

**PRODUKSI HIDROGEN DENGAN METODE ELEKTROLISIS AIR
MENGGUNAKAN PEM ELEKTROLISER PADA KOMPOSISI KATALIS
Cu₂O/C DAN KONDISI AIR BERVARIASI**

SKRIPSI

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



**Oleh :
Ade Marisa
08031381823064**

**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2022**

HALAMAN PENGESAHAN

PRODUKSI HIDROGEN DENGAN METODE ELEKTROLISIS AIR MENGGUNAKAN PEM ELEKTROLISER PADA KOMPOSISI KATALIS $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ DAN KONDISI AIR BERVARIASI

SKRIPSI

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

Oleh :

Ade Marisa

08031381823064

Indralaya, 19 Juli 2022

PEMBIMBING I



Dr. Dedi Rohendi, M.T
NIP. 1967004191993031001

PEMBIMBING II



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

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 dengan judul “Produksi Hidrogen dengan Metode Elektrolisis Air Menggunakan PEM Elektroliser pada Komposisi Katalis Cu₂O/C dan Kondisi Air Bervariasi” telah dipertahankan dihadapan Tim Penguji Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 18 Juli 2022 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

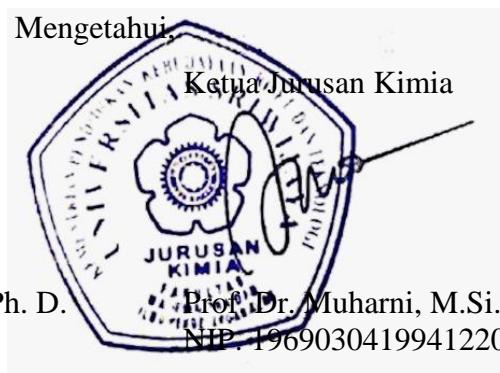
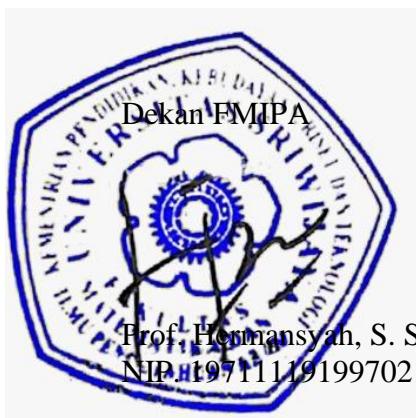
Inderalaya, 19 Juli 2022

Pembimbing:

1. **Dr. Dedi Rohendi, M. T** ()
NIP.196704191993031001
2. **Prof. Hermansyah, S. Si., M. Si., Ph. D** ()
NIP. 197111191997021001

Pengaji:

1. **Dr. Desnelli , M. Si.** ()
NIP. 196912251997022001
2. **Dr. Suheryanto, M. Si.** ()
NIP. 196006251989031006



PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama Mahasiswa : Ade Marisa

NIM : 08031381823064

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 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.

Inderalaya, 19 Juli 2022

Yang Menyatakan,




Ade Marisa

NIM. 08031381823064

HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama Mahasiswa : Ade Marisa
NIM : 08031381823064
Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “Produksi Hidrogen dengan Metode Elektrolisis Air Menggunakan PEM Elektroliser pada Komposisi Katalis Cu₂O/C dan Kondisi Air Bervariasi”. Dengan hak bebas royalty non-ekslusif 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.

Inderalaya, 19 Juli 2022

Yang menyatakan,



Ade Marisa
NIM. 08031381823064

HYDROGEN PRODUCTION WITH WATER ELECTROLYSIS METHOD USING PEM ELECTROLYCER ON COMPOSITION OF Cu₂O/C CATALYST AND VARIOUS WATER CONDITIONS

Ade Marisa: Supervised oleh Dr. Dedi Rohendi, M.T and Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D

Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Science, Sriwijaya University
x + 78 pages, 6 tables, 16 images, 9 appendices

SUMMARY

Hydrogen can be used as an energy carrier be converted into electrical energy using a fuel cell with a by product of water. In nature, there are a lot of abundance of hydrogen however the existence is not as a free atom but affiliated with other elements, one of which is water. One of the methods that used to produce hydrogen by using PEM water electrolysis. This study using PEM water electrolysis with different variation of catalyst of Cu₂O:C that applied on Gas Diffusion Layer (GDL) to from electrodes. The electrodes are characterized using Cyclic Volammetry (CV) method to calculate the active surface area of catalyst (ECSA) and Electrochemical Surface Area (EIS) method to calculate the conductivity of electrodes. The optimum ECSA values was on an electrode with variation of Cu₂O:C 65:35 of 49,295 cm²/g and the optimum conductivity value was on an electrode with variation of Cu₂O:C of 56,640 S/cm. The optimum of rate of hydrogen production using single electrolyser was on MEA with the ratio of catalyst Cu₂O:C 65:35 with current density at 0,08 A/cm² and rate of hydrogen production at 1,667 mL/s. The 65:35 catalyst was tested using a double cutting electrolyzer, the best production rate was obtained at a current density of 0.05 A/cm² of 3.411 mL/s and a test for warm water conditions at a temperature of 60-70°C with a density of 0.12 A/cm² was 2.427 mL/s s.

