

**PRODUKSI HIDROGEN MELALUI ELEKTROLISIS AIR DENGAN  
MENGUNAKAN *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) PADA  
ARUS, TEMPERATUR DAN KATALIS BERVARIASI**

**SKRIPSI**

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



**WIDYA DWI SAVITRI**

**08031381621054**

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

**2020**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**PRODUKSI HIDROGEN MELALUI ELEKTROLISIS AIR DENGAN  
MENGUNAKAN *MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY* (MEA) PADA  
ARUS, TEMPERATUR DAN KATALIS BERVARIASI**

**SKRIPSI**

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

Oleh :

**WIDYA DWI SAVITRI**

**08031381621054**

Indralaya, 24 Juni 2020

**Pembimbing I**



**Dr. Dedi Rohendi, M.T.**  
**NIP. 196704191993031001**

**Pembimbing II**



**Dr. Addy Rachmat, M.Si.**  
**NIP. 197409282000121001**

**Mengetahui,**

**Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**Prof. Dr. Iskhaq Iskandar, M.Sc**

**NIP. 197210041997021001**

## HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi ini dengan judul “Produksi Hidrogen melalui Elektrolisis Air dengan menggunakan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) pada Arus, Temperatur dan Katalis Bervariasi” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada Tanggal 16 Juni 2020 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang diberikan.

Indralaya, 24 Juni 2020

**Ketua :**

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

NIP. 196704191993031001

**Anggota :**

**2. Dr. Addy Rachmat, M.Si.**

NIP. 197409282000121001

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

NIP. 197407212001121001

**4. Dr. Miksusanti, M.Si.**

NIP. 196807231992032003

**5. Dra. Fatma, M.S.**

NIP. 196207131991022001

(  )

(  )

(  )

(  )


(  )

**Mengetahui,**

**Dekan FMIPA**

  
**Prof. Dr. Iskhaq Iskandar, M.Sc**  
NIP. 197210041997021001

**Ketua Jurusan Kimia**

  
**Dr. Hasanudin, M.Si.**  
NIP. 197205151997021003

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama mahasiswa : Widya Dwi Savitri  
NIM : 08031381621054  
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.

Indralaya, 24 Juni 2020

Penulis:



Widya Dwi Savitri

NIM. 08031381621054

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

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

Nama Mahasiswa : Widya Dwi Savitri  
NIM : 08031381621054  
Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia  
JenisKarya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “Produksi Hidrogen melalui Elektrolisis Air dengan menggunakan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) pada Arus, Temperatur dan Katalis Bervariasi”. 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, 24 Juni 2020

Yang menyatakan,



Widya Dwi Savitri

NIM. 08031381621054

## ABSTRAK

### PRODUKSI HIDROGEN SECARA ELEKTROLISIS AIR DENGAN MENGGUNAKAN MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA) PADA ARUS, TEMPERATUR DAN KATALIS BERVARIASI

Widya Dwi Savitri: Dibimbing oleh Dr. Dedi Rohendi, M.T dan Dr. Addy Rachmat, M.Si  
Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya  
xi + 66 halaman, 5 tabel, 12 gambar, 9 lampiran

Produksi hidrogen melalui elektrolisis air umumnya menggunakan katalis logam mulia yang dapat menyebabkan daya tahan elektroda menurun, karena beroperasi pada kepadatan arus yang tinggi. Pada penelitian ini digunakan katalis logam oksida  $\text{TiO}_2/\text{C}$  dan  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$  pada sisi katoda dan katalis  $\text{Pt}/\text{C}$  di anoda. Katalis yang telah dibuat dikarakterisasi menggunakan metode *X-Ray Diffraction* (XRD). Hasil analisa XRD menunjukkan  $\text{Cu}_2\text{O}$  muncul pada sudut  $2\theta = 36,27^\circ$ ,  $61,36^\circ$  dan  $73,5^\circ$ .  $\text{TiO}_2$  menunjukkan puncak pada sudut  $2\theta = 47,96^\circ$ . Karbon terdeteksi pada sudut  $2\theta = 25^\circ$ . Katalis didistribusikan pada permukaan *Gas Diffusion Layer* (GDL) sehingga dihasilkan elektroda. Karakterisasi elektroda menunjukkan nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA) terbesar ditunjukkan oleh elektroda dengan katalis  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$  sebesar  $21,143 \text{ cm}^2/\text{g}$ , sedangkan nilai konduktivitas elektrik terbesar terdapat pada elektroda dengan katalis  $\text{Pt}/\text{C}$  sebesar  $0,0041 \text{ S}/\text{cm}$ . Hasil pengukuran *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) menunjukkan elektroda  $\text{Pt}/\text{C}$  memiliki hambatan real terkecil sebesar  $3,46 \Omega$ , menandakan bahwa elektroda ini memiliki kemampuan konduktivitas ionik yang besar. Laju produksi hidrogen terbaik dihasilkan pada MEA dengan elektroda  $\text{Pt}/\text{C}$  dan  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$  yang beroperasi optimum pada arus 2 A sebesar  $6,881 \text{ mL}/\text{s}$ , sedangkan MEA dengan elektroda  $\text{Pt}/\text{C}$  dan  $\text{TiO}_2/\text{C}$  hanya bekerja optimum pada arus 1 A dengan laju produksi hidrogen sebesar  $2,809 \text{ mL}/\text{s}$ . Laju produksi hidrogen pada kedua MEA meningkat dengan naiknya temperatur operasi dan mencapai nilai tertinggi pada  $70^\circ\text{C}$  yang merupakan temperatur tertinggi pada penelitian ini. Menaikkan temperatur operasi dapat mengurangi konsumsi energi listrik pada produksi hidrogen, sehingga dapat menjadi solusi untuk efisiensi biaya operasi.

