

**VARIASI POLA ALIRAN ARUS, ARUS LISTRIK, DAN TEMPERATUR
AIR PADA PRODUKSI HIDROGEN MELALUI PROSES
ELEKTROLISIS MENGGUNAKAN MEMBRAN ELEKTROLIT
DENGAN KATALIS $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$**

SKRIPSI

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



Oleh:

July Tasya Siahaan

08031281924121

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

2023

HALAMAN PENGESAHAN

**VARIASI POLA ALIRAN ARUS, ARUS LISTRIK, DAN TEMPERATUR
AIR PADA PRODUKSI HIDROGEN MELALUI PROSES
ELEKTROLISIS MENGGUNAKAN MEMBRAN ELEKTROLIT
DENGAN KATALIS $\text{Cu}_2\text{O/C}$**

SKRIPSI

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

Oleh:

July Tasya Siahaan

08031281924121

Indralaya, Juni 2023

Pembimbing



Dr. Dedi Rohendi, M.T
NIP. 19670419199303100

Mengetahui

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi July Tasya Siahaan (08031281924121) dengan judul “Variasi Pola Aliran Arus, Arus Listrik, dan Temperatur Air pada Produksi Hidrogen Melalui Proses Elektrolisis Menggunakan Membran Elektrolit dengan Katalis $\text{Cu}_2\text{O/C}$ ” telah dipertahankan di hadapan Tim Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 20 Juni 2023 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, Juni 2023

Ketua:

1. **Prof. Dr. Elfita, M. Si**

NIP. 196903261994122001

()

Sekretaris:

1. **Dra. Julinar, M. Si**

NIP. 196507251993032002

()

Pembimbing:

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

NIP. 196704191993031001

()

Penguji:

1. **Dr. Muhammad Said, M. T**

NIP. 197407212001121001

()


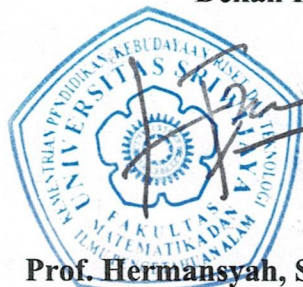
2. **Dr. Nurlisa Hidayati, M. Si**

NIP. 197211092000032001

()

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 : July Tasya Siahaan

NIM : 08031281924121

Fakultas/Jurusan : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam/Kimia

Menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri dan karya ilmiah ini belum pernah diajukan sebagai pemenuhan persyaratan untuk memperoleh gelar kesarjanaan strata (S1) dari Universitas Sriwijaya maupun perguruan tinggi lain.

Semua informasi yang dimuat dalam skripsi ini 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 tanggungjawab saya sebagai penulis.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya,

Indralaya, 21 Juni 2023

Penulis,



NIM. 08031281924121

HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

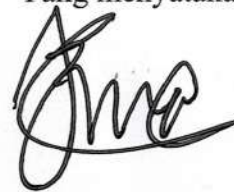
Sebagai civitas akademik Universitas Sriwijaya, yang bertandatangan dibawah ini:

Nama Mahasiswa : July Tasya Siahaan
NIM : 08031281924121
Fakultas/Jurusan : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam/ Kimia
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “hak bebas royalti non-eksklusif (*non- exclusively royalty-free right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul “Variasi Pola Aliran Arus, Arus Listrik, dan Temperatur Air pada Produksi Hidrogen Melalui Proses Elektrolisis Menggunakan Membran Elektrolit dengan Katalis $\text{Cu}_2\text{O/C}$ ” 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 dan pemilik hak cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya.

Indralaya, 21 Juni 2023

Yang menyatakan,



July Tasya Siahaan

NIM. 08031381924057

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tetapi jawab Tuhan kepadaku, "Cukuplah anugerah-Ku bagimu, sebab justru dalam kelemahanlah kuasa-Ku menjadi sempurna." Sebab itu, terlebih suka aku bermegah atas kelemahanku, supaya kuasa Kristus turun menaungi aku. **(2 Korintus 12:9)**

Karena itu, perhatikanlah dengan saksama, bagaimana kamu hidup, janganlah seperti orang bebal, tetapi seperti orang arif, dan pergunakanlah waktu yang ada, karena hari-hari ini adalah jahat. **(Efesus 5:15,16)** Tetapi Yesus menjawab, "Ada tertulis: Manusia hidup bukan dari roti saja, tetapi dari setiap firman yang keluar dari mulut Allah." **(Matius 4:4)**

Tetapi carilah dahulu Kerajaan Allah dan kehendak-Nya, maka semuanya itu akan ditambahkan kepadamu. **(Matius 6:33)**

Tidak lupa juga, saya sangat berterimakasih untuk pihak-pihak yang turut membantu pengerjaan skripsi saya mulai dari awal hingga ada di tahap ini, tidak dapat saya kerjakan sendiri. Saya sampaikan terimakasih kepada:

