

**LAJU PRODUKSI HIDROGEN PADA ELEKTROLISIS AIR BERBASIS
MEMBRAN PENUKAR PROTON MENGGUNAKAN KATALIS $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$
DENGAN VARIASI ARUS DAN JENIS STACK**

SKRIPSI

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



Oleh:

ANNASH NABILLA UNTARI

08031181924001

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

2023

HALAMAN PENGESAHAN

**LAJU PRODUKSI HIDROGEN PADA ELEKTROLISIS AIR BERBASIS
MEMBRAN PENUKAR PROTON MENGGUNAKAN KATALIS $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$
DENGAN VARIASI ARUS DAN JENIS *STACK***

SKRIPSI

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

Oleh:

ANNASH NABILLA UNTARI

08031181924001

Indralaya, 13 Februari 2023

Mengetahui

Dekan FMIPA



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

NIP. 197111191997021001

Pembimbing

Dr. Dedi Rohendi, M.T

NIP. 196704191993031001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi Annash Nabilla Untari (08031181924001) dengan judul “Laju Produksi Hidrogen pada Elektrolisis Air Berbasis Membran Penukar Proton Menggunakan Katalis $\text{Cu}_2\text{O/C}$ dengan Variasi Arus dan Jenis *Stack*” telah diseminarkan di hadapan Tim Penguji Seminar Hasil Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 11 Januari 2023 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, Januari 2023

Ketua :

1. **Dr. Eliza, M.Si.**

NIP. 196407291991022001

()

Sekretaris :

1. **Dr. Desnelli, M.Si.**

NIP. 196912251997022001

()

Pembimbing :

1. **Dr. Dedi Rohendi, M.T.**

NIP. 196704191993031001

()

Penguji :

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

NIP. 196404301990031003

()

2. **Prof. Dr. Poedji Loekitowati Hariani, M.Si.**

NIP. 196808271994022001

()

Mengetahui,

Dekan FMIPA



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

NIP. 197111191997021001

Ketua Jurusan Kimia



Prof. Dr. Muharni, M.Si

NIP. 196903041994122001

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama Mahasiswa : Annash Nabilla Untari

NIM : 08031181924001

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 kesarjanaan strata (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, 13 Februari 2023

Yang menyatakan,



Annash Nabilla Untari

NIM. 08031181924001

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

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

Nama Mahasiswa : Annash Nabilla Untari

NIM : 08031181924001

Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia

Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “Laju Produksi Hidrogen pada Elektrolisis Air Berbasis Membran Penukar Proton Menggunakan Katalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ dengan Variasi Arus dan Jenis *Stack*” dengan hak bebas royalti non-eksklusif ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih, edit/ memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tugas akhir atau skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/ pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya.

Indralaya, 13 Februari 2023

Yang menyatakan,



Annash Nabilla Untari

NIM. 08031181924001

HALAMAN PERSEMBAHAN

آتَىٰ أَمْرُ اللَّهِ فَلَا تَسْتَعْجِلُوهُ ۗ سُبْحٰنَهُ وَتَعَالَىٰ عَمَّا يُشْرِكُونَ

"Ketetapan Allah pasti datang, maka janganlah kamu meminta agar dipercepat (datang)nya. Maha Suci Allah dan Maha Tinggi Dia dari apa yang mereka persekutukan."

-QS. An-Nahl: 1-

اللَّهُمَّ لَا سَهْلَ إِلَّا مَا جَعَلْتَهُ سَهْلًا وَأَنْتَ تَجْعَلُ الْحَزْنَ إِذَا شِئْتَ سَهْلًا

“Ya Allah, tidak ada kemudahan kecuali apa yang Engkau jadikan mudah. Sedang yang susah bisa Engkau jadikan mudah, apabila Engkau menghendaknya.”

Skripsi ini sebagai tanda syukur dan terimakasih kepada Alah SWT dan Baginda Rasul Muhammad SAW, dan saya persembahkan kepada:

- Mamakku Helisa dan Bapakku Subri, yang ayuk cintai dan sayangi, yang telah mendoakan dan memberi support dalam bentuk apapun dikala senang maupun sedih serta telah menguatkan yati untuk selalu teguh dalam pendiriannya.
- Adek tersayang, Muhammad Fahri Assabil, yang sudah memberi semangat kepada ayuknya yang cantik dan manis.
- Keluarga besar penulis, terutama Aak Lia, Ace Shella, Aak Harum, selaku kakak sepupu yang cantik nan baik hatinya telah menyadarkan dan memotivasi ayuk agar bisa menjadi ayuk yang kuat dan dapat dijadikan inspirasi untuk keluarga besar kita.
- Dosen pembimbing (Dr. Dedi Rohendi, M.T.)
- Orang-orang yang memotivasiku selama masa perkuliahan
- Sahabat dan teman-teman yang terlibat dan membantu dalam perkuliahan
- Teman-teman seperjuangan dan Almamaterku yang aku banggakan Universitas Sriwijaya.
- Diri sendiri

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah SWT yang maha pengasih lagi maha penyayang. Segala puji dan syukur atas rahmat dan karunia Allah SWT sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Laju Produksi Hidrogen pada Elektrolisis Air Berbasis Membran Penukar Proton Menggunakan Katalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ dengan Variasi Arus dan Jenis *Stack*”. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Kimia Universitas Sriwijaya.

Proses penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari berbagai rintangan, mulai dari penyusunan judul, pengumpulan literatur, penelitian, pengumpulan data, pengolahan data maupun tahap penulisan. Namun dengan kesabaran dan ketekunan yang dilandasi dengan rasa tanggung jawab sebagai mahasiswa serta bantuan dari berbagai pihak lain baik berupa moril maupun material, akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan. Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada bapak **Dr. Dedi Rohendi, M.T.**, yang telah banyak membantu, memberikan bimbingan, bantuan, saran, nasihat dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

1. **Mamak** terhebatku dan **Bapak** pahlawan terbaikku, terima kasih semua doa dan dukungan yang telah diberikan, nasihat kebaikan yang selalu menjadi penyemangat untuk melangkah dalam kehidupan hingga saat ini.
2. **Adikku** tersayang, terima kasih telah memberi semangat dan dukungan dikala ayuk merasa letih. Semangat terus untuk adek ayuk sayang, selalu jadi kebanggan mamak dan bapak, belajarlah dengan giat untuk mencapai cita-cita yang adek inginkan, aamiin ya Allah.
3. Bapak **Prof. Hermasyah, S.Si., M.Si., Ph.D.** selaku Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya.
4. Ibu **Prof. Dr. Muharni, M.Si.** selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
5. Bapak **Dr. Addy Rachmat, M.Si.** selaku sekretaris Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.