**Kata Kunci** : PEM elektrolisis air, MEA,  $\text{TiO}_2/\text{C}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ ,  $\text{Pt}/\text{C}$

Sitasi : 80 (2000-2020)

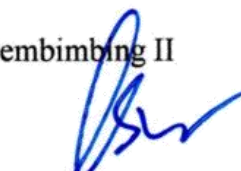
Indralaya, Juni 2020

Pembimbing I



Dr. Dedi Rohendi, M.T.  
NIP. 196704191993031001

Pembimbing II



Dr. Addy Rachmat, M.Si.  
NIP. 197409282000121001

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Kimia



Dr. Hasanudin, M.Si.  
NIP. 197205151997021003

## ABSTRACT

### HYDROGEN PRODUCTION BY WATER ELECTROLYSIS USING MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA) AT VARIOUS CURRENT, TEMPERATURES AND CATALYSTS

Widya Dwi Savitri : Supervised by Dr. Dedi Rohendi, M.T. dan Dr. Addy Rachmat, M.Si.  
Departement of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Science, Sriwijaya University

xi + 66 pages, 5 tables, 12 pictures, 9 attachments

Hydrogen production by water electrolysis generally uses precious metal catalysts which can lead decrease of electrode resistance, because operates at high current densities. In this study,  $\text{TiO}_2/\text{C}$  and  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$  metal oxide catalysts were used on the cathode side and Pt/C catalyst on the anode. The catalyst made was characterized using X-Ray Diffraction (XRD) method. The XRD analysis results showed  $\text{Cu}_2\text{O}$  pattern appear at  $2\theta = 36.27^\circ$ ,  $61.36^\circ$  and  $73.5^\circ$ .  $\text{TiO}_2$  showed peak at  $2\theta = 47.96^\circ$ . Carbon was detected at  $2\theta = 25^\circ$ . The catalyst was distributed on the surface of the Gas Diffusion Layer (GDL) to produce an electrode. Electrode characterization showed the greatest Electrochemical Surface Area (ECSA) value was shown by electrodes with a  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$  catalyst of  $21.143 \text{ cm}^2/\text{g}$ , while the largest electrical conductivity values were found on electrodes with Pt/C catalysts of  $0.0041 \text{ S/cm}$ . Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) measurements show Pt/C electrodes have the smallest real resistance of  $3.46 \Omega$ , indicating that these electrodes have a large ionic conductivity capability. The highest hydrogen production rate produced by MEA with Pt/C and  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$  electrodes that operate optimally at 2 A by  $6.881 \text{ mL/s}$ , while MEA with Pt/C and  $\text{TiO}_2/\text{C}$  electrodes only works optimally at 1 A with a production rate hydrogen at  $2.809 \text{ mL/s}$ . The rate of hydrogen production in the two MEAs increased with increasing operating temperatures and reached the highest value at  $70^\circ\text{C}$  which is the highest temperature in this study. Increasing the operating temperature can reduce the consumption of electrical energy in hydrogen production, so that it can be a solution for operating cost efficiency.

**Keywords** : PEM water electrolysis, MEA,  $\text{TiO}_2/\text{C}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ , Pt/C

Citation : 80 (2000-2020)

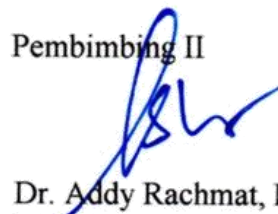
Indralaya, Juni 2020

Pembimbing I



Dr. Dedi Rohendi, M.T.  
NIP. 196704191993031001

Pembimbing II



Dr. Addy Rachmat, M.Si.  
NIP. 197409282000121001

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Kimia



Dr. Hasanudin, M.Si.  
NIP. 197205151997021003

## HALAMAN PERSEMBAHAN

### Man Jadda Wajada

*“Barang siapa yang bersungguh-sungguh maka akan berhasil”*

”Dan boleh jadi kamu membenci sesuatu tetapi ia baik bagimu, dan boleh jadi kamu menyukai sesuatu tetapi ia buruk bagimu. Dan Allah mengetahui dan kamu tidak mengetahui”

(al-Baqarah: 216)

*Everytime God doesn't give you something, He's telling you : “you deserve better” –refl3ctionism*

Skripsi ini sebagai tanda rasa syukurku sebesar-besarnya kepada Allah SWT dan Nabi Muhammad SAW. Dan juga skripsi ini ku persembahkan untuk:

- Mama, papa, abang dan aan yang senantiasa mendo'akan, mensupport di setiap perjuanganku
- Sahabat dan teman-teman seperjuangan atas semangat dan bantuannya
- Almamaterku universitas sriwijaya



## KATA PENGANTAR

*Assalammu 'alaikum warahmatullah wabarakatuh*

Segala puja dan puji hanyalah milik Allah SWT, tuhan yang menciptakan dan memelihara seluruh alam semesta. Hanya kepada-Nya kita berserah dan memohon pertolongan, sehingga akhirnya penulis dapat mengucapkan rasa syukur alhamdulillah karena dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul: “Produksi Hidrogen melalui Elektrolisis Air dengan menggunakan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) pada Arus, Temperatur dan Katalis 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, pengumpulan data sampai pengolahan data maupun dalam tahap penulisan. Namun, dengan kesabaran dan ketekunan yang dilandasi dengan rasa tanggung jawab dan bantuan dari berbagai pihak, akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan.

Penulis Mengucapkan terima kasih kepada Bapak **Dr. Dedi Rohendi, M.T.** dan Bapak **Dr. Addy Rachmat, M.Si.** yang telah banyak memberikan bimbingan, motivasi, saran dan petunjuk kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Iskhaq Iskandar, M.Sc. selaku Dekan FMIPA, Universitas Sriwijaya.
2. Bapak Dr. Hasanudin, 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. selaku Dosen Pembimbing Akademik.
5. Ibu Dr. Miksusanti, M.Si., ibu Dra. Fatma, M.S., dan bapak Dr. Muhammad Said, M.T. selaku penguji sidang sarjana.
6. Ibu Ferliana Hayati, M.Si. selaku Koordinator Seminar yang membantu dalam segala hal dalam pengurusan jadwal seminar.