1. Pak Dedi selaku pembimbing tugas akhir, sudah mengayomi dan memperhatikan perkembangan di segala aspek. Semoga bapak senantiasa dalam keadaan sehat dan beroleh anugerah dari Tuhan.
2. Para mentor di PUR (Kak Icha, Kak Dwi, dan Kak Reka), semoga *sharing* ilmu yang sudah disampaikan tetap awet dan bermanfaat kelak bagi Joy. Kiranya kakak sekalian sukses dan dalam perlindungan Yang Mahakuasa.
3. Pak Said selaku dosen penguji, saya selalu senang ketika berdiskusi dengan Pak Said karena wawasannya yang luas dan dapat saya cerna. Kiranya bapak juga dalam keadaan sehat walafiat. Tuhan memberkati Pak Said
4. Ibu Nurlisa juga selaku dosen penguji, saya juga sangat mengapresiasi Bu Nurlisa yang selalu pengertian dan mau menjelaskan dengan sabar. Semoga ibu dalam keadaan baik dan dirahmati oleh Tuhan.
5. Tim PUR 19 (Yollan, Annash, Yati, Gumay, Misbach), walaupun waktu pengerjaan kita berbeda, setidaknya ada kisah yang bisa kita kenang saat bertemu lagi. Semoga kita sama-sama bermanfaat bagi bangsa dan negara, Ketika ada waktu untuk bertemu lagi di masa depan, bisa saling membagikan *vibes* yang positif.
6. Kaum saleh Gereja di Palembang, saya mengucapkan syukur karena berada di lingkungan yang tepat, orang-orang yang mengasihi Tuhan dan realitas kehidupan tubuh. Atas setiap doa dan perkataan yang tepat, *softskill* dan *hardskill* bahkan berkat materi, semoga penyertaan Tuhan senantiasa menaungi kita. Amen
7. Analis KOF (Joninah, Liak, Kinase, Yolskikah, dan Gateri), orang-orang yang bisa bekerja sama, berbagi ilmu, dan tawa. Semoga kita semua jadi orang yang tepat dan berakhlak, kelak waktu akan mempertemukan kita lagi, cerita kisah kita lagi 😊.
8. Admin jurusan (Mbak Novi dan Kak In) yang sudah membantu dan pengurusan berkas administrasi, semoga sehat selalu dan sukses.
9. Keluargaku yang sudah mendukung dalam doa dan dorongan untuk menguatkan. Saya juga berharap dapat membanggakan kalian atas setiap pengorbanan yang diberikan.
10. Almamaterku Universitas Sriwijaya.

KATA PENGANTAR

Puji Tuhan atas kasih dan rahmat-Nya penulis mampu menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “Variasi Pola Aliran Arus, Arus Listrik, dan Temperatur Air pada Produksi Hidrogen Melalui Proses Elektrolisis Menggunakan Membran Elektrolit dengan Katalis $\text{Cu}_2\text{O/C}$ ”. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada dosen pembimbing Bapak Dr. Dedi Rohendi, M. T. yang telah banyak memberikan bimbingan, motivasi, pengalaman, saran dan petunjuk kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya.
2. Ibu Prof. Muharni, M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
3. Bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si. selaku Sekretaris Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya.
4. Bapak Dr. Muhammad Said, M.T. dan Ibu Dr. Nurlisa Hidayati, M.Si. selaku pembahas dan penguji sidang sarjana penulis.
5. Seluruh Dosen Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu, mendidik dan membimbing selama masa perkuliahan hingga lulus.
6. Yuk Nur, Yuk Niar, dan Yuk Yanti selaku Analis Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya yang telah membantu selama penelitian, semoga kebaikan kalian senantiasa dibalas oleh Tuhan YME.
7. Kak Chosiin dan Mba Novi selaku Admin Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya yang telah membantu dalam proses administrasi penulis hingga lulus.
8. Teman-teman seperjuangan yaitu Kimia 2019 terimakasih atas kebersamaan dan suka-duka selama perkuliahan ini. Semoga sukses untuk kedepannya.
9. Seluruh pihak yang terlibat dalam penelitian maupun penulisan yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih dukungan dan semangatnya.

Penulis menyadari masih memiliki banyak kekurangan, harapan saya semoga ada hal positif yang dapat diambil dan lebih lagi dikembangkan dari karya ilmiah skripsi ini.

Indralaya, 24 Juni 2020

Penulis

SUMMARY

VARIATION OF CURRENT FLOW PATTERNS, ELECTRIC CURRENT, AND WATER TEMPERATURE IN HYDROGEN PRODUCTION USING ELECTROLYTE MEMBRANES WITH $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ CATALYST