Key words : Water Electrolysis, Cu₂O/C, PEMFC

Citation : 81 (2007-2022)

**PRODUKSI HIDROGEN DENGAN METODE ELEKTROLISIS AIR
MENGGUNAKAN PEM ELEKTROLISER PADA KOMPOSISI KATALIS
 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ DAN KONDISI AIR BERVARIASI**

Ade Marisa: Dibimbing oleh Dr. Dedi Rohendi, M.T dan Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D

Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya
x + 78 halaman, 6 tabel, 16 gambar, 8 lampiran

RINGKASAN

Hidrogen dapat dijadikan sebagai energi pembawa untuk dikonversi menjadi energi listrik menggunakan *fuel cell* dengan produk samping berupa air. Hidrogen sendiri memiliki kelimpahan di alam namun keberadaannya tidak tersedia secara bebas melainkan bergabung dengan unsur lain salah satunya molekul air. Salah satu metode yang digunakan untuk produksi hidrogen berupa elektrolisis air menggunakan PEM karena memiliki tingkat kemurnian yang tinggi. Pada penelitian ini digunakan metode elektrolisis air menggunakan PEM dengan variasi perbandingan komposisi katalis $\text{Cu}_2\text{O}:\text{C}$ yang diaplikasikan pada *Gas Diffusion Layer* (GDL) untuk membentuk elektroda. Masing-masing elektroda dikarakterisasi menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk menghitung luas permukaan aktif katalis (ECSA) pada elektroda dan karakterisasi *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) untuk mengetahui nilai konduktivitas elektroda. Nilai ECSA terbaik terdapat pada elektroda dengan perbandingan komposisi katalis $\text{Cu}_2\text{O}:\text{C}$ 65:35 sebesar $49,295 \text{ cm}^2/\text{g}$ dan nilai konduktivitas terbaik terdapat pada elektroda dengan perbandingan komposisi katalis $\text{Cu}_2\text{O}:\text{C}$ 35:65 sebesar $56,640 \text{ S/cm}$. Laju produksi hidrogen terbaik menggunakan elektroliser tunggal terdapat pada MEA perbandingan komposisi katalis 65:35 pada kerapatan arus $0,08 \text{ A/cm}^2$ dengan laju produksi hidrogen sebesar $1,667 \text{ mL/s}$. Katalis 65:35 dilakukan pengujian menggunakan elektroliser *stack* ganda didapatkan laju produksi terbaik pada kerapatan arus $0,05 \text{ A/cm}^2$ sebesar $3,411 \text{ mL/s}$ dan dilakukan pengujian kondisi air hangat pada temperatur $60\text{-}70^\circ\text{C}$ kerapatan $0,12 \text{ A/cm}^2$ sebesar $2,427 \text{ mL/s}$.

Kata kunci :Elektrolisis Air, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$, PEMFC
Situs : 81 (2007-2022)

HALAMAN PERSEMBAHAN

“....Katakanlah: "Adakah sama orang-orang yang mengetahui dengan orang-orang yang tidak mengetahui?...”

(QS. Az-Zumar : 9)

Skripsi ini sebagai tanda syukurku kepada Allah Subhanahu Wa Ta'aala

Skripsi ini saya persembahkan kepada

- orang tuaku dan terkhusus ibuku yang selalu senantiasa mendoakan, memberi *support* yang tiada henti dan selalu memberikan yang terbaik.
- Keluarga besarku
- Pembimbing dan guruku yang senantiasa memberikan dukungan dan arahan
- Sahabat-sahabatku yang terus memberikan dukungan dalam bentuk apapun
- Almamaterku (Universitas Sriwijaya)

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur atas rahmat dan karunia Allah SWT sehingga penulis akhirnya dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul: “Produksi Hidrogen dengan Metode Elektrolisis Air Menggunakan PEM Elektroliser pada Komposisi Katalis Cu₂O/C dan Kondisi Air Bervariasi”. 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 pengumpulan literatur, penelitian, pengumpulan data dan sampai pada pengolahan data maupun dalam tahap penulisan. Namun dengan kesabaran dan ketekunan yang dilandasi dengan rasa tanggung jawab selaku mahasiswa dan juga bantuan dari berbagai pihak, baik material maupun moril, akhirnya selesai sudah penulisan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak **Dr. Dedi Rohendi, M.T** dan **Prof. Hermansyah, Ph.D** yang telah banyak memberikan bimbingan, bantuan, motivasi, saran dan petunjuk kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Hermansyah, Ph.D selaku Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya dan Pembimbing Akademik
2. Ibu Prof. Dr. Muhamni, 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. Dedi Rohendi, M.T selaku dosen Pembimbing Tugas Akhir
5. Bapak Dr. Suheryanto, M.Si dan Ibu Dr Desnelli, M.Si selaku pembahas dan penguji sidang sarjana.
6. Seluruh Dosen FMIPA Kimia Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu, mendidik dan membimbing selama masa kuliah.
7. Ibu Siti Nuraini, S.T., Ibu Yuniar, S.T. M. Sc., dan Ibu Hanida Yanti, A. Md. selaku analis di Laboratorium Kimia.

8. Mbak Novi dan Kak Chosiin selaku Admin Jurusan Kimia yang banyak membantu dalam proses perkuliahan hingga tugas akhir.
9. Mamaku, terimakasih atas semua pengorbanan, doa, dukungan yang tiada henti-hentinya. Pokoknya makasih sebanyak-banyaknya atas peran yang amat berarti dalam hidup Ade. Terimakasih juga kepada almarhum ayahanda atas peran pentingnya dalam perjalanan hidupku, kalian terbaik.
10. Opa, oma, kakek dan nenek terimakasih atas semua dukungan dan doa yang sudah diberikan
11. Adik-adikku, terimakasih banyak sudah menjadi penghiburku dikala sedih walaupun terkadang menjadi beban kepalaku dikala kakakmu ini pusing. Sukses dan berbakti selalu yaa para bocil-bocil akuu.
12. Keluarga Besarku, terimakasih sudah selalu memberikan dukungan, doa dan pertanyaan-pertanyaan yang membuatku terpaku untuk cepat menyelesaikan Pendidikan ini.
13. Para saudariku Dita, Indah, Ayu kalian bagian penting dalam perjalanan hidupku dari kecil sampai saat ini. Terimakasih banyak atas semua hal yang selalu kalian berikan, baik dari segi materi, waktu dan pikiran. Terimakasih sudah menjadi tempat keluh kesah dan suka duka hehe.
14. Kak Icha selaku mentorku terimakasih banyak atas semua ilmu dan waktu yang sudah kakak berikan terhadap ade. Terimakasih banyak sudah mau direpotkan, sudah mau diribetkan, sudah mau dipusingkan. Semoga ilmu yang kakak ajarkan menjadi amal jariyah, Aamiin. Semangat terus, sukses terus dan teruslah bertansformasi menjadi yang terbaik dan lebih baik kak yaw.
15. Kak Reka terimakasih banyak atas semua bantuan kakak dan ketersediaan kakak dalam menerima keluh kesah, membimbing dengan penuh kesabaran yang luar biasa. udah sering bantu, *support* dan menasehati adik-adik kakak, terimakasih juga kakak dah jadi orang palinggg pengertian hehe.
16. Kak Dwi, terimakasih banyak atas semua bimbingan dalam bidang penelitian dan terimakasih nasihat serta arahan mengenai kehidupan dunia