7. Seluruh Dosen FMIPA Kimia yang telah mendidik dan membimbing selama masa kuliah.
8. Papa dan Mamaku tersayang yang selalu mendo'akan, menyayangi dan mensupport disetiap langkah dan pilihan hidup kakak.
9. Kedua saudaraku, abang **Fazri** dan adikku **Raehan**, terima kasih telah menjadi pelindung dan selalu ada disaat susah maupun senang.
10. Cuyku tersayang **Putri** dan **Ranti**, terima kasih telah menjadi tempat berkeluh kesah, tempat curhat, mengadu, dan selalu mensupport uwid. Semoga kita selalu akurat dan tak henti-hentinya memberi kasih sayang.
11. PURGEN 16 (**Athis, Juwi** dan **Rahmah**) terima kasih untuk bantuan, saran dan masukan kalian selama penelitian di PUR.
12. Kolega (**BunNormah, Bu'gur Intan, Chika, Ali, Fellan, Faisal** dan **Revo**), terima kasih telah menjadi tempat berbagi ilmu, belajar bareng, berbagi contekan, saling nempatin tempat duduk waktu ujian hehe, partner nongki dan partner travelling terbaik. Terima kasih telah mewarnai 4 tahunku selama perkuliahan.
13. Kakak PUR (**Kak Dwi, Kak Dea** dan **Kak Reka**), terima kasih telah menjadi kakak terbaik yang udah wid anggap seperti kakak kandung sendiri. Terima kasih sudah selalu sabar mengajari, membantu dan menjadi tempat bertanya dan mengadu uwid, semoga kakak sukses selalu kak.
14. **Kak Chanel** my tutorqu, terima kasih banyak atas ilmu, bantuan, masukan dan nasehat kakak selama ini. Semoga cita-cita kakak tercapai dan selalu dalam lindungan Allah, aamiin.
15. Kimia 2016, terima kasih atas kebersamaan kita selama 4 tahun ini dan segala cerita yang mewarnai dunia perkuliahanku. Semangat dan sukses untuk kalian semua.
16. Kimia 2016 Genap, terima kasih telah menjadi teman tersolid dan terkompak baik dalam berbagi tugas kuliah maupun calak bersama. Semoga kelak kita dapat bertemu di lain waktu dengan kesuksesan masing-masing, aamiin.
17. Staf dosen, admin dan analis kimis yang telah memberi ilmu bermanfaat dan membantu selama perkuliahan.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan pada penulisan skripsi, sehingga perlu kritik dan saran yang membangun demi kemajuan riset ini kedepannya. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan dapat terus dikembangkan.

Indralaya, 24 Juni 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

|  | <b>Halaman</b> |
|--|----------------|
| <b>HALAMAN JUDUL</b> .....   | i              |
| <b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....  | ii             |
| <b>HALAMAN PERSETUJUAN</b> .....   | iii            |
| <b>PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH</b> .....                                    | iv             |
| <b>HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH</b> .....                                | v              |
| <b>ABSTRAK</b> .....   | vi             |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | vii            |
| <b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....   | viii           |
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....  | ix             |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....  | xii            |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....   | xv             |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....  | xvi            |
| <b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....   | xvii           |
| <b>BAB I. PENDAHULUAN</b>  |                |
| 1.1. Latar Belakang.....   | 1              |
| 1.2. Rumusan Masalah .....   | 3              |
| 1.3. Tujuan Penelitian.....  | 3              |
| 1.4. Manfaat Penelitian.....   | 3              |
| <b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA</b>  |                |
| 2.1. Produksi Hidrogen .....   | 4              |
| 2.1.1. Elektrolisis Air.....   | 4              |
| 2.1.1.1. Elektrolisis Larutan Alkali .....                                       | 5              |
| 2.1.1.2. Elektrolisis Air dengan <i>Proton Exchange</i><br><i>Membrane</i> ..... | 6              |
| 2.1.1.3. Elektrolisis Air dengan Oksida Padat<br>sebagai Elektrolit.....         | 8              |
| 2.2. Komponen Penyusun PEM Elektrolisis Air .....                                | 9              |
| 2.2.1. Plat Bipolar .....  | 9              |

|  |    |
|--|----|
| 2.2.2. Pengumpul Arus .....                                      | 10 |
| 2.2.3. <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA).....             | 10 |
| 2.2.3.1. <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL) .....                  | 12 |
| 2.2.3.2. Lapisan Katalis.....                                    | 12 |
| 2.2.3.2.1. Platina (Pt) .....                                    | 13 |
| 2.2.3.2.2. Titanium Dioksida (TiO <sub>2</sub> ).....            | 13 |
| 2.2.3.2.3. Tembaga (I) Oksida (Cu <sub>2</sub> O).....           | 14 |
| 2.2.3.2.4. Karbon .....  | 14 |
| 2.2.3.3. Membran Elektrolit Padat .....                          | 15 |
| 2.3. Karakterisasi Katalis .....                                 | 15 |
| 2.3.1. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) .....                      | 15 |
| 2.3.2. <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV).....                       | 17 |
| 2.3.3. <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS) ..... | 17 |
| 2.3.4. Konduktivitas Elektrik.....                               | 18 |
| 2.4. Hidrogen.....   | 19 |