July Tasya Siahaan, supervised by Dr. Dedi Rohendi, M.T

Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Sriwijaya University

ix + 49 pages, 2 tables, 10 pictures, 12 attachments

Nowadays, Hydrogen is the most promising candidate for clean and sustainable energy. The calorific value of its combustion reaches 286 kJ/mol, at the same weight, the energy of hydrogen is three times greater than that of other fuels. Innovation in the development of hydrogen energy continues until it can be applied to the general public. Research on hydrogen production by utilizing proton exchange membranes and the principle of electrolysis (electrolytic PEM) using a $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ electrocatalyst has been carried out. Electrocatalysts are produced using mechanical alloying techniques to increase the surface area of the electrodes. Electrodes were characterized by Cyclic Voltammetry (CV) and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) methods. CV characterization is used to determine the electrochemical properties of materials based on Electrochemical Surface Area (ECSA) values. The ECSA $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ value obtained was 3.621 m^2/g . EIS characterization is used to determine the electrical conductivity of materials based on their electrical conductivity values. The $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ conductivity value obtained was 20.3×10^{-3} S/cm. Hydrogen production testing with PEM electrolysis was carried out with variations in monopolar and bipolar current flow patterns, current strength, and water temperature to determine the best results based on the value of the hydrogen production rate. The best current flow patterns are produced by bipolar configuration modules compared to monopolar ones, with a hydrogen production rate of 0.537 mL/s at a current of 1.5 A. The best electric current for a bipolar configuration module is produced at a current of 2 A, with a hydrogen production rate of 0.6902 mL/s. The best water temperature in the bipolar configuration module and 2 A current is produced at a water temperature of 70°C, with a hydrogen production rate of 1.3899 mL/s.

Keywords : PEM, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$, electrical conductivity, bipolar, electric current, temperature, hydrogen production rate

Citation : 68 (2009-2022)

RINGKASAN

VARIASI POLA ALIRAN ARUS, ARUS LISTRIK DAN TEMPERATUR AIR PADA PRODUKSI HIDROGEN MELALUI PROSES ELEKTROLISIS MENGGUNAKAN MEMBRAN ELEKTROLIT DENGAN KATALIS $\text{Cu}_2\text{O/C}$

July Tasya Siahaan, dibimbing oleh Dr. Dedi Rohendi, M.T
Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya
ix + 49 halaman, 2 tabel, 10 gambar, 12 lampiran

Saat ini hidrogen merupakan kandidat yang paling menjanjikan sebagai energi bersih dan berkelanjutan. Nilai kalor pembakaran yang mencapai 286 kJ/mol, pada berat yang sama energi hidrogen tiga kali lebih besar daripada dan bahan bakar lainnya. Inovasi untuk pengembangan energi hidrogen terus berlanjut hingga dapat diterapkan di masyarakat umum. Penelitian tentang produksi hidrogen dengan memanfaatkan membran penukar proton dan prinsip elektrolisis (PEM elektrolisis) menggunakan elektrokatalis $\text{Cu}_2\text{O/C}$ telah dilakukan. Elektrokatalis diproduksi dengan teknik *mechanical alloying* untuk memperbesar luas permukaan elektroda. Elektroda dikarakterisasi dengan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS). Karakterisasi CV untuk mengetahui sifat elektrokimia bahan berdasarkan nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA). Nilai ECSA $\text{Cu}_2\text{O/C}$ yang diperoleh sebesar 3,621 m^2/g . Karakterisasi EIS untuk mengetahui sifat penghantar listrik bahan berdasarkan nilai konduktivitas elektriknya. Nilai konduktivitas $\text{Cu}_2\text{O/C}$ yang diperoleh sebesar $20,3 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$. Pengujian produksi hidrogen dengan PEM elektrolisis dilakukan dengan variasi pola aliran arus monopolar dan bipolar, kuat arus, dan temperatur air untuk mengetahui hasil yang terbaik berdasarkan nilai laju produksi hidrogen. Rangkaian pola aliran arus terbaik dihasilkan oleh modul konfigurasi bipolar dibandingkan monopolar dengan nilai laju produksi hidrogen sebesar 0,537 mL/s pada arus 1,5 A. Arus listrik terbaik pada modul konfigurasi bipolar dihasilkan pada arus 2 A, dengan nilai laju produksi hidrogen sebesar 0,6902 mL/s. Temperatur air terbaik pada modul konfigurasi bipolar dan arus 2 A dihasilkan pada temperatur air 70°C, dengan nilai laju produksi hidrogen sebesar 1,3899 mL/s.

Kata kunci : PEM, $\text{Cu}_2\text{O/C}$, konduktivitas elektrik, bipolar, arus listrik, temperatur air, laju produksi hidrogen

Sitasi : 68 (2009-2022)

