yu, L., Chang, J., Feng, L., & Zhang, J. (2024). Low carbon alcohol fuel electrolysis of hydrogen generation catalyzed by a novel and effective Pt–CoTe/C bifunctional catalyst system. *Green Energy and Environment*, 9(4), 758–770. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2022.08.007>
- Zhu, Y., Zhang, Y., Bin, S., Chen, Z., Zhang, F., Gong, S., Xia, Y., & Duan, X. (2024). *Effects of key design and operating parameters on the performance of the PEM water electrolysis for hydrogen production*. 235(August).
- Zohuri, B. (2019). Hydrogen Energy. In *Sustainable Fuel Technologies Handbook*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822989-7.00012-3>