yang sulit ini hehe. Semoga Allah membalas semua kebaikan kakak dan tetep terus menjadi orang yang sabar kak yaa.

17. Sobat-sobat tersayang aku careska dan nayah terimakasih banyak telah menjadi bagian penting dalam perjalanan sekolah dan kuliahku, semangat terus dalam menghitung-hitung caa dan keep sabar ya nay dalam mendidik. Fitri dan Dinda terimakasih para ibuk dokterku yang senantiasa memarahi dan menasihatiku, yoklah gas KTI lagi hehe.
18. Para pencari cuan team. Kak Yun, terimakasih dem bersedia dan siap telinga menjadi tempat ade curhat terus, dem baik sykali, perhatian sykali layakny kakak yang garang tapi aslinya baik wkwk pokokny kakak terbaik hehe yok jajan. Ilyas Izzuddin terimakasih telah bersedia menjadi tempat jajan, cerite, mengeluh, mengabut, mengsedih aku dari maba sampe tudey, bersedia ngejarin walaupun kadang tetep dak ngerti wkwk, Bahagia plus sukses terus dan inget jangan lupo jajan nomor 1 haha.
19. Adinda Thalia Salsabilla support system aku yang selalu ada dan hadir dalam setiap cerita kehidupan ini cerita semasa kuliah dari maba sampe akhirnya TA bareng, cerita senang, duka dan ngedumel bareng, rumpi bareng, jajan bareng semuanya pokokny kamu terbaik dan tetap menjadi yang terbaik. Semangat terus dindaaa, jalani dan lewati dengan sabar dan syukur semua yang ada didepan, terimakasih banyak untuk semuanya yak dan inget aku padamu din wkwk.
20. Gandus Kingdom, lidya dan irene terimakasih semua kebaikan dan keseruan dan suka duka dari awal daftar dan entah sampai kapan, atas semua support, nasihat, ilmu dan apapun yang telah diberikan. Jangan lupa untuk tetap semangat dan jalan-jalan yee.
21. Arif Septiawan, terimakasih sudah membantu banyak dalam berbagai hal baik itu usaha, lomba ataupun tugas kuliah dan terimakasih telah menjadi partner yang baik selama organisasi, kuliah dan apapun itu. Sahrul Wibian dan Awe Pratama, terimakasih juga telah memberikan bantuan dan mau menerima aku sebagai temen kalian walaupun sering dibilang jadi “Anak bawang” be tapi aku tetep senang, lah bersedia terus temenan

dari awal kuliah sampe sekarang walaupun aku sering ngeseli dan nak menang tulah. Terimakasih telah membersamai anak bawang selama perkuliahan 4 tahun ini, kalian terbaik dan jangan lupa piknik.

22. Dulur damri, terimakasih atas semua kisah dan cerita dari awal maba sampai saat ini, pertemua yang tak pernah disangka-sangka dan alhamdulilah dipertemukan dengan orang-orang baik dalam squad ini hehe. Suteja terimakasih banyak nian atas semua ketersedian waktu dan tenaga yang senantiasa membantu semua teman-temannya termasuk aku yang dikit-dikit “jak tolong”, Prima dan tiur terimakasih sudah sering menghibur dikala pusing dan membantu dikala lah dak tau lagi harus apo wkwk, Rafiud terimakasih atas semua bantuan per ITan, Iqbal makasih dem sering nebengin eheh. Semangat dan sukses terus teman-teman.
23. Hydrogen team, Al-ghifari terimakasih atas semua bantuannya, kerecehannya, kesolidannya dan kepusingannya serta warna warni selamo ngelab padahal warnany “kelabu” wkwk, kak nadia terimakasih sudah sering membantu dikala kuliah sembari MK yee
24. Purgeng (Ayuk aku keke, Iren, Devi, Anin, mary, eko, sandi, Irma) terima kasih atas semua bantuan yang sudah diberikan. Devi dan anin terimakasih banyak atas semua support selama menjadi partner perseminaran, sebagai tempat informasi dan berpusing ria bareng wkwk.
25. Jeniva, Rahma, Maria Ulfa, bening, tiara, restri, malinda, ade dwi, kak luvita, andini, eno dan kak Daniel terimakasih banyak telah memberikan dukungan, bantuan dan semua lembaran cerita semasa perkuliahan ini.
26. KIMIA angkatam 2018. Terimakasih banyak atas semua lembar cerita perkuliahan, semangat teman-teman dan sukses terus yak.
27. Semua pihak yang telah membantu saya baik secara langsung maupun tidak langsung yang tidak dapat disebutkan satu per satu, sehingga saya dapat menyelesakan 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 Subhanahu Wa

Ta'aala. 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.