6. Bapak **Dr. Dedi Rohendi, M.T.** selaku dosen Pembimbing Akademik dan Pembimbing Tugas Akhir.
7. Bapak **Dr. Ady Mara, M.Si.** dan Ibu **Prof. Dr. Poedji Loekitowati Hariani, M.Si.** selaku pembahas dan penguji sidang sarjana.
8. Seluruh **Dosen Kimia** FMIPA Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu, mendidik dan membimbing selama masa kuliah.
9. **Mba Novi** dan **Kak Chosiin** selaku Admin Jurusan Kimia yang banyak membantu dalam proses perkuliahan hingga tugas akhir.
10. Keluarga besar penulis yang selalu mendoakan dan senantiasa memberi dukungan dan arahan.
11. Orang baik yang telah hadir di dalam hidup penulis yang senantiasa memberikan motivasi, dukungan dan penyemangat, menjadi tempat berbagi kisah, menemani dalam kebahagiaan dan kesedihan, serta mendengarkan keluh kesah penulis.
12. Sepupu-sepupu tersayangku (**Aak Lia, Ace Shella, Aak Harum**), yang telah mendukung dan memberi semangat yang tiada bandingnya teruntuk adiknya ini serta memberi warna dalam setiap perjalananku.
13. **Kak Icha Amelia**, mentorku yang paling keren, terima kasih telah sabar dalam membimbing Annash dan terima kasih banyak atas ilmu dan arahan yang diberikan sehingga penelitian dan proses penulisan annash dapat terselesaikan dengan baik.
14. Kakak mentor PUR (**Kak Reka, Kak Dwi, Kak Icha**), terima kasih atas segala support, masukan dan ilmu yang telah diberikan. Semoga kakak senantiasa dalam lindungan Allah SWT dan dilancarkan segala urusannya.
15. Ciwi-ciwi hebat (**Anggun, Lolik, Yollan**) terima kasih telah menjadi sahabat seperjuangan, tempat berbagi keluh kesah, penghibur, pemberi warna, dan penyemangat sejak SMA hingga masa perkuliahan.
16. Anak Bufer (**Bang Hanif, Fitria, Indah, Bella, Sari, Vania, Rajib**) terima kasih telah menjadi teman seperjuangan sekaligus keluarga selama di perkuliahan hingga sekarang, terima kasih atas segala support, kebaikan, ketulusan dan semangat dari kalian.

17. Sahabat terbaikku (**Anggita, Weni, Rita**) terima kasih telah menjadi pendengar terbaikku, tempat mencurahkan segala isi hati, selalu ada dikala senang dan sedihku, yang menerimaku apa adanya, khususnya menjadi rumah ternyaman.
18. Partner seper-KP-an kesayangan PT Timah (**Anggun, Devi dan Ersha**) terima kasih telah memberi semangat, dukungan, motivasi dan memberi warna di sela-sela gundahnya tugas akhir ini.
19. Partner jompoku (**Fitria dan Indah**), terima kasih telah menyediakan tempat ternyaman untuk berbagi cerita random tentang kimia dan turunan-turunannya, semangat selalu untuk kita, semoga kita sehat selalu dan sukses untuk kita.
20. Keluarga Indekos (**Weni, Rita, Aldi, Julio, Ari, Rey, dan Ego**) terima kasih telah menguatkan diriku dari awal maba hingga sekarang, semangat dan cerita-cerita random kita. Sukses untuk kita.
21. PUR'18 (**Kak Ade, Kak Dinda, Kak Devi, Kak Iren, Kak Keke, Kak Nad, Bang Ilyas, Bang Ghifar, Bang Eko, Bang Prima, Bang Sandi, dan Bang Teja**), terima kasih atas saran, pendapat, dan cerita yang telah dibagikan kepada Annash sehingga penelitiannya dapat berjalan lancar.
22. Tim PUR'19 ("YOGYAA" **Yollan, Joy, Gumay, Yati, Misbach**) terima kasih atas dukungan, hiburan, dan bantuannya selama penelitian. Sukses untuk kakak dan teman-teman semua.
23. Sahabat sekaligus adikku (**Cinta Dwi AP**) yang telah memberikan support, semangat, warna dalam hidup kakak dan terima kasih telah menjadi tempat berkeluh kesah kakak dikala kakak lelah yang senantiasa memberikan dukungan positif dan pelukan hangat untuk tetap bertahan melewati semua rencana baik Allah SWT.
24. Sahabat curhatku (**Dinda Deswita**) terima kasih telah menjadi tempat terbaik untuk mengeluarkan isi hati dan pendapat tentang apapun itu permasalahan hidup ayuk, selalu menjadi penyemangat dengan kalimat-kalimat manisnya yang menjadikan bangkit kembali dengan semangat baru, sayang banget sama anak satu ini, sukses untuk kita ya.

25. Saudara asuhku, terkhusus kakak-kakak terbaik (**Kak Cici** dan **Kak Alfan**) terimakasih banyak telah memberi support, saran dan nasihat untuk Annash. Tidak terkecuali adik-adikku tercantik (**Putri, Diana, dan Suan**) terima kasih banyak telah memberi dukungan dan semangat untuk kakak.
26. Rekan-rekan seperjuangan **Kimia Angkatan 2019**, terima kasih atas kerja samanya selama ini dan semangat dari kalian semua, sukses selalu.
27. Semua pihak yang telah membantu penulis baik secara langsung maupun tidak langsung yang tidak dapat disebutkan satu per satu, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini dengan baik.

Semoga bimbingan, ilmu, bantuan, dan masukan yang telah diberikan kepada penulis menjadi amal shaleh dan pahala yang setimpal dari Allah SWT. Semoga bantuan kalian menjadi kemudahan dalam menjalankan kehidupan yang dirahmati Allah SWT. Dengan kerendahan hati, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih banyak kekurangan dan kesalahan, sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari pembaca. Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua serta pengembangan ilmu kimia di masa yang akan datang.