DAFTAR ISI

| | |
|--|-------------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| 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 | viii |
| RINGKASAN | ix |
| DAFTAR ISI..... | x |
| DAFTAR GAMBAR..... | xiii |
| DAFTAR TABEL | xiv |
| DAFTAR LAMPIRAN | xv |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | 3 |
| 1.4 Manfaat Penelitian..... | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 4 |
| 2.1 Hidrogen..... | 4 |
| 2.1.1 Sifat Fisika | 4 |
| 2.1.2 Sifat Kimia..... | 4 |
| 2.2 Aplikasi Hidrogen | 5 |
| 2.3 Produksi Hidrogen..... | 5 |
| 2.4 Elektrolisis..... | 6 |
| 2.5 PEM Elektrolisis | 7 |
| 2.6 Komponen PEM Elektrolisis..... | 8 |
| 2.7 Elektrokatalis..... | 9 |
| 2.8 Pola Aliran Arus..... | 9 |
| 2.9 Termodinamika | 10 |
| 2.10 <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i> | 11 |
| 2.11 <i>Cyclic Voltametry (CV)</i> | 11 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | 12 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1 Waktu dan Tempat | 12 |
| 3.2 Alat dan Bahan | 12 |
| 3.2.1 Alat | 12 |
| 3.2.2 Bahan | 12 |
| 3.3 Prosedur Penelitian..... | 12 |
| 3.3.1 Pembuatan GDL | 12 |
| 3.3.2 Pembuatan Katalis Cu ₂ O/C..... | 13 |
| 3.3.3 Pembuatan Elektroda dengan Katalis Cu ₂ O/C dan Pembuatan MEA | 13 |
| 3.3.4 Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda menggunakan Metode <i>Cyclic Voltammetry (CV)</i> | 13 |
| 3.3.5 Pengukuran Nilai Konduktivitas Elektrik Elektroda menggunakan Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i> | 14 |
| 3.3.6 Produksi Hidrogen pada Pola Aliran Arus Monopolar dan Bipolar | 14 |
| 3.3.7 Produksi Hidrogen pada Arus dan Temperatur Air bervariasi . | 14 |
| 3.4 Analisis Data | 15 |
| 3.4.1 Analisis Data dan Laju Produksi Hidrogen | 15 |
| 3.4.2 Analisis Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda | 15 |
| 3.4.3 Analisis Konduktivitas Elektrik Elektroda | 15 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 17 |
| 4.1 Pembuatan Elektroda..... | 17 |
| 4.2 Karakterisasi Elektroda | 17 |
| 4.2.1 Karakterisasi Elektroda Metode <i>Cyclic Voltammetry (CV)</i> | 18 |
| 4.2.2 Karakterisasi Elektroda Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i> | 19 |
| 4.3 Laju Produksi Hidrogen | 21 |
| 4.3.1 Laju Produksi Hidrogen pada Stek Elektroliser dengan Variasi Pola Aliran Arus Listrik..... | 21 |
| 4.3.2 Laju Produksi Hidrogen Menggunakan Stek Elektroliser Pola Aliran Arus Bipolar pada Variasi Kuat Arus..... | 23 |
| 4.3.3 Laju Produksi Hidrogen pada Pola Aliran Arus Bipolar dan Arus 2 A dengan Variasi Temperatur Air | 26 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 28 |
| 5.1 Kesimpulan..... | 28 |

| | |
|-----------------------------|-----------|
| 5.2 Saran..... | 28 |
| DAFTAR PUSTAKA | 29 |
| LAMPIRAN..... | 35 |

DAFTAR GAMBAR

| | Halaman |
|---|----------------|
| Gambar 1. Pola aliran arus (a) monopolar (b) bipolar (Ursua <i>et al.</i> , 2012)..... | 9 |
| Gambar 2. Kurva voltammogram elektrokatalis Cu ₂ O/C | 18 |
| Gambar 3. Kurva Nyquist elektrokatalis Cu ₂ O/C | 20 |
| Gambar 4. Sirkuit ekivalen elektrokatalis Cu ₂ O/C | 20 |
| Gambar 5. Perbandingan laju produksi hidrogen pada variasi pola aliran arus monopolar dan bipolar | 22 |
| Gambar 6. Hubungan kuat arus terhadap laju produksi hidrogen..... | 23 |
| Gambar 7. Kerusakan MEA stek elektroliser | 24 |
| Gambar 8. Korosi stek elektroliser bagian anoda arus 2A..... | 25 |
| Gambar 9. Cairan karat yang terbentuk pada current collector stek elektroliser arus 2 A | 25 |
| Gambar 10. Hubungan temperatur air terhadap laju produksi hidrogen..... | 26 |

DAFTAR TABEL

| | Halaman |
|---|----------------|
| Tabel 1. Sifat H ₂ pada kondisi ambient..... | 4 |
| Tabel 2. Perbandingan metode produksi hidrogen..... | 6 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | Halaman |
|---|----------------|
| Lampiran 1. Pembuatan <i>Gas Diffusion Layer</i> | 36 |
| Lampiran 2. Preparasi Katalis Cu ₂ O/C | 37 |
| Lampiran 3. Pembuatan Elektroda Katalis Cu ₂ O/C..... | 38 |
| Lampiran 4. Aktivasi Membran dan Pembuatan MEA..... | 39 |
| Lampiran 5. Skema Produksi Hidrogen | 40 |
| Lampiran 6. Perhitungan Pembuatan GDL..... | 41 |
| Lampiran 7. Karakterisasi CV Elektrokatalis Cu ₂ O/C Loading 3 mg/cm ² | 42 |
| Lampiran 8. Karakterisasi EIS Elektrokatalis Cu ₂ O/C loading 3 mg/cm ² | 43 |
| Lampiran 9. Perhitungan Laju Produksi Hidrogen pada Variasi Pola Aliran Arus Listrik..... | 44 |
| Lampiran 10. Perhitungan Laju Produksi Hidrogen pada Variasi Kuat Arus dengan Rangkaian Bipolar..... | 45 |
| Lampiran 11. Perhitungan Laju Produksi Hidrogen pada Variasi Temperatur Air dengan Rangkaian Bipolar Kuat Arus 2 A | 46 |
| Lampiran 12. Gambar Alat dan Bahan Penelitian | 47 |