### **BAB III. METODOLOGI PENELITIAN**

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Waktu dan Tempat .....   | 20 |
| 3.2. Alat dan Bahan.....  | 20 |
| 3.3. Prosedur Penelitian.....   | 20 |
| 3.3.1. Pembuatan GDL.....   | 20 |
| 3.3.2. Preparasi Katalis.....   | 21 |
| 3.3.2.1. Preparasi Katalis TiO <sub>2</sub> /C.....                                     | 21 |
| 3.3.2.2. Preparasi Katalis Cu <sub>2</sub> O/C.....                                     | 21 |
| 3.3.3. Pembuatan Elektroda .....  | 21 |
| 3.3.3.1. Pembuatan Elektroda Pt/C .....   | 21 |
| 3.3.3.2. Pembuatan Elektroda TiO <sub>2</sub> /C.....                                   | 22 |
| 3.3.3.3. Pembuatan Elektroda Cu <sub>2</sub> O/C.....                                   | 22 |
| 3.3.4. Karakterisasi Elektroda Menggunakan XRD.....                                     | 22 |
| 3.3.5. Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda<br>Menggunakan Metode CV .....            | 22 |
| 3.3.6. Pengukuran Nilai Konduktivitas elektrik<br>Elektoda Menggunakan Metode EIS ..... | 23 |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3.7. Pembuatan MEA .....   | 23        |
| 3.3.8. Produksi Hidrogen Pada Arus dan Temperatur<br>Bervariasi .....                              | 23        |
| 3.4. Analisis Data .....   | 24        |
| 3.4.1. Analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....  | 24        |
| 3.4.2. Analisis Laju Produksi Hidrogen .....   | 24        |
| 3.4.3. Analisis Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda.....  | 25        |
| 3.4.5. Analisis Konduktivitas Elektrik Elektroda.....  | 25        |
| <b>BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN</b>  |           |
| 4.1. Karakterisasi Katalis TiO <sub>2</sub> /C dan Cu <sub>2</sub> O/C dengan Analisis<br>XRD..... | 27        |
| 4.2. Karakterisasi Elektroda dengan Metode CV .....  | 28        |
| 4.3. Karakterisasi Elektroda dengan Metode EIS .....   | 30        |
| 4.4. Pengukuran Laju Produksi Hidrogen .....   | 32        |
| 4.4.1. Variasi Arus.....   | 32        |
| 4.4.2. Variasi Temperatur.....   | 34        |
| <b>BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN</b>   |           |
| 5.1. Kesimpulan .....  | 36        |
| 5.2. Saran .....   | 36        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>  | <b>37</b> |
| <b>LAMPIRAN.....</b>   | <b>43</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|   | <b>Halaman</b> |
|---|----------------|
| Gambar 1. Skema Kerja Elektrolisis Air dengan Menggunakan Alkali .....  | 5              |
| Gambar 2. Skema Kerja Elektrolisis Air dengan Menggunakan PEM .....   | 7              |
| Gambar 3. Skema Kerja dari Elektrolisis Oksida Padat .....  | 8              |
| Gambar 4. Arah Aliran Masuk/ Keluar dari Bidang Aliran.....   | 9              |
| Gambar 5. Reaksi Elektrokimia pada MEA.....   | 11             |
| Gambar 6. Pola difraktogram XRD Katalis TiO <sub>2</sub> /C.....  | 16             |
| Gambar 7. Difraktogram Katalis Cu <sub>2</sub> O/C dan TiO <sub>2</sub> /C.....   | 27             |
| Gambar 8. Voltamogram (a) Elektroda TiO <sub>2</sub> /C (b) Elektroda Cu <sub>2</sub> O/C dan<br>(c) Elektroda Pt/C .....   | 29             |
| Gambar 9. Kurva <i>Nyquist</i> Pengukuran EIS Elektroda Pt/C, TiO <sub>2</sub> /C dan<br>Cu <sub>2</sub> O/C.....   | 31             |
| Gambar 10. Laju Produksi Hidrogen dengan Arus Bervariasi pada MEA<br>dengan Katoda yang Mengandung Katalis TiO <sub>2</sub> /C dan<br>Cu <sub>2</sub> O/C .....       | 33             |
| Gambar 11. Laju Produksi Hidrogen dengan Temperatur Bervariasi pada<br>MEA dengan Katoda yang Mengandung Katalis TiO <sub>2</sub> /C<br>dan Cu <sub>2</sub> O/C ..... | 34             |
| Gambar 12. Konsumsi Daya dengan Temperatur Bervariasi pada MEA<br>dengan Katoda yang Mengandung Katalis TiO <sub>2</sub> /C dan<br>Cu <sub>2</sub> O/C .....          | 35             |

## DAFTAR TABEL

|  | <b>Halaman</b> |
|--|----------------|
| Tabel 1. Spesifikasi PEM Elektrolisis Air .....                                      | 7              |
| Tabel 2. Parameter Umum Desain Plat Bipolar .....                                    | 9              |
| Tabel 3. Data Hasil <i>Fitting</i> Kurva <i>Nyquist</i> .....                        | 25             |
| Tabel 4. Hasil Perhitungan ECSA pada Berbagai Elektroda .....                        | 30             |
| Tabel 5. Data Hasil <i>Fitting</i> Kurva <i>Nyquist</i> dan Hasil Konduktivitas..... | 32             |



## DAFTAR LAMPIRAN

|   | <b>Halaman</b> |
|---|----------------|
| Lampiran 1. Skema Kerja PEM Elektrolisis Air.....                                 | 45             |
| Lampiran 2. Perhitungan Kandungan Komponen Katalis .....                          | 47             |
| Lampiran 3. Spektrum XRD Katalis TiO <sub>2</sub> /C dan Cu <sub>2</sub> O/C..... | 49             |
| Lampiran 4. Data Peak Voltammogram.....   | 51             |
| Lampiran 5. Tabel dan Hasil Perhitungan Nilai ECSA Elektroda.....                 | 52             |
| Lampiran 6. Data Hasil Fitting Kurva <i>Nyquist</i> dan Konduktivitas.....        | 56             |
| Lampiran 7. Tabel dan Hasil Perhitungan Laju Produksi Hidrogen .....              | 58             |
| Lampiran 8. Tabel dan Hasil Perhitungan Daya .....                                | 64             |
| Lampiran 9. Gambar Alat dan Bahan Penelitian .....                                | 66             |

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Krisis energi yang dialami saat ini telah menjadi isu dunia termasuk juga di Indonesia. Masyarakat Indonesia saat ini masih menggunakan energi fosil seperti minyak bumi, gas bumi dan batu bara sebagai sumber energi utama (Wahyono dkk, 2017). Penerapan teknologi energi terbarukan perlu dilakukan untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil (Dewi dkk, 2012). Hidrogen menjadi salah satu pembawa energi (*energy carrier*) yang menjanjikan karena dapat digunakan sebagai bahan bakar tanpa emisi (Ito *et al.*, 2011).

Hidrogen tidak terdapat dalam keadaan bebas di alam dan harus diproduksi dengan mereformasi gas alam atau bahan bakar fosil lainnya, namun reformasi ini menghasilkan hidrogen dengan kemurnian yang rendah. Hidrogen berkualitas tinggi dapat diproduksi dengan mengkonversi air menjadi hidrogen dan oksigen melalui proses yang dikenal dengan elektrolisis air (Carmo *et al.*, 2013). Gas hidrogen dapat dihasilkan dari molekul air dengan cara memasukkan arus listrik dengan besaran yang sesuai (Afief dan Isana, 2017), yang berasal dari reaksi reduksi air pada katoda (Setiawan dan Salam, 2018).