Indralaya, Februari 2023

Penulis

SUMMARY

HYDROGEN PRODUCTION RATE IN WATER ELECTROLYSIS BASED ON PROTON EXCHANGE MEMBRANE USING $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ CATALYST WITH VARIATION ON CURRENT AND TYPE OF STACK

Annash Nabilla Untari, supervised by Dr. Dedi Rohendi, M.T
Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Sriwijaya University
xviii + 70 pages, 7 tables, 15 pictures, 11 attachments

Hydrogen is a compound which produces energy that is environmentally friendly and has the potential to replace fossil fuels with a side product in the form of water. Therefore, research on hydrogen production is widely carried out. Research on the influence of proton exchange membrane based electrolyser on hydrogen flow rate using $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ catalysts with various currents and stacks had been carried out. The electrodes were made by distributing the catalyst on the surface of the Gas Diffusion Layer (GDL). The electrodes resulted were characterized using the Cyclic Voltammetry (CV) method to obtain the value of the active catalyst area (Electrochemical Surface Area/ECSA) and the Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) method to obtain the electrical conductivity value of the electrode. The highest ECSA values and electrical conductivity of electrodes with $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ catalyst were found at $3 \text{ mg}/\text{cm}^2$ catalyst loading with $689.07 \text{ cm}^2/\text{g}$ and $2.57 \times 10^{-1} \text{ S}/\text{cm}$ respectively. The optimum hydrogen production flow rate for a single stack was $0.919 \text{ mL}/\text{s}$ at an electrode surface area of $7 \times 7 \text{ cm}^2$ with a catalyst loading of $3 \text{ mg}/\text{cm}^2$. The optimum hydrogen flow rate at multistack is $1.0204 \text{ mL}/\text{s}$.

Keywords : Hydrogen Production, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$, PEM Water Electrolysis, Cyclic Voltammetry (CV), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)
Citation : 86 (2011-2022)

RINGKASAN

LAJU PRODUKSI HIDROGEN PADA ELEKTROLISIS AIR BERBASIS MEMBRAN PENUKAR PROTON MENGGUNAKAN KATALIS $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ DENGAN VARIASI ARUS DAN JENIS *STACK*

Annash Nabilla Untari, dibimbing oleh Dr. Dedi Rohendi, M.T
Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya
xviii + 70 halaman, 7 tabel, 15 gambar, 11 lampiran

Hidrogen merupakan senyawa penghasil energi yang ramah lingkungan dan berpotensi menggantikan bahan bakar fosil dengan produk samping berupa air. Oleh karena itu, penelitian mengenai produksi hidrogen banyak dilakukan. Penelitian mengenai produksi hidrogen pada elektroliser berbasis membran penukar proton hidrogen menggunakan katalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ dengan variasi arus dan jenis *stack* telah dilakukan. Elektroda dibuat dengan mendistribusikan katalis pada permukaan *Gas Diffusion Layer* (GDL). Elektroda yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk memperoleh nilai luasan aktif katalis (*Electrochemical Surface Area/ECSA*) dan metode *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) untuk memperoleh nilai konduktivitas elektrik elektroda. Nilai ECSA dan konduktivitas elektrik elektroda dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ terbesar terdapat pada loading katalis $3 \text{ mg}/\text{cm}^2$ dengan nilai berturut-turut sebesar $689,07 \text{ cm}^2/\text{g}$ dan $2,57 \times 10^{-1} \text{ S}/\text{cm}$. Laju alir hidrogen optimum pada *stack* tunggal sebesar $0,919 \text{ mL}/\text{s}$ pada luas permukaan elektroda $7 \times 7 \text{ cm}^2$ dengan loading katalis $3 \text{ mg}/\text{cm}^2$. Adapun laju alir produksi hidrogen optimum pada *multistack* sebesar $1,0204 \text{ mL}/\text{s}$.

Kata kunci : Produksi Hidrogen, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$, PEM elektrolisis, *Cyclic Voltammetry* (CV), *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)
Sitasi : 86 (2011-2022)

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR	vii
SUMMARY	xi
RINGKASAN	xii
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Hidrogen	4
2.2 Pengaplikasian Hidrogen	5
2.2.1 Hidrogen di Bidang Industri.....	5
2.2.2 Hidrogen dalam Sistem Energi Hibrida	5
2.2.3 Hidrogen di Bidang Transportasi	6
2.3 Metode-Metode Produksi Gas Hidrogen	8
2.3.1 Gasifikasi Gas	8
2.3.2 Reformasi Uap.....	9
2.3.3 <i>Aluminium-Water</i>	10
2.3.4 Elektrolisis.....	11

2.4	Komponen Penyusun PEM Elektrolisis.....	15
2.4.1	MEA dan Penyusunnya	16
2.4.2	Pengumpul Arus	17
2.4.3	Pelat Bipolar	17
2.5	Katalis	17
2.6	Karbon	18
2.7.	<i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	18
2.7	<i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	18
2.8	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS).....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		20
3.1	Waktu dan Tempat.....	20
3.2	Alat dan Bahan.....	20
3.2.1	Alat	20
3.2.2	Bahan.....	20
3.3	Prosedur Penelitian	20
3.3.1	Pembuatan GDL.....	20
3.3.2	Pembuatan Katalis Cu ₂ O/C	21
3.3.3	Pembuatan Elektroda dengan Katalis Cu ₂ O/C dan Pembuatan MEA (<i>Membrane Electrode Assembly</i>).....	21
3.3.4	Aktivasi Membran.....	22
3.3.5	Pengujian Struktur Mikro Elektroda Menggunakan Metode <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	22
3.3.6	Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda Menggunakan Metode <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV).....	22
3.3.7	Pengukuran Nilai Konduktivitas Elektrik Elektroda Menggunakan Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS).....	22
3.3.8	Produksi Hidrogen.....	23
3.4	Data dan Perhitungan.....	23
3.4.1	Analisis Data dan Laju Produksi Hidrogen.....	23
3.4.2	Analisis Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda.....	24
3.4.3	Analisis Konduktivitas Elektrik Elektroda.....	24