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Era yang terus maju juga diiringi dengan konsumsi energi global yang meningkat secara bertahap karena pertumbuhan populasi dan standar gaya hidup. Pertumbuhan populasi mengakibatkan peningkatan pemanasan global dan pencemaran lingkungan, sehingga pengembangan sumber energi terbarukan menjadi lebih penting. Dilansir dari *International Energy Agency* (2022) menyatakan bahwa kapasitas energi terbarukan diperkirakan akan terus meningkat lebih dari 8% pada tahun 2022, mencapai hampir 320 GW. Salah satu solusi energi yang baru-baru ini dikembangkan ialah penggunaan energi ramah lingkungan yaitu hidrogen. Hidrogen adalah salah satu pembawa energi bersih dan berkelanjutan yang paling menjanjikan, hanya menghasilkan air sebagai produk sampingan tanpa emisi karbon (Shiva Kumar & Himabindu, 2019). Selain itu, hidrogen sebagai bahan bakar sel memiliki tingkat kepadatan gravimetri (140 MJ/kg) dan efisiensi yang tinggi (Wang *et al.*, 2021). Gas hidrogen yang ramah lingkungan, mampu menghasilkan kalor pembakaran mencapai 286 kJ/mol (Jasmine & Rustana, 2020).

Produksi hidrogen yang bervariasi dapat menunjukkan pula tingkat kebersihan yang berbeda. Berdasarkan bahan baku, metode sintesis dan emisi karbon, hidrogen dapat diklasifikasikan dalam berbagai warna, antara lain *gray*, *blue*, *turquoise*, *pink*, dan *green hydrogen*. *Gray* dan *blue hydrogen* memproduksi hidrogen dengan menggunakan sumber gas alam dan batubara serta melibatkan proses *steam methane reforming* dan gasifikasi. *Turquoise* dari sumber gas alam menggunakan proses pirolisis. *Pink* dari sumber energi nuklir dan *green hydrogen* dari sumber listrik terbarukan menggunakan metode elektrolisis (Gunawan, 2017). Metode elektrolisis berdasarkan elektrolit, kondisi operasi, dan agen ioniknya digolongkan menjadi tiga bagian, yaitu elektrolisis basa, elektrolisis air oksida padat, dan elektrolisis membran penukar proton (PEM). Metode PEM elektrolisis dianggap sebagai metode yang paling ramah lingkungan dan kemurnian tinggi (99,99%), karena hanya menghasilkan oksigen murni sebagai hasil sampingnya (Shiva Kumar & Himabindu, 2019). Hidrogen diproduksi berdasarkan prinsip pemi

sahan air yang difasilitasi oleh listrik (Wang *et al.*, 2021). Elektrolisis PEM diyakini sebagai metode terbaik dalam aplikasi industri masa depan, efisiensi energi yang lebih besar, suhu operasi yang lebih luas (20-80°C), dan spesialisasi adaptif terhadap volatilitas energi terbarukan (Wang *et al.*, 2022). Elektrolisis PEM juga memiliki hambatan berupa reaksi kinetika yang lambat. Hambatan energi yang besar disebabkan oleh beberapa langkah reaksi. Untuk itu, reaksi perlu dipercepat dengan menggunakan bantuan katalis yang dipadukan dengan elektroda, membentuk elektrokatalis. Elektrokatalis juga berfungsi untuk menurunkan potensi berlebih dan meminimalkan biaya energi (Ji *et al.*, 2018).

Elektrokatalis yang diperlukan dalam metode elektrolisis dibedakan menjadi dua yaitu *Oxygen Evolution Reaction* (OER) dan *Hydrogen Evolution Reaction* (HER). Elektrokatalis HER yang paling efisien hingga saat ini masih merupakan bahan berbasis Pt. Namun, kelangkaan dan tingginya biaya Pt menghambat aplikasi industri skala besar. Logam tembaga dapat dijadikan sebagai alternatif lain untuk menggantikan Pt sebagai elektrokatalis. Kemampuan tembaga dapat dikatakan menjanjikan karena kemudahannya terdeaktivasi pada suhu tinggi (Purnami dkk., 2015). Tembaga oksida, semikonduktor tipe-p, menawarkan celah pita langsung sempit yang digabungkan dengan posisi pita konduksi yang tepat di atas potensial reduksi air. Sifat semikonduktor yang diinginkan ini, dalam kombinasi dengan kelimpahan alami yang tinggi, toksisitas rendah, dan biaya tembaga yang rendah menjadikan Cu₂O bahan yang menjanjikan untuk aplikasi elektrokatalis metode elektrolisis yang lebih terjangkau (Singh *et al.*, 2018).