Metode PEM elektrolisis air masih dianggap sebagai teknologi yang menarik untuk produksi hidrogen (Millet *et al.*, 2010). Keuntungan dari metode ini adalah membran elektrolit dapat dibuat sangat tipis sehingga konduktivitas yang didapat tinggi tanpa resiko terjadi gas *crossover*, sedangkan kekurangannya ialah membran elektrolitnya bersifat korosif serta komponen lain yang dibutuhkan mahal (Kwasi *et al.*, 2015). Komponen PEM elektrolisis air terdiri dari membran elektrolit padat, anoda dan katoda dengan elektrokatalis, plat bipolar dan pengumpul arus (Rashid *et al.*, 2015). Membran elektrolit padat yang digunakan umumnya berupa nafion yang diapit oleh lapisan elektroda berupa anoda dan katoda sehingga menghasilkan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) (Kwasi *et al.*, 2015).

Pada elektroda terdapat lapisan katalis yang berfungsi sebagai permukaan aktif untuk mempercepat kinerja sel (Kamarudin dan Hashim, 2012). Katalis yang umum digunakan berupa platina, karena platina merupakan logam yang paling efektif

digunakan sebagai elektrokatalisator dalam proses oksidasi dan reduksi. Umumnya Pt/C digunakan sebagai katalis pada sisi katoda, serta IrO<sub>2</sub> dan RuO<sub>2</sub> pada sisi anoda (Rashid *et al.*, 2015).

IrO<sub>2</sub> dan RuO<sub>2</sub> merupakan katalis yang konvensional, memiliki konduktivitas elektrik yang baik, aktivitas yang tinggi namun mudah terkorosi, memiliki tegangan yang rendah dan tidak stabil. Penggunaan katalis logam mulia memungkinkan elektrolisis beroperasi pada kepadatan arus yang tinggi (Siracusano *et al.*, 2017). Operasi dengan kepadatan arus yang tinggi dapat meningkatkan potensial sel dan suhu, sehingga menyebabkan daya tahan elektroda menurun.

Untuk meningkatkan efisiensi biaya, daya tahan elektroda serta daya hantar proton yang baik digunakan katalis logam oksida TiO<sub>2</sub> dan Cu<sub>2</sub>O yang dipadukan dengan karbon (Feng *et al.*, 2017). Karbon umumnya digunakan sebagai pendukung katalis karena luas permukaannya yang besar, stabil dalam media asam dan basa, memiliki konduktivitas elektrik yang baik dan ketahanan korosi yang tinggi (Lázaro *et al.*, 2011). TiO<sub>2</sub> menjadi bahan yang stabil, murah dan tersedia secara komersial, namun TiO<sub>2</sub> bersifat non konduktif sehingga penggunaannya hanya sebagai pendukung katalis saja (Bernt *et al.*, 2020). Cu<sub>2</sub>O bersifat semikonduktor yang stabil dan menjadi salah satu katalis berbasis tembaga yang digunakan secara komersial dalam reaksi kimia. Cu<sub>2</sub>O merupakan fotokatalis yang efektif menguraikan air menjadi gas hidrogen dan oksigen di bawah cahaya tampak (Islam *et al.*, 2009).

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan MEA menggunakan katalis Pt/C, TiO<sub>2</sub>/C dan Cu<sub>2</sub>O/C yang selanjutnya laju produksi hidrogen dapat diukur pada arus dan temperatur bervariasi. Kinerja katalis dapat diketahui dengan melakukan pengukuran *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS). Pengukuran CV akan menghasilkan data kurva voltamogram sehingga nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA) dari katalis dapat diketahui, sedangkan pengukuran EIS bertujuan untuk mendapatkan data tahanan larutan (R<sub>s</sub>) dan tahanan transfer (R<sub>p</sub>) sehingga nilai konduktivitas katalis dapat diketahui (Maulana dan Syahbanu, 2017).

## 1.2. Rumusan Masalah

PEM elektrolisis air pada umumnya menggunakan logam IrO<sub>2</sub> dan RuO<sub>2</sub> sebagai katalis pada anoda, serta menggunakan katalis Pt/C pada katoda. Penggunaan katalis logam mulia memungkinkan elektrolisis beroperasi pada kepadatan arus yang tinggi. Operasi dengan kepadatan arus yang tinggi dapat meningkatkan potensial sel dan suhu, sehingga menyebabkan daya tahan elektroda menurun.

Untuk meningkatkan efisiensi biaya, daya tahan elektroda serta daya hantar proton yang baik, maka dapat digunakan katalis logam oksida seperti TiO<sub>2</sub>/C dan Cu<sub>2</sub>O/C. Keduanya menjadi katalis yang menjanjikan karena keberadaannya berlimpah di bumi, murah dan stabil. Pengaruh penggunaan katalis TiO<sub>2</sub>/C dan Cu<sub>2</sub>O/C terhadap kinerja PEM *electrolyzer* dalam menghasilkan hidrogen perlu dievaluasi. Katalis yang sudah dipreparasi dianalisis menggunakan XRD dan pengujian kinerja katalis dilakukan pada arus bervariasi dari 0,5 sampai 2 A dan temperatur bervariasi dari 40 sampai 70°C. Pengamatan dilakukan untuk mendapatkan informasi kinerja katalis TiO<sub>2</sub>/C dan Cu<sub>2</sub>O/C terhadap pengaruh arus dan temperatur pada produksi hidrogen.

## 1.3. Tujuan Penelitian

1. Melakukan pembuatan dan karakterisasi elektroda/MEA dengan katalis Pt/C, TiO<sub>2</sub>/C dan Cu<sub>2</sub>O/C meliputi perhitungan luas permukaan katalitik dengan menggunakan data *Cyclic Voltammetry* (CV) dan menghitung konduktivitas elektrik menggunakan data *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS).
2. Menghitung laju produksi hidrogen yang dihasilkan pada katalis Pt/C, TiO<sub>2</sub>/C dan Cu<sub>2</sub>O/C pada arus dan temperatur bervariasi.