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1. Karakterisasi Elektroda.....	26
4.1.1 Karakterisasi Elektroda dengan Metode <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	26
4.1.2 Karakterisasi Elektroda dengan Metode <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV).....	28
4.2.2 Karakterisasi Elektroda dengan Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	30
4.3 Laju Produksi Hidrogen.....	33
4.3.1 Laju Produksi Hidrogen Menggunakan <i>Stack</i> Tunggal dengan Luas Permukaan Elektroda $7 \times 7 \text{ cm}^2$ pada Loading Katalis Bervariasi	33
4.3.2 Laju Produksi Hidrogen Menggunakan <i>Stack</i> Tunggal dengan Luas Permukaan Elektroda $7 \times 7 \text{ cm}^2$ pada Arus Bervariasi	35
4.3.3 Laju Produksi Hidrogen pada <i>Multistack</i> dengan Luas Permukaan Elektroda $7 \times 7 \text{ cm}^2$	36
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	38
5.1 Kesimpulan	38
5.2 Saran	38
DAFTAR PUSTAKA	39
LAMPIRAN.....	48

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Penyimpanan Hidrogen dalam Skala Besar (Andersson & Grönkvist, 2019)	6
Gambar 2. Pengisian Hidrogen dari Tangki (Carignano <i>et al.</i> , 2019)	7
Gambar 3. Skema Kerja Gasifikasi Gas (Aktawan <i>et al.</i> , 2015)	9
Gambar 4. Reaksi Elektrolisis Alkali (T. Wang <i>et al.</i> , 2022)	13
Gambar 5. Reaksi PEM elektrolisis (T. Wang <i>et al.</i> , 2022)	14
Gambar 6. Lapisan elektroda (Rashid <i>et al.</i> , 2015)	15
Gambar 7. Susunan MEA (Rashid <i>et al.</i> , 2015).....	16
Gambar 8. Hasil SEM Elektroda dengan katalis Cu ₂ O/C a) 2,5 mg/cm ² ; b) 3 mg/cm ² ; c) 3,5 mg/cm ²	26
Gambar 9. SEM-EDX Elektroda dengan katalis Cu ₂ O/C a) 2,5 mg/cm ² ; b) 3 mg/cm ² ; c) 3,5 mg/cm ²	27
Gambar 10. Kurva Voltammogram Elektroda dengan Loading Katalis Cu ₂ O/C Bervariasi.....	29
Gambar 11. Kurva Nyquist Elektroda dengan katalis Cu ₂ O/C pada loading a) 2,5 mg/cm ² ; b) 3 mg/cm ² ; c) 3,5 mg/cm ²	31
Gambar 12. Laju Produksi Hidrogen pada Arus Bervariasi	33
Gambar 13. Mekanisme Reaksi Katalis Heterogen Elektrolisis Air.....	35
Gambar 14. Laju Produksi Hidrogen pada Loading Katalis Bervariasi	36
Gambar 15. Grafik Perbandingan Laju Produksi Hidrogen <i>Stack</i> Bervariasi...	36

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Sifat-sifat hidrogen (Sorensen, 2018; Sundén, 2019)	4
Tabel 2. Perbandingan energi pembakaran kendaraan dengan bahan bakar listrik bensin, dan diesel (Girardi <i>et al.</i> , 2020)	7
Tabel 3. Sifat-sifat bahan bakar yang terkait dengan keselamatan (Sorensen, 2018).....	7
Tabel 4. Perbandingan Metode PEM Elektrolisis dan Elektrolisis Alkali	15
Tabel 5. Data Hasil Kurva Nyquist	24
Tabel 6. Hasil perhitungan ECSA elektroda dengan variasi loading katalis Cu ₂ O/C	29
Tabel 7. Data hasil fitting kurva Nyquist dan nilai konduktivitas pada elektroda dengan katalis Cu ₂ O/C.....	32

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Pembuatan <i>Gas Diffusion Layer</i>	49
Lampiran 2. Preparasi Katalis Cu ₂ O/C	50
Lampiran 3. Pembuatan Elektroda Katalis Cu ₂ O/C.....	51
Lampiran 4. Aktivasi Membran dan Pembuatan MEA.....	52
Lampiran 5. Skema Produksi Hidrogen.....	53
Lampiran 6. Perhitungan Pembuatan GDL.....	54
Lampiran 7. Perhitungan Pembuatan Elektroda	55
Lampiran 8. Tabel dan Kurva Hasil Pengukuran <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)...	56
Lampiran 9. Perhitungan Nilai Konduktivitas Pengukuran <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	58
Lampiran 10. Tabel dan Hasil Perhitungan Laju Produksi Hidrogen.....	59
Lampiran 11. Gambar Alat dan Bahan Penelitian	69

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bahan bakar fosil sebagai sumber energi tak terbarukan yang semakin hari ketersediaannya semakin berkurang, selain itu juga menyebabkan pencemaran lingkungan (Xiao *et al.*, 2022) sehingga dibutuhkan sumber energi alternatif yang berkelanjutan dan dapat mengurangi penggunaan bahan bakar fosil (Kwan *et al.*, 2020). Energi terbarukan yang sedang dikembangkan, diantaranya energi nuklir, energi plasma, dan *fuel cell*. *Fuel cell* dianggap sebagai sumber energi hijau yang tidak menghasilkan polutan berbahaya dan dapat mengurangi emisi gas karbondioksida (Raduwan *et al.*, 2022; Azhar dan Satriawan, 2018; Pingkuo & Xue, 2022).

Berbagai jenis *fuel cell* yang saat ini sedang dikembangkan, seperti, *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC), *Direct Formic Acid Fuel Cell* (DFAFC), *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC), dan *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). Bahan bakar PEMFC menggunakan gas hidrogen (Raduwan *et al.*, 2022) sehingga produksi gas hidrogen sebagai bahan bakar menjadi pilihan yang tepat karena hasil pembakarannya hanya menghasilkan uap air, selain itu gas hidrogen juga mempunyai nilai kalor yang tinggi sebesar 142 Mj/Kg (Coronel-García *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2022; Malek *et al.*, 2021).