Sel elektrolisis juga ditentukan oleh model pola alirannya. Sel elektrolisis dapat dihubungkan secara paralel atau seri untuk membentuk modul elektrolisis. Pola aliran dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu monopolar dan bipolar. Aliran monopolar menghubungkan sel secara paralel pada terminal catu daya yang berkelanjutan. Sedangkan aliran bipolar menghubungkan sel secara seri dan mengonfigurasi suplai DC hanya pada dua elektroda ujung (Ursúa *et al.*, 2012). Pelat bipolar memiliki beberapa keunggulan dibandingkan pelat monopolar, antara lain mampu mengontrol seluruh sistem dalam rentang suhu tertentu dengan mudah, kerapatan arus lebih tinggi dan *stack* yang lebih padat (Bessarabov *et al.*, 2015). Sedangkan plat monopolar memiliki batasan suhu dan tekanan sel karena desain sel

(Wilberforce *et al.*, 2018). Hal ini menjadi pertimbangan untuk melakukan penelitian mengenai produksi hidrogen pada rangkaian arus listrik monopolar dan bipolar. Selain itu dilakukan pula penentuan arus dan temperatur air terbaik pada masing-masing variasi parameter tersebut, dengan nilai laju produksi hidrogen tertinggi sebagai acuannya.

1.2 Rumusan Masalah

1. Apa pola aliran arus terbaik antara monopolar dan bipolar pada metode PEM elektrolisis dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ ditinjau dari nilai laju produksi hidrogennya?
2. Berapa kuat arus terbaik yang diterapkan pada pola aliran arus terbaik metode PEM elektrolisis dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ ditinjau dari nilai laju produksi hidrogennya?
3. Berapa temperatur air terbaik yang diterapkan pada pola aliran arus terbaik dan kuat arus terbaik metode PEM elektrolisis dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ ditinjau dari nilai laju produksi hidrogennya?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menentukan tipe pola aliran arus yang paling efisien untuk produksi hidrogen berdasarkan laju produksi hidrogen.
2. Menentukan arus listrik terbaik yang diterapkan pada pola aliran arus yang paling efisien berdasarkan laju produksi hidrogen.
3. Menentukan temperatur air terbaik yang diterapkan pada pola aliran arus paling efisien dan arus terbaik terhadap laju produksi hidrogen.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Untuk menambah wawasan dan inovasi untuk produksi energi hidrogen yang ramah lingkungan, *sustainable*, dan *compatible*.
2. Penerapan atau aplikasi produksi energi dengan metode sederhana yang erat kaitannya dalam kehidupan sehari-hari.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad Kamaroddin, M. F., Sabli, N., Tuan Abdullah, T. A., Siajam, S. I., Abdullah, L. C., Abdul Jalil, A., & Ahmad, A. (2021). Membrane-based electrolysis for hydrogen production: A review. *Membranes*, *11*(11), 1–27. <https://doi.org/10.3390/membranes11110810>.
- Anantharaj, S., & Noda, S. (2020). Appropriate Use of Electrochemical Impedance Spectroscopy in Water Splitting Electrocatalysis. *ChemElectroChem*, *7*(10), 2297–2308. <https://doi.org/10.1002/celec.202000515>
- Ausfelder, F., & Bazzanella, A. (2016). Hydrogen in the Chemical Industry. *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*, *1*, 19–39. <https://doi.org/10.1002/9783527674268.ch02>
- Bessarabov, D., Wang, H., Li, H., & Zhao, N. (2015). PEM Electrolysis for Hydrogen Production. In *Book* (Issue 1). <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- Blasio, N. De, Hua, C., & Nuñez-jimenez, A. (2021). *Sustainable Mobility: Renewable Hydrogen in the Transport Sector*. June, 1–6.
- Blommaert, M. A., Vermaas, D. A., Izelaar, B., In't Veen, B., & Smith, W. A. (2019). Electrochemical impedance spectroscopy as a performance indicator of water dissociation in bipolar membranes. *Journal of Materials Chemistry A*, *7*(32), 19060–19069. <https://doi.org/10.1039/c9ta04592a>
- Brandon, N. P., & Kurban, Z. (2017). Clean energy and the hydrogen economy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *375*(2098). <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0400>
- Brauns, J., & Turek, T. (2020). Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review. *Processes*, *8*(2). <https://doi.org/10.3390/pr8020248>
- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, *38*(12), 4901–4934. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- Chen, J. P., Chang, S., & Hung, Y. (2005). *Electrolysis* (Vol. 3, pp. 359–360).
- Chi, J., & Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, *39*(3), 390–394. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8)
- Cho, H. H., Strezov, V., & Evans, T. J. (2022). Environmental impact assessment of hydrogen production via steam methane reforming based on emissions data. *Energy Reports*, *8*, 13585–13595. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.053>
- Crews, M. A., & Shumake, B. G. (2017). Hydrogen production. In *Springer Handbooks* (Vol. PartF1). https://doi.org/10.1007/978-3-319-49347-3_24
- Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(7), 3847–3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>