## 1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi terhadap perkembangan teknologi pada produksi hidrogen sehingga dihasilkan hidrogen dengan tingkat kemurnian tinggi yang dapat digunakan sebagai bahan bakar *fuel cell*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afief, A. dan Isana, S. 2017. Produksi Gas Hidrogen Menggunakan Elektroda Stainless Steel/Fe-Co-Ni dengan Media Tepung Biji Rambutan (*Nephelium Lappaceum L.*). *Prosiding Seminar Nasional Kimia UNY*. 1(1): 259–268.
- Ali, S., Ahmed, R. and Ansari, M. S. 2013. Evaluation of Stability and Catalytic Activity of Direct Methanol Fuel Cell Nano-Catalysts by Cyclic Voltammetry. *Nust Journal of Engineering Sciences*. 6(1): 21–26.
- Alimah, S. dan Salimy, D. H. 2015. Analisis Pasokan Panas Pada Produksi Hidrogen Proses Steam Reforming Konvensional dan Nuklir. *Pengembangan Energi Nuklir*. 17(1): 10–20.
- Arifianto, M. F. T. dan Rosyidah, A. 2012. Sintesis dan karakterisasi Aurivillius Lapis Dua  $\text{CaBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$  dan Aurivillius Lapis Dua  $\text{BaBi}_2\text{NbTaO}_9$  dengan Metode Solid State. *Jurnal sains dan seni ITS*. 1(1): 1–6.
- Babic, U., Suermann, M., Buchi, N. F., Gubler, L. and Schmidt, T. J. 2017. Review Identifying Critical Gaps for Polymer Electrolyte Water Electrolysis Development. *Journal of The Electrochemical Society*. 164(4). F387–F399.
- Bagheri, S., Julkapli, N. M. and Hamid, S. B. A. 2014. Titanium Dioxide as a Catalyst Support in Heterogeneous Catalysis. *The Scientific World Journal*. 1(1): 1–21.
- Basuli, U., Jose, J., Lee, R. H., Yoo, Y. H., Jeong, K. U., Ahn, J. H. and Nah, C. 2012. Properties and Degradation of The Gasket Component of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell: A Review. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 12(1): 7642–7657.
- Bernt, M., Weiß, A. H., Tovini, M. F., Sayed, H. A., Schramm, C., Schroter, J., Gebauer, C. and Gasteiger, H. A. 2020. Current Challenges in Catalyst Development for PEM Water Electrolyzers. *Chemie Ingenieur Technik*. 92(1): 1–10.
- Bessarabov, D., Wang, H., Li, H. dan Zhao, N. 2015. *PEM Electrolysis for Hydrogen Production Principles and Applications*. London: CRC Press.
- Bunaciu, A. A., Udristioiu, E. G. and Enein, H. 2015. Critical Reviews in Analytical Chemistry X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications X-Ray Diffraction : Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 45(1): 289-299.
- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J. And Stolten, D. 2013. A Comprehensive Review on PEM Water Electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 38(1): 4901–4934.
- Casseta, A. 2014. *X-Ray Diffraction (XRD)*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Chi, J. and Yu, H. 2018. Water Electrolysis Based on Renewable Energy for Hydrogen Production. *Chinese Journal of Catalysis*. 39(3): 390–394.

- Destyorini, F., Irmawati, Y., Widodo, H., Khaerudini, D. S. and Indayaningsih, N. 2018. Properties and Performance of Gas Diffusion Layer PEMFC Derived from Coconut Coir. *Jurnal Engineer Technology Science*. 50(3): 409–419.
- Dewi, E. L., Arti, D. K., Prasetyo, N. A., Pradana, Y., Kuniawan, dan Pradipta, A. O. 2012. Produksi Hidrogen Menggunakan Alkohol PEM Elektroliser dengan Aplikasi Ideal-Triple-Phase. *Prosiding Insinas*. 12–15.
- Doe. 2007. *Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program, Multi Year Research, Developmnet and Demonstration Plan*. United State: U.S. Department of Energy.
- Feng, Q., Yuan, X. Z., Liu, G., Wei, B., Zhang, Z., Li, H. and Wang, H. 2017. A Review of Proton Exchange Membrane Water Electrolysis on Degradation Mechanisms and Mitigation Strategies. *Journal of Power Sources*. 66(1): 33–55.
- Fina, F., Ménard, H. and Irvine, J. T. S. 2015. The Effect of Pt NPs Crystallinity and Distribution on the Photocatalytic Activity of Pt-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 17(21): 13929–13936.
- Grigoriev, S. A., Millet, P., Volobuev, S. A. and Fateev, V. N. 2009. Optimization of Porous Pengumpul arus for PEM Water Electrolysers. *International Journal of Hydrogen Energy*. 34(11): 4968–4973.
- Hameed, R. M. A., Amin, R. S., Khatib, K. M. E. And Fetohi, A. E. 2016. Preparation and Characterization of Pt-CeO<sub>2</sub>/C and Pt-TiO<sub>2</sub>/C Electrocatalysts with Improved Electrocatalytic Activity for Methanol Oxidation. *Applied Surface Science*. 367(1): 382–390.
- 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.
- Harahap, M. E. dan Tjahjono, E. W. 2016. Kajian Teknologi Proses Pembuatan Gas Sintetik dari Technology Review Process of Synthetic Gas From Coal Utilization and Prospect in Downstream. *MPI*. 10(1): 61–70.
- Hattu, N., Buchari, Noviandri, I. dan Achmad, S. 2009. Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan Mipa, Fakultas Mipa, Universitas Negeri Yogyakarta. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan Dan Penerapan Mipa*. 185–192.
- Imperiyka, M. H. and Eman, B. A. 2017. An Overview of Hydrogen Production Technologies of Water Electrolysis. *International Journal of Science and Research*. 6(7): 206–217.
- Irwan, F. dan Afdal. 2016. Analisis Hubungan Konduktivitas elektrik dengan Total Dissolved Solid (TDS) dan Temperatur Pada Beberapa Jenis Air. *Jurnal Fisika Unand*. 5(1): 85–93.
- Islam, M. M., Diawara, B., Maurice, V. and Marcus, P. 2009. Theochem Bulk and Surface Properties of Cu<sub>2</sub>O: A First-Principles Investigation. *Journal of Molecular Structure: Theochem*. 903(1): 41–48.