Inderalaya, Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	
SUMMARY	iv
RINGKASAN	v
HALAMAN PERSEMBAHAN`	
KATA PENGANTAR	
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxi
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
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	5
2.2. Aplikasi Hidrogen	6
2.2.1. Hidrogen Sebagai Bahan Bakar	6
2.2.2. Hidrogen dalam Bidang Industri	8
2.3. Produksi Hidrogen.....	8
2.3.1. Steam Reforming.....	9
2.3.2. Aluminum Water.....	9

2.3.3. Batubara	10
2.3.4. Biomassa	10
2.3.5. Elektrolisis.....	12
2.3.5.1. Elektolisis Oksida Padat.....	12
2.3.5.2. Elektrolisis Larutan Alkali	13
2.3.5.3. Elektrolisis Air dengan <i>Proton Excange Membran</i>	15
2.4. Komponen Elektrolisis Air Menggunakan PEM	16
2.4.1. Plat Bipolar.....	16
2.4.2. Pengumpul Arus.....	17
2.4.3. Membran Electroda Assembly (MEA)	17
2.4.4. Elektroda	18
2.5. Katalis.....	19
2.5.1. Tembaga (I) Oksida.....	20
2.5.2. Karbon.....	20
2.6. Membran Nafion	21
2.7. Penyimpanan Hidrogen	21
2.8. <i>Cyclic Voltametri (CV)</i>	22
2.9. <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i>	23
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	24
3.1. Waktu dan Tempat	24
3.2. Alat dan Bahan	24
3.2.1. Alat	24
3.2.2. Bahan.....	24
3.3. Prosedur Penelitian.....	24
3.3.1. Pembuatan <i>Gas Diffusion Layer (GDL)</i>	25
3.3.2 Pembuatan Katalis Cu ₂ O/C.....	25
3.3.3. Pembuatan Elektroda Cu ₂ O/C.....	25
3.3.4. Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda Menggunakan Metode <i>Cyclic Voltammetry (CV)</i>	26
3.3.5. Pengukuran Nilai Konduktivitas Elektrik Elektroda menggunakan Metode <i>Electrochemical Impedance Spectriscopy (EIS)</i>	26

3.3.6. Aktivasi Membran.....	26
3.3.7. Pembuatan Membrane Electrode Assembly (MEA)	26
3.3.8. Produksi Hidrogen	27
3.3.8.1 Produksi Hidrogen Menggunakan <i>Stack</i> Tunggal pada Kondisi Air dan Arus Bervariasi.....	27
3.3.8.2 Produksi Hidrogen Menggunakan <i>Stack</i> Ganda pada Arus Bervariasi	27
3.4. Data dan Perhitungan	27
3.4.1. Analisis Data	28
3.4.2 Rumus Laju Produksi Hidrogen.....	28
3.4.3. Analisis pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda	29
3.4.4. Analisis Konduktivitas Elektrik Elektroda.....	29
BAB IV	31
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1 Pembuatan Elektroda.....	31
4.2 Karakterisasi Elektroda Menggunakan Metode <i>Cyclic Voltammetry (CV)</i>	32
4.3 Karakterisasi Elektroda Menggunakan Metode <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>	34
4.4 Produksi Hidrogen dengan Metode Elektrolisis Air Menggunakan <i>Stack</i> Tunggal pada Komposisi Katalis, Kondisi Air dan Arus Bervariasi	36
4.4.1 Produksi Hidrogen pada Komposisi Katalis dan Arus Bervariasi Menggunakan Air Temperatur Ruang.....	36
4.4.2 Produksi Hidrogen Menggunakan Air Temperatur 60-70°C pada Arus Bervariasi.....	38
4.5 Produksi Hidrogen dengan Metode Elektrolisis Air Menggunakan <i>Stack</i> Ganda pada Arus dengan Arus Bervariasi	39
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	41
5.1 Kesimpulan.....	41
5.2 Saran	41
DAFTAR PUSTAKA	42
LAMPIRAN	49

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Siklus Penggunaan Hidrogen	8
Gambar 2. Skema Pergeseran Temperatur CO	9
Gambar 3. Skema Elektrolisis Oksida Padat	12
Gambar 4. Skema Desain Elektrolisis Larutan Alkali	14
Gambar 5. Susunan <i>Stack</i> Elektrolisis Air Menggunakan PEM	15
Gambar 6. Arah Aliran Keluar Masuk dari Bidang Aliran Plat Bipolar.....	17
Gambar 7. <i>Membrane Elecroda Assembly</i> (MEA)	18
Gambar 8. Elektrolisis Air Menggunakan PEM dengan Membran Nafion	21
Gambar 9. Kapasitas Penyimpanan Hidrogen	22
Gambar 10. Grafik Voltammogram	22
Gambar 11. Elektroda Katalis Cu ₂ O/C	30
Gambar 12. Kurva Voltammogram Elektroda Katalis Cu ₂ O/C	33
Gambar 13. Kurva Nyquist pengukuran EIS Elektroda Katalis Cu ₂ O/C.....	35
Gambar 14. Laju Produksi Hidrogen Menggunakan Sel Tunggal	37
Gambar 15. Laju Produksi Hidrogen dengan Kondisi Air Bervariasi	38
Gambar 16. Grafik Perbandingan Laju Produksi Hidrogen <i>Stack</i> Tunggal dan <i>Stack</i> Ganda.....	40

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Sifat Fisika Hidrogen	5
Tabel 2. Perbandingan Hidrogen, Metana dan Besin Sebagai Bahan Bakar	7
Tabel 3. Spesifikasi Elektrolisis Larutan Alkali	14
Tabel 4. Spesifikasi Elektrolisis Air Menggunakan PEM	16
Tabel 5. Nilai Area Distribusi Cu	32
Tabel 6. Hasil Perhitungan Nilai ECSA Elektroda Cu ₂ O/C	33
Tabel 7. Nilai Konduktivitas Elektroda Cu ₂ O/C.....	35