- Dong, S., Zhang, C., Yue, Z., Zhang, F., Zhao, H., *et al.* (2022). *Supporting Information Overall design of anode with gradient ordered structure with low iridium loading for proton exchange membrane water electrolysis.*
- 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>
- Faisal, N. H., Prathuru, A., Ahmed, R., Rajendran, V., Hossain, M., *et al.* (2022). Application of Thermal Spray Coatings in Electrolysers for Hydrogen Production: Advances, Challenges, and Opportunities. *ChemNanoMat*, 202200384. <https://doi.org/10.1002/cnma.202200384>
- Falcão, D. S., & Pinto, A. M. F. R. (2020). A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners. *Journal of Cleaner Production*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121184>
- 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>
- Gouws, S. (2012). Voltammetric Characterization Methods for the PEM Evaluation of Catalysts. *Electrolysis*. <https://doi.org/10.5772/48499>
- Gunawan, D. (2017). Unlocking the Potential of Hydrogen in Indonesia. In *PDEng Final Report* (Vol. 9431, Issue February 2012, pp. 1–5). <https://doi.org/10.55981/brin.562.c11>
- Heese-Gärtlein, J., Morales, D. M., Rabe, A., Bredow, T., Schuhmann, W., & Behrens, M. (2020). Factors Governing the Activity of α -MnO₂ Catalysts in the Oxygen Evolution Reaction: Conductivity versus Exposed Surface Area of Cryptomelane. *Chemistry - A European Journal*, 26(53), 12256–12267. <https://doi.org/10.1002/chem.201905090>
- Holzapfel, P., Bühler, M., Van Pham, C., Hegge, F., Böhm, T., *et al.* (2020). Directly coated membrane electrode assemblies for proton exchange membrane water electrolysis. *Electrochemistry Communications*, 110(November 2019), 106640. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.106640>
- Jasmine, S., & Rustana, C. E. (2020). Produksi Gas Hidrogen Dengan Proses Elektrolisis Air. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2020, IX*, 5–8.
- Ji, L., Lv, C., Chen, Z., Huang, Z., & Zhang, C. (2018). Nickel-Based (Photo)Electrocatalysts for Hydrogen Production. *Advanced Materials*, 30(17), 1–7. <https://doi.org/10.1002/adma.201705653>
- 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>

- Kamaroddin, M. F. A., Sabli, N., Abdullah, T. A. T., Abdullah, L. C., Izhar, S., Ripin, A., & Ahmad, A. (2019). Effect of temperature and current density on polybenzimidazole zirconium phosphate hybrid membrane in copper chloride electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Integrated Engineering*, *11*(7), 182–189. <https://doi.org/10.30880/ijie.2019.11.07.024>
- Keçebaş, A., & Kayfeci, M. (2019). Hydrogen properties. *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*, 3–29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00001-1>
- Kothari, R., Buddhi, D., & Sawhney, R. L. (2005). Studies on the effect of temperature of the electrolytes on the rate of production of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, *30*(3), 261–263. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.03.030>
- Lettenmeier, P., Gago, A. S., & Friedrich, K. A. (2017). Protective Coatings for Low-Cost Bipolar Plates and Current Collectors of Proton Exchange Membrane Electrolyzers for Large Scale Energy Storage from Renewables. *New Technologies in Protective Coatings*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68528>
- Li, C., Liu, S., Jin, X., Zuo, Z., Yang, H., Jing, H., & Cao, X. (2022). One-step fabrication of Cu₂O-Cu catalytic electrodes with regular porous array by ultra-fast laser scanning. *Journal of Alloys and Compounds*, *900*, 163455. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163455>
- Liu, H., Ney, L., Zamel, N., & Li, X. (2022). Effect of Catalyst Ink and Formation Process on the Multiscale Structure of Catalyst Layers in PEM Fuel Cells. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*(8). <https://doi.org/10.3390/app12083776>
- Liu, W., Zuo, H., Wang, J., Xue, Q., Ren, B., & Yang, F. (2021). The production and application of hydrogen in steel industry. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(17), 10548–10569. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.123>
- Lukaszewski, M., Soszko, M., & Czerwiński, A. (2016). Electrochemical methods of real surface area determination of noble metal electrodes - an overview. *International Journal of Electrochemical Science*, *11*(6), 4442–4469. <https://doi.org/10.20964/2016.06.71>
- Maric, R., & Yu, H. (2019). Proton Exchange Membrane Water Electrolysis as a Promising Technology for Hydrogen Production and Energy Storage. *Nanostructures in Energy Generation, Transmission and Storage*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78339>
- Moreno Soriano, R., 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>

- Müller, F., Ferreira, C. A., Denise, S., Alemán, C., & Armelin, E. (2014). Measuring the Proton Conductivity of Ion-Exchange Membranes Using EIS Technique and a Through-Plane Cell. *J. Phys. Chem. B*.
- O'Neil, G. D., Christian, C. D., Brown, D. E., & Esposito, D. V. (2016). Hydrogen Production with a Simple and Scalable Membraneless Electrolyzer. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(11), F3012–F3019. <https://doi.org/10.1149/2.0021611jes>
- 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(June). <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116479>
- Ogumerem, G. S., & Pistikopoulos, E. N. (2020). Parametric optimization and control for a smart Proton Exchange Membrane Water Electrolysis (PEMWE) system. *Journal of Process Control*, 91, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2020.05.002>
- Palupi, B., & Harto, A. W. (2011). *Pengaruh Variasi Temperatur Input Elektrolizer Terhadap Efisiensi Produksi Hidrogen Menggunakan Molten Salt Reactor (Msr) Dengan High Temperature Electrolysis Of Steam (Htes) Terhadap Efisiensi Produksi Hidrogen Menggunakan Molten Salt Reactor (MSR)*. July 2020.
- 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>
- Purnami, P., Wardana, I., & K, V. (2015). Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Laju Dan Efisiensi Pembentukan Hidrogen. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 6(1), 51–59. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2015.006.01.8>
- Radestia Rahmah, D., Rohendi, D., Syarif, N., Rachmat, A., Sya'baniah, N. F., & Hawa Yulianti, D. (2021). Characterization of Electrode with Cu₂O-ZnO/C and Pt-Ru/C Catalyst for Electrochemical Reduction CO₂ to CH₃OH. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 6(1), 8–13. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v6.i1.08>
- Rashid, M. 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. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 3, 2249–8958.
- Rohendi, D., Syarif, N., Rachmat, A., Mersitarini, D., Ardiyanta, D., *et al.* (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>