- Ito, H., Maeda, T., Nakano, A. and Takenaka, H. 2011. Properties of Nafion Membranes Under PEM Water Electrolysis Conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 36(17): 10527–10540.
- Joshi, P.S. and Sutrave, D. S. 2018. A Brief Study of Cyclic Voltammetry and Electrochemical Analysis. *International Journal of ChemTech Research*. 11(9): 77–88.
- Kamarudin, S. K. and Hashim, N. 2012. Materials, Morphologies and Structures of MEAs in DMFCs. *Journal Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(5). 2494–2515.
- Kwasi, E., Obanor, A. I. and Aisien, F. A. 2015. A Review on Electrolytic Method of Hydrogen Production From Water. *American Journal of Renewable And Sustainable Energy*. 1(2): 51–57.
- Kumar, S. S., Ramakhrisna, S.U.B., Devi, B. R. and Himabindu, V. 2018. 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.
- Laedre, S. 2016. *Bipolar Plates For PEM Systems*. Norwegia: Norwegian University of Science and Technology.
- Lázaro, M. J., Calvillo, L., Celorrio, V., Pardo, J.I., Perathoner, S. and Moliner, R. 2011. Study and Application of Carbon Black Vulcan XC-72R in Polymer Electrolyte Fuel Cells. *Carbon Black: Production, Properties and Uses*. 1(1): 41–68.
- Lestariningsih, T., Sabina, Q. and Majid, N. 2017. Penambahan TiO<sub>2</sub> dalam Pembuatan Lembaran Polimer Elektrolit Berpengaruh Terhadap Konduktivitas dan Kinerja Baterai Lithium. *Jurnal Material dan Energi Indonesia*. 07(01): 31–37.
- Liang, H., Su, H., Pollet, B. G. and Pasupathi, S. 2015. Development of Membrane Electrode Assembly for High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell by Catalyst Coating Membrane Method. *Journal Of Power Sources*. 288(1): 121–127.
- Lo, C., Wang, G., Kumar, A. and Ramani, V. 2013. Applied Catalysis B: Environmental TiO<sub>2</sub> – RuO<sub>2</sub> Electrocatalyst Supports Exhibit Exceptional Electrochemical Stability. *Applied Catalysis B: Environmental*. 141(1): 133–140.
- Maidhily, M., Rajalakshmi, N. and Dhathathreyan, K. S. 2011. Electrochemical Impedance Diagnosis of Micro Porous Layer in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Electrodes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 36(19): 12352–12360.
- Majlan, E. H., Rohendi, D., Daud, W.R.W., Husaini, T. and Haque, M. A. 2018. Electrode for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 89(1): 117–134.

- Maric, R. and Yu, H. 2018. *Nanostructures in Energy Generation, Transmission and Storage*. Intechopen.
- Martawati, M. E. 2014. Sistem Elektrolisa Air Sebagai Bahan Bakar Alternatif Pada Kendaraan. *Jurnal Eltek*. 12(1): 93–104.
- Maulana, M. I. and Syahbanu, I. 2017. Sintesis dan Karakterisasi Material Konduktif Film Komposit Polipirol (Ppy)/ Selulosa Bakteri. *Jkk*. 6(3): 11–18.
- Mavrokefalos, C. K. and Patzke, G. R. 2019. Water Oxidation Catalysts : The Quest for New Oxide-Based Materials. *Inorganics*. 29(7): 2–37.
- Millet, P., Mbemba, N., Grigoriev, S. A., Fateev, V.N. Aukauloo, A. and Etievant, C. 2010. Electrochemical Performances of PEM Water Electrolysis Cells and Perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*. 36(1): 4134–4142.
- Millet, P. and Grigoriev, S. A. 2014. Electrochemical Characterization and Optimization of a PEM Water Electrolysis Stack for Hydrogen Generation. *Chemical Engineering Transactions*. 41(1): 7–12.
- Mohite, B. S., Burungale, S. H., Mane, S. G. and Patil, P. N. 2000. Solvent Extraction Separation of Barium(II) from Associated Elements Using 15-Crown-5 from Picrate Medium. *Indian Journal of Chemistry*. 8(1): 554–556.
- Nasution, N. dan Fitri, A. 2018. Sintesis Nanopartikel TiO<sub>2</sub> Fasa Rutile dengan Metode Kopresipitasi. *Jurnal Ilmu Fisika dan Teknologi*. 2(2): 18–25.
- Nurdin, M., Agus, L., Putra, A. A., Maulidiyah, M., Arham, Z., Wibowo, D., Muzakkar, M. Z. and Umar, A. A. 2019. Synthesis and Electrochemical Performance of Graphene-TiO<sub>2</sub>-Carbon Paste Nanocomposites Electrode in Phenol Detection. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1(1): 1–18.
- Ojong, E. T. 2018. Characterization of the Performance of PEM Water Electrolysis Cells Operating with and without Flow Channels, based on Experimentally Validated Semi-Empirical Coupled-Physics Models. *Disertasi Technischen Universität Cottbus*.
- Omrani, R. and Shabani, B. 2017. Gas Diffusion Layer Modifications and Treatments for Improving The Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Electrolysers : A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 30(1): 1–22.
- Pollet, B. G., Franco, A. A., Su, H., Liang, H. and Pasupathi, S. 2016. *Proton Exchange Membrane Fuel Cells*. South Africa: University of the Western Cape.
- Purnami, Wardana, I. N.G. dan Veronika, K. 2015. Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Laju dan Efisiensi Pembentukan Hidrogen. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 6(1): 51–59.
- Puspitasari, N. Adawiyah, S. R., Fajar, M. N., Yudono, G., Rubiyanto, A. dan Endarko. 2017. Pengaruh Jenis Katalis pada Elektroda Pembanding terhadap Efisiensi Dye Sensitized Solar Cells dengan Klorofil sebagai Dye Sensitizer. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. 13(1): 30–33.