Hidrogen dapat diproduksi dari beberapa metode diantaranya, *propane steam reforming* (Barnoon *et al.*, 2021), *steam methane reforming* (Valente *et al.*, 2019), *aluminium-water* (Bolt *et al.*, 2020) dan elektrolisis air (Suleman *et al.*, 2015). Metode elektrolisis menjadi salah satu metode yang banyak diminati dan dianggap sebagai metode produksi hidrogen dengan kemurnian yang tinggi (Milewski *et al.*, 2014). Elektrolisis menggunakan membran penukar proton dinilai efektif dikarenakan mempunyai kerapatan arus yang tinggi, efisiensi energi yang lebih besar, *gas crossover* yang lebih kecil dan rentang suhu pengoperasiannya yang luas sekitar 20-80°C serta sudah banyak pengaplikasiannya terhadap perkembangan energi terbarukan namun membutuhkan biaya yang masih tinggi (Wang *et al.*, 2022). Elektroliser yang digunakan untuk meningkatkan laju alir hidrogen, pada sisi anoda dan katoda ditambahkan lapisan katalis yang sesuai guna

mempercepat proses pemecahan ikatan dan pembentukan ion atau dikenal dengan elektrokatalisis (Majlan *et al.*, 2018).

Katalis yang umum digunakan diantaranya Pt, Pd, Cu₂O, IrO₂, RuO₂ (Bagal *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2022). Penelitian ini menggunakan katalis Cu₂O karena memiliki beberapa kelebihan dibandingkan katalis lainnya seperti relatif stabil, bersifat semikonduktor, mudah dicampur dengan polimer lain, tidak beracun atau berbahaya, dan sudah banyak diaplikasikan sebagai katalis (Badawy *et al.*, 2015). Cu₂O memiliki nilai konduktivitas yang rendah sehingga harus dipadukan dengan karbon. Penelitian Fatmawati (2022) menunjukkan hasil terbaik pada penggunaan katalis Cu₂O/C pada loading katalis yang divariasikan (1,5 mg/cm²; 2 mg/cm²; 2,5 mg/cm²) dan dalam keadaan *multistack* sehingga pada penelitian kali ini dilakukan pembuatan MEA dengan loading katalis Cu₂O/C yang divariasikan (2,5 mg/cm²; 3 mg/cm²; 3,5 mg/cm²) untuk meningkatkan laju produksi hidrogen. Selanjutnya arus dan jenis *stack* divariasikan sehingga laju produksi hidrogen dapat diukur. Kinerja katalis dapat diketahui dengan melakukan pengukuran *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS).

1.2 Rumusan Masalah

Produksi hidrogen dengan metode elektrolisis menggunakan elektroliser dengan media membran penukar proton (PEM) merupakan metode produksi hidrogen yang cukup efektif. Penggunaan katalis Cu₂O/C terbukti efektif, terutama pada katoda. Penggunaan katalis Cu₂O/C pada kedua elektroda merupakan hal yang menarik dilakukan, mengingat kualitas katalis Cu₂O/C cukup bagus dan harga yang relatif murah. Selain itu, penggunaan *stack* dengan ukuran, jumlah dan desain *channel* yang bervariasi merupakan hal yang perlu diteliti.

Pada penelitian ini dilakukan proses produksi hidrogen melalui metode elektrolisis menggunakan PEM elektroliser dengan variasi loading katalis Cu₂O/C, arus, dan jumlah/jenis *stack* dengan luas permukaan 49 cm² untuk mengetahui variasi terhadap laju optimum produksi hidrogen.

1.3 Tujuan Penelitian

1. Karakterisasi elektroda dengan variasi loading katalis menggunakan metode *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Cyclic Voltametry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS).
2. Menentukan pengaruh variasi dari loading katalis dan arus terhadap laju produksi hidrogen pada proses elektrolisis air menggunakan membran penukar proton (PEM) sebagai elektrolit.
3. Menentukan pengaruh variasi jenis *stack* terhadap laju produksi hidrogen pada proses elektrolisis air menggunakan membran penukar proton (PEM).

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi dalam upaya pengoptimalan produksi gas hidrogen sebagai pembawa energi baru terbarukan yang ramah lingkungan menggunakan metode PEM elektrolisis dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A., & Mohammed, A. (2019). Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review. *Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX, January*, 77–85.
- Abohamzeh, E., Salehi, F., Sheikholeslami, M., Abbassi, R., & Khan, F. (2021). Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 72(May), 104569. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104569>
- Ahmadi, P., & Khoshnevisan, A. (2022). ScienceDirect Dynamic simulation and lifecycle assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles considering various hydrogen production methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.215>
- Ajiriyanto, M. K., Kriswarini, R., Yanlinastuti, Y., & Lestari, D. E. (2018). Analisis korosi pipa pendingin sekunder RSG - GAS dengan teknik electrochemical impedance spectroscopy (EIS). *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, 24(2), 105–114. <https://doi.org/10.17146/urania.2018.24.2.4421>
- Aktawan, A., Prasetya, A., & Wilopo, W. (2015). Study of Characteristics of Gasification Process of Various Biomass in a Downdraft Gasifier. *ASEAN Journal of Systems En Nginering*, 3, 1–5.
- Andersson, J., & Grönkvist, S. (2019). Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 11901–11919. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>
- Anwer, M. M., Kayser, M. A., Sarkar, S., Hossain, S. M., Akter, S., Kamal, T. B., & Jahan, F. N. (2018). Scanning Electron Microscopy Analysis of Argon Plasma Treated Jute Fibre. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(7), 9–11.
- Athanasaki, G., Wang, Q., Shi, X., Chauhan, N., Vimala, V., Cindrella, L., Ahmad, R., & Kannan, A. M. (2021). Design and development of gas diffusion layers with pore forming agent for proton exchange membrane fuel cells at various relative humidity conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(9), 6835–6844. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.187>
- Azhar, M., & Satriawan, D. A. (2018). Implementasi Kebijakan Energi Baru dan Energi Terbarukan Dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional. *Administrative Law and Governance Journal*, 1(4), 398–412. <https://doi.org/10.14710/alj.v1i4.398-412>
- Bacquart, T., Murugan, A., Carré, M., Gozlan, B., Auprêtre, F., Haloua, F., & Aarhaug, T. A. (2018). Probability of occurrence of ISO 14687-2 contaminants in hydrogen: Principles and examples from steam methane reforming and electrolysis (water and chlor-alkali) production processes model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(26), 11872–11883. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.084>