- Saklin, M. K., Das, R. C., Akther, Y., Dewanjee, S., Das, S. K., Monir, T. S. B., & Mondal, S. (2020). Efficiency of Aluminium and Copper Coated Aluminium Electrode in Hydrogen Fuel Generation from Rain Water. *Energy and Power Engineering*, 12(06), 348–356. <https://doi.org/10.4236/epe.2020.126021>
- Santos, D. M. F., Sequeira, C. A. C., & Figueiredo, J. L. (2013). Hydrogen production by alkaline water electrolysis. *Quimica Nova*, 36(8), 1176–1193. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000800017>
- Savitri, W. (2020). Produksi Hidrogen Melalui Elektrolisis Air Dengan Menggunakan Membrane Electrode Assembly (Mea) Pada Arus, Temperatur Dan Katalis Bervariasi. In *Molecules* (Vol. 2, Issue 1).
- Schwartz, N., Harrington, J., Ziegler, K. J., & Cox, P. (2022). *Effects of Electrode Support Structure on Electrode Microstructure, Transport Properties, and Gas Diffusion within the Gas Diffusion Layer*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02669>
- 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>
- Sharma, S., Agarwal, S., & Jain, A. (2021). Significance of hydrogen as economic and environmentally friendly fuel. *Energies*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/en14217389>
- Shiva Kumar, 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>
- Singh, M., Jampaiah, D., Kandjani, A. E., Sabri, Y. M., Della Gaspera, E., *et al.* (2018). Oxygen-deficient photostable Cu₂O for enhanced visible light photocatalytic activity. *Nanoscale*, 10(13), 6039–6050. <https://doi.org/10.1039/c7nr08388b>
- Siracusano, S., Trocino, S., Briguglio, N., Baglio, V., & Aricò, A. S. (2018). Electrochemical impedance spectroscopy as a diagnostic tool in polymer electrolyte membrane electrolysis. *Materials*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/ma11081368>
- Storion, A. G., Pallone, E. M. de J. A., Giraldo, T. R., & Maestrelli, S. C. (2021). Influence of the shaker mill in the properties of ZnO processed by high energy milling. *Research, Society and Development*, 10(12), e476101220855. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20855>
- Suen, N. T., Hung, S. F., Quan, Q., Zhang, N., Xu, Y. J., & Chen, H. M. (2017). Electrocatalysis for the oxygen evolution reaction: Recent development and future perspectives. *Chemical Society Reviews*, 46(2), 337–365. <https://doi.org/10.1039/c6cs00328a>
- Ursúa, A., Gandía, L. M., & Sanchis, P. (2012). Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*, 100(2), 410–426. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2156750>

- Wang, J. T., Wang, W. W., Wang, C., & Mao, Z. Q. (2012). Corrosion behavior of three bipolar plate materials in simulated SPE water electrolysis environment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(17), 12069–12073. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.146>
- 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>
- Wehrley, J., & Doyle, J. (2022). *Electrical Analysis of a PEM Electrolysis Cell*. *Electrical Analysis of a PEM Electrolysis Cell*. 10(1), 1–6.
- Wilberforce, T., Khatib, F. N., Ogungbemi, E., & Olabi, A. G. (2018). Water Electrolysis Technology. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1–23. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11273-1>
- Yadav, R., & Fedkiw, P. S. (2012). Analysis of EIS Technique and Nafion 117 Conductivity as a Function of Temperature and Relative Humidity. *Journal of The Electrochemical Society*, 159(3), B340–B346. <https://doi.org/10.1149/2.104203jes>
- Yakdehige Sanath Kumara De Silva. (2017). Design of an Alkaline Electrolysis Stack. *Research Gate*, 1–95. https://www.researchgate.net/publication/339472330_Design_of_an_Alkaline_Electrolysis_Stack
- Yan, Z., Hitt, J. L., Turner, J. A., & Mallouk, T. E. (2020). Renewable electricity storage using electrolysis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(23), 12558–12563. <https://doi.org/10.1073/pnas.1821686116>
- Zhao, S., Yu, H., Maric, R., Danilovic, N., Capuano, C. B., Ayers, K. E., & Mustain, W. E. (2015). Calculating the Electrochemically Active Surface Area of Iridium Oxide in Operating Proton Exchange Membrane Electrolyzers. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(12), F1292–F1298. <https://doi.org/10.1149/2.0211512jes>