- Putra, A. M. 2010. Analisis Produktifitas Gas Hidrogen dan Gas Oksigen Pada Elektrolisis Larutan KOH. *Jurnal Neutrino*. 2(2): 141–154.
- Qian, Y., Ye, F., Xu, J. and Le, Z. G. 2012. Synthesis of Cuprous Oxide (Cu<sub>2</sub>O) Nanoparticles/Graphene Composite with an Excellent Electrocatalytic Activity Towards Glucose. *International Journal of Electrochemical Science*. 7(10): 10063–10073.
- Rashid, M., Mesfer, M. K., Naseem, H. and Danis, 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*. 4(3): 80–93.
- Rohendi, D. dan Adnan, Y. 2010. Pembuatan Elektroda Fuel Cell dengan Metode Elektrodeposisi Menggunakan Katalis Pt-Cr/C dan Pt/C dan Karakterisasinya. *Jurnal Penelitian Sains*. 13(1): 1-12.
- Rohendi, D., Majlan, E. H., Mohamad, A. B., Daud, W. R. W., Kadhum, A. A. H. and 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.
- Rohendi, D., Majlan, E. H., Mohamad, A. B., Daud, W. R. W., Kadhum, A. A. H. and 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.
- Rosyid, O. A. dan Oktaufik, M. A. M. 2009. Infrastruktur Hidrogen untuk Aplikasi Fuel Cell dalam Era Ekonomi Hidrogen. *Jurnal Ilmu Teknik Energi*. 1(9): 1–14.
- Rusli, I. dan Sitepu, T. 2013. Simulasi Distribusi Temperatur Pada *Gas Diffusion Layer* Sebuah Sel Bahan Bakar *Polymer Electrolyte Membrane* Kapasitas 20 W. *Jurnal Dinamis*. 2(12): 8–15.
- Samad, S., Loh, K. S., Wong, W. Y., Lee, T. K., Sunarso, J., Chong, S. T. and Daud, W. R. W. 2018. Carbon And Non-Carbon Support Materials for Platinum-Based Catalysts in Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 43(16): 7823–7854.
- Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J. and Few, S. 2017. Future Cost and Performance of Water Electrolysis : An Expert Elicitation Study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 42(52): 30470–30492.
- Septiani, U., Gustiana, M. dan Safni. 2015. Pembuatan dan Karakterisasi Katalis TiO<sub>2</sub>/Karbon Aktif dengan Metode Solid State. *Jurnal Riset Kimia*. 9(1): 34–38.
- Setiawan, Y. dan Salam, F. 2018. Gas Hidrogen Pada Proses Elektrolisis Terhadap Emisi dan Konsumsi Bahan Bakar. *Jurnal Teknik Mesin Untirta*. 4(1): 10–13.
- Simamora, P. dan Siagian, S. M. 2014. Preparasi dan Karakterisasi Sifat Optik Nanopartikel Cu<sub>2</sub>O dengan Metode Kopresipitasi. *Jurnal Einstein*. 2(1): 42–50.
- Siracusano, S., Hodnik, N., Jovanovic, P., Zepeda, F. R., Sala, M., Baglio, V. and

- Arico, A. S. 2017. New Insights into the Stability of a High Performance Nanostructured Catalyst for Sustainable Water Electrolysis. *Nano Energy*. 1(1): 1–31.
- Singh, M., Jampaiah, D., Kandjani, A. E., Sabri, Y. M., Gaspera, E. D., Reineck, P., Judd, M., Langley, J., Cox, N., Emdben, J. V., Edwin, M., Gibson, B. C., Bhargava, S. K., Ramanathan, R. And Bansal, V. 2018. Oxygen-Deficient Photostable Cu<sub>2</sub>O for Enhanced Visible Light Photocatalytic Activity. *Nanoscale*. 10(13): 6039–6050.
- Stevens, D. A. and Dahn, J. R. 2003. Electrochemical Characterization of The Active Surface in Carbon-Supported Platinum Electrocatalysts for PEM Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society*. 150(6): 770–775.
- Tang, H., Wang, J., Yin, H., Zhao, H., Wang, D. and Tang, Z. 2014. Growth of Polypyrrole Ultrathin Films on MoS<sub>2</sub> Monolayers as High-Performance Supercapacitor Electrodes. *Advanced Material*. 1(1): 1–7.
- Theivasanthi, T. and Alagar, M. 2013. Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) Nanoparticles XRD Analyses: An Insight. *Chemical Physics*. 1(1): 1–10.
- Tijani, A. S., Barr, D. and Rahim, A. H. A. 2015. Computational Modelling of the Flow Field of an Electrolyzer System Using CFD. *Energy Procedia*. 79(1): 195–203.
- Titirici, M. M. 2013. *Sustainable Carbon Materials from Hydrothermal Processes*. United Kingdom: Wiley.
- Tugirumubano, A., Shin, H. J., Go, S. H., Lee, M. S., Kwac, L. K. and 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.
- Ursúa, A., Gandía, L. M. and Sanchis, P. 2012. Hydrogen Production from Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. *Proceedings of the IEEE*. 100(2): 410–426.
- Wahyono, Y., Sutanto, H. dan Hidayanto, E. 2017. Produksi Gas Hidrogen Menggunakan Metode Elektrolisis dari Elektrolit Air dan Air Laut dengan Penambahan Katalis NaOH. *Youngster Physics Journal*. 6(4): 353–359.
- Wang, J., Xu, M., Zhao, J., Fang, H., Huang, Q., Xiao, W., Li, T. and Wang, D. 2018. Anchoring Ultrafine Pt Electrocatalysts on TiO<sub>2</sub>-C Via Photochemical Strategy to Enhance the Stability and Efficiency for Oxygen Reduction Reaction. *Applied Catalysis B, Environmental*. 1(1): 1–35.
- Wang, L., Advani, S. G. and Prasad, A. K. 2013. Membrane Electrode Assembly With Enhanced Membrane/Electrode Interface for Proton Exchange Membrane Fuel

Cells. *The Journal of Physical Chemistry*. 117(1): 945–948.

Yang, S., Zhang, X., Wang, B., Huang, H., Zhao, Z., Wang., X., Yu, K. and Ahmadi, G. 2018. A Practical Low-Cost Approach to Build Membrane Electrode Assemblies Using Decal Transfer Technique. *Energy Procedia*. 145(1): 458–463.

Yuan, X., Wang, H., Sun., J. C. and Zhang, J. 2007. AC Impedance Technique in PEM Fuel Cell Diagnosis-a Review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 32(1): 4365–4380.