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Prosedur Pengerjaan	50
Lampiran 2. Perhitungan Kandungan komponen Katalis	55
Lampiran 3. Jumlah Senyawa Berat Senyawa	59
Lampiran 4. Perhitungan Nilai <i>Electrochemical Surface Area</i> (ECSA).....	60
Lampiran 5. Pengukuran Nilai Konduktivitas Menggunakan EIS.....	66
Lampiran 6. Perhitungan Laju Produksi Hidrogen	69
Lampiran 7. Alat dan Bahan	76

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi memiliki peran yang penting dalam aspek kehidupan yang mencakup aspek lingkungan, industri, maupun kegiatan ekonomi (Abe *et al.*, 2019). Penggunaan energi saat ini didominasi oleh bahan bakar fosil yang tidak bisa diperbarui dan dapat menyebabkan pemanasan global (Tanur dkk., 2010; Xu *et al.*, 2020). Hidrogen dapat dijadikan sebagai salah satu bahan bakar yang bersifat ramah lingkungan dan dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan alat *fuel cell* dengan hasil samping berupa air (Safitri *et al.*, 2016). Hidrogen merupakan unsur berlimpah namun tidak tersedia secara bebas di alam. Selain digunakan sebagai bahan bakar transportasi (House & House, 2016) hidrogen juga digunakan pada pabrik industri (Chi and Yu, 2018) dan sintesis senyawa organik (Sutardi dan abdul, 2020). Adapaun cara-cara yang dapat dilakukan untuk memproduksi hidrogen antara lain elektrolisis, aluminium water (Rashid *et al.*, 2015), gasifikasi termokimia (Sutardi dan Hamid, 2020), *steam reforming* (Kaur and Pal, 2019).

Elektrolisis air suatu metode yang dapat mengkonversi suatu energi listrik menjadi kimia dengan memecah molekul air menjadi hidrogen dan oksigen (Fahlunnazar, 2020). Hidrogen yang dihasilkan dari proses elektrolisis air memiliki kemurnian yang tinggi (Bessarabov *et al.*, 2018). Terdapat beberapa macam metode elektrolisis antara lain elektrolisis oksida zat padat, elektrolisis larutan alkali dan elektrolisis air menggunakan membran elektrolit atau PEM (Proton Exchange Membrane) (Bessarabov *et al.*, 2019). Elektrolisis air menggunakan PEM memiliki kinerja yang baik untuk dikembangkan dalam produksi hidrogen skala besar (Madsen *et al.*, 2020; Rashid *et al.*, 2015). Elektrolisis air menggunakan PEM dengan membran elektrolit dan elektroda yang terdiri dari katoda dan anoda (Bessarabov *et al.*, 2018). Komponen penyusun *stack* PEM terdiri dari gasket, pengumpul arus, plat bipolar, lapisan luar dan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang tersusun oleh membran, elektroda anoda, elektroda katoda (Rashid *et*

al., 2015). Laju produksi hidrogen dapat ditingkatkan dengan penambahan lapisan katalis pada elektroda (Ahmadi *et al.*, 2013; Rohendi dan Adnan, 2010.)

Salah satu katalis yang dapat digunakan dalam elektrolisis air berupa logam Cu karena memiliki reaktivitas yang relatif tinggi dan stabil (Liu *et al.*, 2018). Katalis berbasis CuO memiliki tingkat oksidasi yang bervariasi sehingga dapat memfasilitasi reaksi redoks secara efisien (Singh *et al.*, 2018). Cu₂O berupa katalis yang bersifat semikonduktor yang baik dan memiliki celah pita sebesar ±2,0 eV (Islam *et al.*, 2009; Simamora *et al.*, 2014). Katalis Cu relatif murah (Bagus dkk., 2013; Tarifa *et al.*, 2022) dan memiliki daya hantar proton yang baik ketika dipadukan dengan karbon (Feng *et al.*, 2017). Pada penelitian sebelumnya penggunaan MEA (*Membran Electrode Assembly*) berbasis katalis Pt/C dan Cu₂O/C menunjukkan hasil yang baik dengan laju alir sebesar 6,881 mL/s (Savitri, 2020) sedangkan MEA berbasis katalis Cu₂O/C memiliki laju alir optimum sebesar 3,75 mL/s menggunakan luas permukaan elektroda sebesar 49 cm² (Dewi, 2021).

Faktor yang dapat mempengaruhi laju produksi hidrogen pada elektrolisis air menggunakan PEM antara lain jenis katalis yang digunakan, komposisi katalis aktif , arus, suhu, dan jumlah sel. Banyaknya jumlah komponen aktif yang terdapat dalam suatu elektroda dapat mempengaruhi laju produksi hidrogen, hal ini dapat dilihat menggunakan nilai ECSA. Laju produksi hidrogen berbanding lurus dengan arus dan suhu maka apabila semakin besar arus dan suhu yang digunakan laju reaksi akan semakin cepat terjadi (Budiyanto dkk., 2016; Buelvas *et al.*, 2014).

Elektroda yang digunakan dikarakterisasi menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS). Pengukuran CV bertujuan untuk mengetahui luas permukaan aktif yang terdapat pada elektroda (Ali *et al.*, 2013) melalui nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA) (Nuriana *et al.*, 2017). Kemudian dilakukan pengukuran menggunakan EIS yang bertujuan untuk mengukur konduktivitas elektroda (Gunawan dkk., 2015). Pengukuran EIS dapat mengamati interaksi antar elektron ataupun ion yang berpindah-pindah pada komponen sel saat terjadi reaksi elektrokimia (Lestariningsih dkk., 2017).

1.2. Rumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan proses elektrolisis air menggunakan katalis Cu₂O/C untuk meningkatkan laju produksi hidrogen dengan kerapatan arus yang rendah dan biaya yang murah. Penelitian ini dilakukan variasi komposisi katalis, kondisi air, arus dan jenis *stack* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap laju produksi hidrogen.