- Badawy, S. M., El-Khashab, R. A., & Nayl, A. A. (2015). Synthesis, characterization and catalytic activity of Cu/Cu₂O nanoparticles prepared in aqueous medium. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, *10*(2), 169–174. <https://doi.org/10.9767/bcrec.10.2.7984.169-174>
- Bagal, I. V., Chodankar, N. R., Hassan, M. A., Waseem, A., Johar, M. A., Kim, D. H., & Ryu, S. W. (2019). Cu₂O as an emerging photocathode for solar water splitting - A status review. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(39), 21351–21378. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.184>
- Bamisile, O., Obiora, S., Huang, Q., & Yimen, N. (2022). ScienceDirect Impact of economic development on CO₂ emission in Africa; the role of BEVs and hydrogen production in renewable energy integration. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(2), 2755–2773. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.134>
- Barnoon, P., Toghraie, D., Mehmandoust, B., Fazilati, M. A., & Eftekhari, S. A. (2021). Comprehensive study on hydrogen production via propane steam reforming inside a reactor. *Energy Reports*, *7*, 929–941. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.02.001>
- Bolt, A., Dincer, I., & Agelin-Chaab, M. (2020). Experimental study of hydrogen production process with aluminum and water. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(28), 14232–14244. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.160>
- Carignano, M., Roda, V., Costa-Castello, R., Valino, L., Lozano, A., & Barreras, F. (2019). Assessment of Energy Management in a Fuel Cell/Battery Hybrid Vehicle. *IEEE Access*, *7*, 16110–16122. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2889738>
- Carmo, M., & Fritz, D. L. (2013). *A comprehensive review on PEM water electrolysis*. *8*(1). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- Chen, D., Pei, P., Li, Y., Ren, P., Meng, Y., Song, X., & Wu, Z. (2022). Proton exchange membrane fuel cell stack consistency: Evaluation methods, influencing factors, membrane electrode assembly parameters and improvement measures. *Energy Conversion and Management*, *261*(March), 115651. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115651>
- Choudhary, O. P., & ka, P. (2017). Scanning Electron Microscope: Advantages and Disadvantages in Imaging Components. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *6*(5), 1877–1882. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.605.207>
- Coronel-García, M. A., Salazar-Barrera, J. G., Malpica-Maldonado, J. J., Martínez-Salazar, A. L., & Melo-Banda, J. A. (2020). Hydrogen production by aluminum corrosion in aqueous hydrochloric acid solution promoted by sodium molybdate dihydrate. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(26), 13693–13701. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.122>
- Destyorini, F., Irmawati, Y., Widodo, H., Khaerudini, D. S., & Indayaningsih, N.

- (2018). Properties and performance of gas diffusion layer PEMFC derived from coconut coir. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 50(3), 409–419. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2018.50.3.7>
- Dudoladov, A. O., Buryakovskaya, O. A., Vlaskin, M. S., Zhuk, A. Z., & Shkolnikov, E. I. (2016). Generation of hydrogen by aluminium oxidation in aqueous solutions at low temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), 2230–2237. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.122>
- Dunn, K. W. (2021). Digital Image Analysis Tools Developed by the Indiana O'Brien Center. *Frontiers in Physiology*, 12(December), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.812170>
- Elitzur, S., Rosenband, V., & Gany, A. (2014). Study of hydrogen production and storage based on aluminum-water reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(12), 6328–6334. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.02.037>
- França Didier, V., Ulisses Dantas Batista, A., Viégas Montenegro, R., Borges Fonseca, R., Galbiatti De Carvalho, F., De Barros, S., & Lemes Carlo, H. (2013). Influence of hydrogen peroxide-based bleaching agents on the bond strength of resin-enamel/dentin interfaces. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 47(December), 141–145. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.08.009>
- Galitskaya, E., & Zhdaneev, O. (2022). Development of electrolysis technologies for hydrogen production: A case study of green steel manufacturing in the Russian Federation. *Environmental Technology and Innovation*, 27, 102517. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102517>
- Gannon, W. J. F., & Dunnill, C. W. (2020). Apparent disagreement between cyclic voltammetry and electrochemical impedance spectroscopy explained by time-domain simulation of constant phase elements. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 22383–22393. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.029>
- García-Triviño, P., Fernández-Ramírez, L. M., Gil-Mena, A. J., Llorens-Iborra, F., García-Vázquez, C. A., & Jurado, F. (2016). Optimized operation combining costs, efficiency and lifetime of a hybrid renewable energy system with energy storage by battery and hydrogen in grid-connected applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(48), 23132–23144. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.140>
- Girardi, P., Brambilla, C., & Mela, G. (2020). Life Cycle Air Emissions External Costs Assessment for Comparing Electric and Traditional Passenger Cars. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 16(1), 140–150. <https://doi.org/10.1002/ieam.4211>
- Haller, M. Y., Amstad, D., Dudita, M., & Englert, A. (2021). Combined heat and power production based on renewable aluminium-water reaction. 174. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.104>
- Handaja, S., Susanto, H., & Hermawan. (2020). Electrical conductivity of carbon