1.3. Tujuan Penelitian

1. Pembuatan katalis dan karakterisasi tiap elektroda dengan komposisi katalis Cu₂O/C yang bervariasi menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS).
2. Mempelajari pengaruh variasi perbandingan komposisi katalis, kondisi air dan arus terhadap laju produksi hidrogen menggunakan metode elektrolisis air.
3. Mengetahui pengaruh jenis *stack* terhadap laju produksi hidrogen.

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi terhadap perkembangan teknologi produksi hidrogen menggunakan metode elektrolisis air menggunakan PEM dengan katalis Cu₂O/C.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdalla, A. M., Hossain, S., Nisfindy, O. B., Azad, A. T., Dawood, M., & Azad, A. K. (2018). Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. In *Energy Conversion and Management*, 1(1)
- Abe, J. O., Popoola, A. P. I., Ajenifuja, E., & Popoola, O. M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. In *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20).
- Ajiriyanto, M. K., Kriswarini, R., Yanlinastuti, Y., & Lestari, D. E. (2018). Analisis Korosi Pipa Pendingin Sekunder RSG - GAS dengan Teknik Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). *Jurnal Urania*, 24(2), 105–114.
- Alam, H.M.B., Das, R., Shajahan, M.D., Ullah, A.K.M.A and Kibria, A.K.M.F. (2018). Surface Characteristics and Electrolysis Efficiency Of A Palladium-Nickel Electrode. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 43; 1998-2008.
- Ali, S., Ahmed, R., & Shahid Ansari, M. (2013). Evaluation of Stability and Catalytic Activity Of direct Methanol Fuel Cell nano-catalysts by Cyclic Voltammetry. In *Journal of Engineering Sciences*, 6(1).
- Azuan,M., Zaihar, N., Melinda, A and Umar, M.W. (2019). Effect Of Temperature On Performance Of Advance Alkaline Electrolyzer. *Sci. Int*, 31(5);757-762.
- Bagus Irawan, R. (2013). *Karakterisasi Katalis Tembaga Pada Catalytic Converter Untuk Mengurangi Emisi Gas Carbon Monoksida Motor Bensin*, 1(1).
- Basile, W., Sachenkova, O., Light, S., & Elofsson, A. (2017). High GC content causes orphan proteins to be intrinsically disordered. *PLoS Computational Biology*, 13(3).
- Bellosta von Colbe, J., Ares, J. R., Barale, J., Baricco, M., Buckley, C., Capurso, G., Gallandat, N., Grant, D. M., Guzik, M. N., Jacob, I., Jensen, E. H., Jensen, T., Jepsen, J., Klassen, T., Lototskyy, M. v., Manickam, K., Montone, A., Puszkiel, J., Sartori, S., Dornheim, M. (2019). Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(15), 7780–7808.
- Buelvas, W.L., Avilia, K.C.P and Jimenez, A.P. (2014). Temperature As A Factor Determining on Water Electrolysis. *International Journal Of Engineering Trends and Technology*, 7(1); 5-9.
- Bessarabov, D., & Millet, P. (2018). Brief Historical Background of Water Electrolysis. *PEM Water Electrolysis*, 17(42).

- Budiyanto, E., Setiawan, D.A., Supriadi, H dan Riduan. Kms. (2016). Pengaruh Jarak Anoda Katoda Pada Proses Elektroplating Tembaga Terhadap Ketebalan Lapisan dan Efisiensi Katoda Baja Aisi 1020. *Jurnal Teknik Mesin Univ. Muhammadiyah Metro*, 5(1); 20-29.
- Bow, Y., Sari, A.P., Harliyani, A.D., Saputra, B dan Budiman, R. (2020). Produksi Gas Hidrogen Ditinjau Dari Pengaruh *Duplex Stainless Steel* Terhadap Variasi Konsentrasi Katalis dan Jenis Air yang Dilengkapi Arrestor. *Jurnal Kinetika*, 11(3); 46-52.
- 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.
- Chi, J., & Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, 39(3); 390–394.
- Chooto, P. (2019). Cyclic Voltammetry and Its Applications. In *Voltammetry*. IntechOpen.
- Dawood, F., Shafiullah, G. M., & Anda, M. (2020). A hover view over Australia's Hydrogen Industry in recent history: The necessity for a Hydrogen Industry Knowledge-Sharing Platform. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(58); 32916–32939.
- 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.
- Dewi, S. K. (2021). *Produksi Hidrogen dari Air Menggunakan Membrane*. Skripsi.
- Dux, D and Schallert, B. (2016). Study Of Degradation Products At Different MEA Based Capture Pilot Plants. *Energy Procedia*, 262-271
- Eftekhari, A., & Fang, B. (2017). Electrochemical hydrogen storage: Opportunities for fuel storage, batteries, fuel cells, and supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40); 25143–25165).
- Erlinawati, Zikri, A dan Mudzakkir, A. (2014). Pengaruh Suplai Arus Listrik dan Jumlah Sel Elektroda Terhadap Produksi Gas Hidrogen dengan Elektrolit Asam Sulfat. *Kinetika*, 5(1); 14-19
- Fatmawati. (2022). *Elektrolisis Air Menggunakan Membrane Electrode Assembly (MEA) Dengan Katalis Cu₂O/C Pada Arus Dan Pemuatan Katalis Bervariasi*. Skripsi.

- Feng, Q., Yuan, X. Z., Liu, G., Wei, B., Zhang, Z., Li, H.(2017). A review of proton exchange membrane water electrolysis on degradation mechanisms and mitigation strategies. *Journal of Power Sources*, 366; 33–55).
- Grahl-Madsen, L., Siracusano, S., Tonella, S., Oldani, C., Greenhalgh, D. A., Backhouse, R., Green, B., & Aricò, A. S. (2020). Hydrogen production via PEM electrolysis. In *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*; 241–277.
- Gunawan, I., dan Sudaryanto Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju -BATAN Kawasan Puspiptek, W., & Selatan, T. (2015). *Studi Electrochemical Impedance Spectroscopy dari Lembaran Polyvinyl Alcohol dengan Penambahan LiClO₄ Sebagai Bahan Elektrolit Baterai Li-Ion*.
- Han, B., Steen, S. M., Mo, J. and Zhang, F. Y. 2015. Electrochemical Performance Modeling of a Proton Exchange Membrane Electrolyzer Cell for Hydrogen Energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(22): 7006–7016.
- House, J. E., & House, K. A. (2016). Hydrogen. In *Descriptive Inorganic Chemistry*; 111–121.
- Islam, M. M., Diawara, B., Maurice, V., & Marcus, P. (2009). Bulk and surface properties of Cu₂O: A first-principles investigation. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 903(1–3); 41–48.
- Irtas, D., Bow, Y., & Rusdianasari. (2021). The Effect of Electric Current on the Production of Brown's Gas using Hydrogen Fuel Generator with Seawater Electrolytes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 709(1).
- Kaur, M., & Pal, K. (2019). Review on hydrogen storage materials and methods from an electrochemical viewpoint. *Journal of Energy Storage*, 23;234–249.
- Kayfeci, M., Keçebaş, A., & Bayat, M. (2019). Hydrogen production. In *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*; 45–83.
- Kim, J.H., Oh, C.Y., Kim, K.R, Pil,J and Kim, T.J. (2021).Electrical Double Layer Mechanism Analysis Of PEM Water Electrolysis For Frequency Limitation Of Pulsed Currents. *Energies*, 14;1-17
- Kolata, J., Martin, A., Teknik Mesin, J., & Teknik Universitas Riau, F. (2014). Adsorpsi Isotermal Hidrogen Pada Karbon Aktif Granular Berbahan Dasar Batubara Untuk Aplikasi Penyimpanan Bahan Bakar Pada Teknologi Fuel Cell. In *Jom FTTEKNIK*, 1(2).
- Kumar, S. S., Ramakrishna, S. U. B., Devi, B. R., & Himabindu, V. (2019). Phosphorus-doped graphene supported palladium (Pd / PG) electrocatalyst for the hydrogen evolution reaction in PEM water electrolysis. *International Journal of Green Energy*, 1(1); 1–10.

- Kumar, D., & Muthukumar, K. (2020). An overview on activation of aluminium-water reaction for enhanced hydrogen production. *Journal of Alloys and Compounds*.
- Kwasi-Effah C, I, O. A., & A, A. F. (2015). A Review on Electrolytic Method of Hydrogen Production from Water. In *American Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1(2).
- Latiff, M. N., Fu, X., Mohamed, K.D., Veksha, M.H and Lisak, G. (2020). Carbon Based Copper(II) Phthalocyanine Catalysts For Electrochemical CO₂ Reduction: Effect Of Carbon Support On Electrocatalytic Activity, *J.Carbon* 168;245-253.
- Lazaro, M. J. , Calvillo, L. , Celorio, V. , Pardo, J. I. , Perathoner, S., & Moline. (2011). *tudy and Application of Carbon Black Vulcan XC-72R in Polymeric Electrolyte Fuel Cells*, 1(1).
- Lee, D. H., & Kim, T. (2013). Plasma-catalyst hybrid methanol-steam reforming for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(14); 6039–6043.
- Lestariningsih, T., Sabrina, Q dan Majid, N. (2017). Penambahan TiO₂ dalam Pembuatan Lembaran Polimer Elektrolit Berpengaruh Terhadap Konduktivitas Dan Kinerja Baterai Lithium. *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, 7(1); 31-37.
- Liu, S., Lei, Y. J., Xin, Z. J., Lu, Y. bin, & Wang, H. Y. (2018). Water splitting based on homogeneous copper molecular catalysts. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 355; 141–151.
- Liu, C. Y., & Sung, C. C. 2012. A Review of the Performance and Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Membrane Electrode Assemblies. *Journal of Power Sources*, 220(1), 348–353
- Majlan, E. H., Rohendi, D., Daud, W. R. W., Husaini, T., & Haque, M. A. (2018). Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89; 117–134.
- Malasari, N. N., Onggo, H., & Rokhmat, M. 2014. *Integrasi Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cell dan Analisis Pengaruh Jumlah Sel terhadap Performansi berdasarkan Data Kurva Karakteristik*
- Ma'ruf, H., & Widiharsa, F. (2016). *Fuel Cell Sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif Pengisi Baterai Dengan Pengendali Panas*.
- Maulana, M. I., Syahbanu, I., & Harlia. (2017). Sintesis Dan Karakterisasi Material Konduktif Film Komposit Polipirol (Ppy)/ Selulosa Bakteri. *JKK*, 6(3), 11–18.