- electrodes by mixing carbon rod and electrolyte paste of spent battery. *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(2), 221–227. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.31637>
- Hasan, M. S. dan W. (2022). Produksi Hidrogen dengan Memanfaatkan Sumber Daya Energi Surya dan Angin di Indonesia. *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 3(1), 38–48. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13374>
- Hegge, F., Lombeck, F., Ortiz, E. C., Bohn, L., Holst, M. Von, Kroschel, M., Hu, J., Breitwieser, M., Strasser, P., & Vierrath, S. (2020). *Efficient and Stable Low Iridium Loaded Anodes for PEM Water Electrolysis Made Possible by Nanofiber Interlayers*. <https://doi.org/10.1021/acsam.0c00735>
- Jung, G. Bin, Chan, S. H., Lai, C. J., Yeh, C. C., & Yu, J. W. (2019). Innovative membrane electrode assembly (MEA) fabrication for proton exchange membrane water electrolysis. *Energies*, 12(21), 1–9. <https://doi.org/10.3390/en12214218>
- Juni, F. J., Majid, S. R., Yusuf, S. N. F., & Osman, Z. (2021). Electrochemical characteristics of Cu/Cu₂O/C composite electrode for supercapacitor application. *Microchemical Journal*, 164(November 2020), 106055. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106055>
- Kharisma, A. D., Amekan, Y., Sarto, & Cahyanto, M. N. (2022). Effect of hydrogen peroxide on biohydrogen production from melon fruit (*Cucumis melo* l.) waste by anaerobic digestion microbial community. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(1), 95–101. <https://doi.org/10.14710/IJRED.2022.40883>
- Kumar, S. S., & Himabindu, V. (2019). Materials Science for Energy Technologies 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, T. H., Katsushi, F., Shen, Y., Yin, S., Zhang, Y., Kase, K., & Yao, Q. (2020). Comprehensive review of integrating fuel cells to other energy systems for enhanced performance and enabling polygeneration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128(May), 109897. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109897>
- Lee, B., Park, K., & Kim, H. (2013). *Dynamic Simulation of PEM Water Electrolysis and Comparison with Experiments*. 8, 235–248.
- Li, X., Ye, N., Liu, H., Li, C., Huang, Y., Zhu, X., Feng, H., Lin, J., Huang, L., Wu, J., Liu, Y., Liang, C., & Peng, X. (2022). Bifunctional iron doped CuS catalysts towards highly efficient overall water electrolysis in the alkaline electrolyte. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(38), 16719–16728. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.196>
- Li, Y., Wen, Q., Qin, J., Zou, S., Ning, F., Bai, C., Pan, S., Jin, H., Xu, P., Shen, M., Song, Y. J., & Zhou, X. (2023). A high-efficient and low-consumption nanoimprint method to prepare large-area and high-quality Nafion array for

- the ordered MEA of fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, 451(P2), 138722. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138722>
- Majlan, E. H., Rohendi, D., Daud, W. R. W., Husaini, T., & Haque, M. A. (2018). Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89(April), 117–134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.007>
- Malek, A., Ganta, A., Divyapriya, G., Nambi, I. M., & Thomas, T. (2021). Hydrogen production from human and cow urine using in situ synthesized aluminium nanoparticles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(54), 27319–27329. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.024>
- Maulana, M. I., Syahbanu, I., & Harlia. (2017). Sintesis dan Karakterisasi Material Konduktif Film Komposit Polipirrol (PPy)/Selulosa Bakteri. *Jkk*, 6(3), 11–18. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jkkmipa/article/view/22258>
- Milani, M., Montorsi, L., Storchi, G., & Venturelli, M. (2021). CFD analysis and experimental measurements of the liquid aluminum spray formation for an Al–H₂O based hydrogen production system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(59), 30615–30624. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.119>
- Milewski, J., Guandalini, G., & Campanari, S. (2014). Modeling an alkaline electrolysis cell through reduced-order and loss- estimate approaches. *Journal of Power Sources*, 269, 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.06.138>
- Nurdiansah, H., Restu Dipakusuma, W., & Susanti, D. (2021). Pengaruh Variasi Temperatur Hidrotermal terhadap Struktur dan Sifat Kapasitif Carbon Nanotube (CNT) dengan Prekursor Ferrocene untuk Aplikasi Superkapasitor. *Jurnal Teknik ITS*, 9(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v9i2.59303>
- Obradović, M. D., & Gojković, S. L. (2022). Challenges in determining the electrochemically active surface area of Ni-oxides in the oxygen evolution reaction. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 918(December 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116479>
- Okolie, J. A., Patra, B. R., Mukherjee, A., Nanda, S., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2021). Futuristic applications of hydrogen in energy, biorefining, aerospace, pharmaceuticals and metallurgy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(13), 8885–8905. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.014>
- Okonkwo, P. C., & Otor, C. (2021). A review of gas diffusion layer properties and water management in proton exchange membrane fuel cell system. *International Journal of Energy Research*, 45(3), 3780–3800. <https://doi.org/10.1002/er.6227>
- Oni, A. O., Anaya, K., Giwa, T., Di Lullo, G., & Kumar, A. (2022). Comparative assessment of blue hydrogen from steam methane reforming, autothermal reforming, and natural gas decomposition technologies for natural gas-producing regions. *Energy Conversion and Management*, 254, 115245.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115245>

- Pan, A., Liu, J., Liu, Z., Yang, Y., Yang, X., & Zhang, M. (2020). Application of Hydrogen Energy and Review of Current Conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 526(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/526/1/012124>
- Pangestica Saputry, A., Lestariningsihb, T., Astutia, Y., Soedarto, J., LIPI research center, S., Puspitek Serpong, K., & Selatan, T. (2019). Pengaruh Rasio LiB:TiO₂ dari Lembaran Polimer Elektrolit sebagai Pemisah terhadap Kinerja Elektrokimia Baterai Lithium-Ion Berbasis LTO. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 22(4), 136–142.
- Park, S., Lee, J. W., & Popov, B. N. (2012). A review of gas diffusion layer in PEM fuel cells: Materials and designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(7), 5850–5865. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.148>
- Pingkuo, L., & Xue, H. (2022). Comparative analysis on similarities and differences of hydrogen energy development in the World's top 4 largest economies: A novel framework. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(16), 9485–9503. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.038>
- Plevová, M., Hnát, J., Žitka, J., Pavlovec, L., Otmar, M., & Bouzek, K. (2022). Optimization of the membrane electrode assembly for an alkaline water electrolyser based on the catalyst-coated membrane. *Journal of Power Sources*, 539(February). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231476>
- Raduwan, N. F., Shaari, N., Kamarudin, S. K., Masdar, M. S., & Yunus, R. M. (2022). An overview of nanomaterials in fuel cells: Synthesis method and application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(42), 18468–18495. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.035>
- Rashid, M., Mesfer, M. K. Al, Naseem, H., & Danish, M. (2015). *Hydrogen Production by Water Electrolysis : A Review of Alkaline Water Electrolysis , PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis*. 3, 80–93.
- Rizk, M. R., El-moghny, M. G. A., Abdelhady, H. H., Ragheb, W. M., Mohamed, A. H., Fouad, H. F., Mohsen, M., Kamel, A. S., & El-deab, M. S. (2022). ScienceDirect Tailor-designed bimetallic Co / Ni macroporous electrocatalyst for efficient glycerol oxidation and water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.129>
- Rohendi, D., Majlan, E. H., Mohamad, A. B., Daud, W. R. W., Kadhum, A. A. H., & Shyuan, L. K. (2015). Effects of temperature and backpressure on the performance degradation of MEA in PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 10960–10968. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.161>
- Rohendi, D., Majlan, E. H., Mohamad, A. B., Wan Daud, W. R., Hassan Kadhum, A. A., & Shyuan, L. K. (2013). Characterization of electrodes and performance tests on MEAs with varying platinum content and under various operational conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(22), 9431–9437.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.093>