- Millet, P., & Grigoriev, S. A. (2014). Electrochemical characterization and optimization of a PEM water electrolysis stack for hydrogen generation. *Chemical Engineering Transactions*, 41(1); 7–12.
- Millet, P., Mbemba, N., Grigoriev, S. A., Fateev, V. N., Aukauloo, A., & Etiévant, C. (2011). Electrochemical performances of PEM water electrolysis cells and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(6); 4134–4142.
- Nicoletti, G., Arcuri, N., Nicoletti, G., & Bruno, R. (2015). A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. *Energy Conversion and Management*, 89; 205–213.
- Nizovskii, A. I., Belkova, S. v., Novikov, A. A., & Trenikhin, M. v. (2015). Hydrogen production for fuel cells in reaction of activated aluminum with water. *Procedia Engineering*, 113; 8–12.
- Pangestica Saputry, A., Lestariningsihb, T., Astutia, Y dan Soedarto, J. (2019). Pengaruh Rasio LiB0B:Ti02 dari Lembaran Polimer Elektrolit sebagai Pemisah terhadap Kinerja Elektrokimia Baterai Lithium-Ion Berbasis LTO Title. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 22(4); 136–142.
- Popat, Y. (2021). Ohm's Law: Misconceptions Of The Students At Secondary and Senior Secondary Level. *International Journal Of Engineering Applied Sciences and Technology*, 5(12); 88-91
- Quarton, C. J., Tlili, O., Welder, L., Mansilla, C., Blanco, H., Heinrichs, H., Leaver, J., Samsatli, N. J., Lucchese, P., Robinius, M., & Samsatli, S. (2019). The curious case of the conflicting roles of hydrogen in global energy scenarios. *Sustainable Energy and Fuels*, 4(1); 80–95.
- Rashid, M., al Mesfer, M. K., 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 (IJEAT)*.
- Rimbawati, R., Cholish, C., Tanjung, W. A. L., & Effendy, M. A. R. (2021). Pengujian Air Bersih Menjadi Hidrogen Untuk Energi Alternatif Menggunakan Arduino. *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 5(1), 65.
- Rohendi, D., & Adnan, Y. (2010). Pembuatan Elektroda Fuel Cell dengan Metode Elektrodepositi Menggunakan Katalis Pt-Cr/C dan Pt/C dan Karakterisasinya. In *Jurnal Penelitian Sains*, 13.
- 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.
- Safitri, I. A., Rudiyanto, B., Nursalim, A., Hariono, D. B., Teknik, J., Jember, N., Pertanian, J. T., Mastrip, J., & Box, P. O. (2016). Uji Kinerja Smart Grid Fuel Cell Tipe Proton Exchange Membrane (PEM) Dengan Penambahan Hidrogen. *Jurnal Ilmiah INOVASI*, 1(1).
- 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.
- Saputry, A. P., Lestariningsihb, T., & Astuti, Y. (2019). Pengaruh Rasio LiB0B:Ti02 dari Lembaran Polimer Elektrolit sebagai Pemisah terhadap Kinerja Elektrokimia Baterai Lithium-Ion Berbasis LTO. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 22(4), 136–142.
- Savitri, W. D. (2020). *Produksi Hidrogen Melalui Elektrolisis Air Dengan*. Skripsi
- Simamora, P., Sinta, D., & Siagian, M. (2014). Preparasi Dan Karakterisasi Sifat Optik Nanopartikel Cu₂O Dengan Metode Kopresipitasi. *Jurnal Einstein*, 2(1).
- Singh, M., Jampaiah, D., Kandjani, A. E., Sabri, Y. M., della Gaspera, E., Reineck, P., Judd, M., Langley, J., Cox, N., van Embden, J., Mayes, E. L. H., Gibson, B. C., Bhargava, S. K., Ramanathan, R., & Bansal, V. (2018). Oxygen-deficient photostable Cu₂O for enhanced visible light photocatalytic activity. *Nanoscale*, 10(13); 6039–6050.
- Sitohang, L., Hakim L, & Hasfita, F. (2017). sitohang. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 6(1); 55–67.
- Sukisna, & Toifur, M. (2018). Penentuan Konduktivitas Air Baku Proses Desilinasi di Baron Teknoparrk dengan Metode Regresi Linier. *Jurnal Materi Dan Pembelajaran Fisika*, 9(2), 127–131.
- Sodiqovna, O.M and Qizi, I.G.O. (2016). The Rate Of A Chemical Reaction And Factors Affecting It. *EPRA International Journal Of Research Development (IJRD)*, 1;261-263
- Supergeon, J.M and Lewis, N.S (2011). Proton Exchange Membrane Electrolysis Sustained By Water Vapor. *Energy Environ.Sci*, 4; 2993-2998
- Sutardi dan Abdul Hamid Budiman Balai Besar Teknologi Konversi Energi, T. B., Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi Gedung, T., Energi, K., Puspiptek Serpong, K., & Selatan, T. *Potensi Pemanfaatan Co Dan Hidrogen*

2 Sebagai Bahan Bakar Alternatif Di Indonesia Utilization as An Alternative Fuel in Indonesia.

- Tang, H., Wang, J., Yin, H., Zhao, H., Wang, D., & Tang, Z. (2014). Growth of Polypyrrole Ultrathin Films on MoS₂ Monolayers as High-Performance Supercapacitor Electrodes. *Advanced Material*, 1(1); 1–7.
- Tarifa, P., González-Castaño, M., Cazaña, F., Monzón, A., & Arellano-García, H. (2022). Development of one-pot Cu/cellulose derived carbon catalysts for RWGS reaction. *Fuel*,
- Tijani, A. S., Barr, D., & Rahim, A. H. A. (2015). Computational Modelling of the Flow Field of An Electrolyzer System using CFD. *Energy Procedia*, 79; 195–203.
- 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.
- Untari, Harsini, M. and Fahmi, M. Z. 2019. Pengaruh Komposisi Elektroda Pasta Karbon Nanopori/Ferosen Sebagai Sensor Voltammetri Hidrokuinon. *Jurnal Elektronik*. 9(1): 18–22.
- Xu, Z., Yan, Y., Wei, W., Sun, D., & Ni, Z. (2020). Supply system of cryo-compressed hydrogen for fuel cell stacks on heavy duty trucks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(23); 12921–12931.
- Yang, X., Guo, R. Cai, R., Ouyang, Y., Yang, P and Xiao,J. (2022). Engineering High-Entropy Materials For Electrocatalytic Water Splitting. *International Journal Of Hydrogen Energy* 47; 3561-13578.
- Yanxing, Z., Maoqiong, G., Yuan, Z., Xueqiang, D., & Jun, S. (2019). Thermodynamics analysis of hydrogen storage based on compressed gaseous hydrogen, liquid hydrogen and cryo-compressed hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(31); 16833–16840.