- Rohendi, D., Syarif, N., Rachmat, A., Mersitarini, D., Ardiyanta, D., Erliana, R. R. W. H., Mahendra, I., Febrika, S. N., Yulianti, D. H., Amelia, I., & Al Reka Reo, M. (2022). Effect of Milling Time and PCA on Electrode Properties of Cu₂O-ZnO/C Catalyst Alloy used on Electrochemical Reduction Method of CO₂. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(2), 186–192. <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.02.022>
- Salkuyeh, Y. K., Saville, B. A., & MacLean, H. L. (2018). Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from different biomass gasification processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(20), 9514–9528. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.024>
- Samad, S., Loh, K. S., Wong, W. Y., Lee, T. K., Sunarso, J., Chong, S. T., & Wan Daud, W. R. (2018). Carbon and non-carbon support materials for platinum-based catalysts in fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(16), 7823–7854. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.154>
- Saputra, E., Sitorus, B., & Harlia. (2011). Sintesis Komposit Polianilina-Selulosa Menggunakan Matriks Selulosa dari Tandan Kosong Sawit. *Jkk*, 2(1), 58–64.
- Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J., & Few, S. (2017). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(52), 30470–30492. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>
- Sebbahi, S., Nabil, N., Alaoui-Belghiti, A., Laasri, S., Rachidi, S., & Hajjaji, A. (2022). Assessment of the three most developed water electrolysis technologies: Alkaline Water Electrolysis, Proton Exchange Membrane and Solid-Oxide Electrolysis. *Materials Today: Proceedings*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.264>
- Shan, J., Lin, R., Chen, X., & Diao, X. (2018). EIS and local resolved current density distribution analysis on effects of MPL on PEMFC performance at varied humidification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 1076–1083. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.033>
- Sharaf, S. M. (2020). Smart conductive textile. In *Advances in Functional and Protective Textiles*. LTD. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820257-9.00007-2>
- Shen, D., Chen, H., & Tian, A. (2018). *Effect of Mea Hot-Pressing on the Performance of Direct Methan Ol Fuel Cells*. 1(1), 402–404. <https://doi.org/10.26480/icnmim.01.2018.402.404>
- Sorensen, B. (2018). *Hydrogen 2.1*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100708-2.00002-3>
- Soto-Hernández, J., Santiago-Ramirez, C. R., Ramirez-Meneses, E., Luna-Trujillo, M., Wang, J. A., Lartundo-Rojas, L., & Manzo-Robledo, A. (2019). Electrochemical reduction of NO_x species at the interface of nanostructured Pd and PdCu catalysts in alkaline conditions. *Applied Catalysis B*:

- Environmental*, 259(x), 118048. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118048>
- Sujatno, A., Salam, R., Bandriyana, B., & Dimyati, A. (2017). Studi Scanning Electron Microscopy (Sem) Untuk Karakterisasi Proses Oksidasi Paduan Zirkonium. *Jurnal Forum Nuklir*, 9(1), 44. <https://doi.org/10.17146/jfn.2015.9.1.3563>
- Suleman, F., Dincer, I., & Agelin-Chaab, M. (2015). Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(21), 6976–6987. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.123>
- Sundén, B. (2019). *Hydrogen 3 3.1*. 37–55. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816950-6.00003-8>
- Tang, W., Yan, L., Li, K., Juan, Y., Fu, C., & Zhang, J. (2022). A comparison study on aluminum-water reaction with different catalysts. *Materials Today Communications*, 31(April), 103517. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103517>
- Tugirumubano, A., Shin, H. J., Go, S. H., Lee, M. S., Kwac, L. K., & Kim, H. G. (2016). Electrochemical performance analysis of a PEM water electrolysis with cathode feed mode based on flow passage shape of titanium plates. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(8), 1073–1078. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0130-9>
- Valente, A., Iribarren, D., & Dufour, J. (2019). Harmonising methodological choices in life cycle assessment of hydrogen: A focus on acidification and renewable hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 19426–19433. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.101>
- Voitic, G., Pichler, B., Basile, A., Iulianelli, A., Malli, K., Bock, S., & Hacker, V. (2018). Hydrogen production. In *Fuel Cells and Hydrogen: From Fundamentals to Applied Research*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811459-9.00010-4>
- Wahyono, Y., Sutanto, H., Hidayanto, E., Fisika, D., Sains, F., & Diponegoro, U. (2017). *Produksi gas hydrogen menggunakan metode elektrolisis dari elektrolit air dan air laut dengan penambahan katalis NaOH*. 6(4), 353–359.
- Wang, S., Lu, A., & Zhong, C. J. (2021). Hydrogen production from water electrolysis: role of catalysts. *Nano Convergence*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40580-021-00254-x>
- Wang, T., Cao, X., & Jiao, L. (2022). PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects. *Carbon Neutrality*, 1(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00022-8>
- Wongjom, P., Tuichai, W., Karaphun, A., Phrompet, C., Daengsakul, S., Pimanpang, S., Moontragoon, P., Srepusharawoot, P., Sriwong, C., & Ruttanapun, C. (2022). Characterization and electrochemical properties of CuO–Cu₂O/rGO nanocomposite synthesized by a seed-mediated growth process. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 163(November 2020),

110540. <https://doi.org/10.1016/j.jpccs.2021.110540>

- Wu, N., Wu, H., Zhang, J., Zhang, Y., Cao, D., Bai, L., & Hu, T. (2021). Cu₂O/Cu/C nanosheets derived from one novel Cu (II) metal-organic framework for high performance supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 856(Ii). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157466>
- Xiao, F., Yang, R., & Liu, Z. (2022). Active aluminum composites and their hydrogen generation via hydrolysis reaction: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(1), 365–386. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.241>
- Yazdani, N., Toroghinejad, M. R., Shabani, A., & Cavaliere, P. (2021). Effects of process control agent amount, milling time, and annealing heat treatment on the microstructure of alrcrufeni high-entropy alloy synthesized through mechanical alloying. *Metals*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/met11091493>