

Pabrikasi Membrane Electrode Assembly Menggunakan Metode Decal Transfer Dengan Katalis Platina Didukung Karbon Dan Variasi Ketebalan

Pande Nyoman Agus Adnyana¹, I Made Joni², Made Suarda^{1*}, Ketut Astawa^{1*},
Made Sucipta^{1*}

¹Program Studi Teknik - Mesin, Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

²Finder U-CoE – Universitas Padjajaran, Jatinangor, Jawa Barat

Abstrak

Penggunaan kendaraan konvensional meningkatkan ketergantungan terhadap energi bahan bakar fosil yang sumber dayanya kian menipis, belum lagi masalah yang ditimbulkan berupa gas emisi. Hidrogen merupakan energi alternatif yang dapat menjadi solusi dengan memanfaatkan teknologi fuel cell pada kendaraan berbasis listrik. Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) adalah salah satu jenis teknologi fuel cell yang umum diaplikasikan pada kendaraan listrik. Namun terdapat beberapa kendala, seperti kinerja, dan efektivitas biaya, sehingga diperlukan pengembangan lebih lanjut. Komponen utama dari PEMFC adalah membrane electrode assembly (MEA) yang merupakan tempat terjadinya reaksi elektrokimia. Tujuan dari penelitian ini untuk menganalisis pengaruh ketebalan MEA terhadap kinerjanya yang diuji dengan PEMFC testing. Pada penelitian ini, MEA dipabrikasi melalui metode decal transfer dengan variasi ketebalan MEA yaitu 140 μm , 170 μm , dan 200 μm . Berdasarkan hasil pengujian PEMFC testing, sampel MEA dengan ketebalan 140 μm menunjukkan hasil terbaik dengan nilai tegangan tertinggi yang dihasilkan yaitu 9800 μV pada kondisi tanpa resistansi. Pada resistansi tertentu, nilai densitas arus tertinggi dan densitas daya maksimum yang dihasilkan adalah 9,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ dan 12204 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Kata kunci: Decal Transfer, Membrane Electrode Assembly, Ketebalan MEA

Abstract

The use of conventional vehicles increases dependence on fossil fuel energy whose resources are increasingly depleted, not to mention the problems caused by emission gases. Hydrogen is an alternative energy that can be a solution by utilizing fuel cell technology in electric-based vehicles. Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is one type of fuel cell technology that is commonly applied to electric vehicles. However, there are several obstacles, such as performance and cost effectiveness, so further development is needed. The main component of PEMFC is the membrane electrode assembly (MEA) which is where the electrochemical reaction occurs. The purpose of this study is to analyze the effect of MEA thickness on its performance which is tested by PEMFC testing. In this study, MEA was fabricated using the decal transfer method with variations in MEA thickness, namely 140 μm , 170 μm , and 200 μm . Based on the results of PEMFC testing, the MEA sample with a thickness of 140 μm showed the best results with the highest voltage value produced, namely 9800 μV in conditions without resistance. At a certain resistance, the highest current density and maximum power density values produced are 9.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ and 12204 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Keywords: Decal Transfer, Membrane Electrode Assembly, MEA Thickness

1. Pendahuluan

Produksi dan penggunaan kendaraan konvensional dalam skala besar meningkatkan ketergantungan terhadap energi bahan bakar fosil yang saat ini sumber dayanya semakin menipis. Masalah selanjutnya yang timbul adalah ancaman berupa gas emisi yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil tersebut, sehingga diperlukan pengembangan teknologi transportasi yang ramah lingkungan dan energi alternatif baru sebagai pengganti bahan bakar fosil, salah satunya adalah hidrogen. Fuel cell merupakan teknologi yang dapat mengkonversi hidrogen menjadi listrik dan dapat digunakan sebagai sumber energi pada kendaraan berbasis listrik. Kendaraan listrik berbasis hidrogen memiliki potensi yang menjanjikan karena beberapa kelebihanannya, diantaranya yaitu waktu pemakaian jangka panjang, waktu pengisian bahan bakar yang singkat, serta bebas emisi [1 - 2]. Proton exchange

membrane fuel cell (PEMFC) adalah salah satu jenis teknologi fuel cell yang paling umum diaplikasikan pada kendaraan listrik berbasis hidrogen [3 - 4]. Untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan, PEMFC memiliki beberapa komponen yang diintegrasikan, membrane electrode assembly (MEA) adalah jantung dari PEMFC yang merupakan tempat terjadinya reaksi elektrokimia antara hidrogen dan oksigen untuk menghasilkan listrik. MEA pada umumnya tersusun atas membran elektrolit, lapisan katalis anoda dan katoda, serta gas diffusion layer [5].

Lapisan katalis yang paling umum digunakan pada MEA adalah katalis berbasis platina yang didukung karbon (Pt/C). Namun, ketersediaan Pt yang terbatas membuat harganya relatif tinggi sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan kinerja dari MEA melalui proses pabrikasinya. Upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kinerja dari MEA sekaligus

menurunkan biaya produksinya adalah dengan mengatur ketebalan MEA yang akan dibuat. Ketebalan MEA dapat diatur dengan menggunakan katalis yang tipis, sehingga memerlukan pemuatan Pt yang rendah dan mampu memberikan laju reaksi elektrokatalitik pada MEA yang lebih unggul dibandingkan MEA dengan porositas katalis yang tebal dan berliku-liku dimana karbon mengendap. *Decal transfer method* (DTM) adalah salah satu metode yang menggabungkan beberapa teknik pelapisan katalis dalam pembuatan MEA. DTM memiliki beberapa kelebihan dibandingkan metode lainnya, salah satunya adalah dapat mengatur ketebalan MEA [5 - 6]. Terdapat beberapa parameter yang mempengaruhi kinerja dari MEA selama proses fabrikasi dengan menggunakan DTM, yaitu suhu, waktu, dan tekanan *hot press*, dimana tekanan *hot press* akan mempengaruhi ketebalan dari MEA yang dibuat [7 - 8].

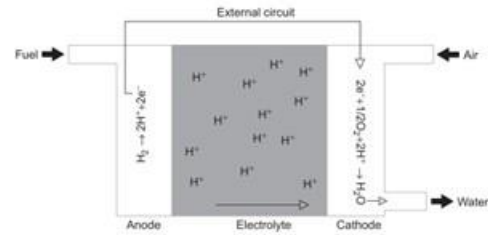
Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja MEA dengan katalis Pt/C yang dipabrikasi menggunakan metode *decal transfer* dan ketebalan MEA yang divariasikan. Adapun permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini meliputi analisis kinerja MEA dengan katalis Pt/C yang dipabrikasi menggunakan metode *decal transfer* dan ketebalan MEA yang divariasikan. Untuk mendapatkan hasil yang diharapkan dari permasalahan tersebut, diperlukan adanya batasan meliputi komponen yang digunakan dalam pengujian adalah komponen yang sudah tersedia secara komersial, katalis yang digunakan adalah katalis yang telah dikembangkan dalam penelitian sebelumnya, dan pembuatan MEA ini dilakukan pada suhu ambient.

2. Dasar Teori

2.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) adalah salah satu jenis *fuel cell* dengan suhu pengoperasian yang terbilang rendah, yaitu pada kisaran 40 - 80 °C. Pengaplikasian PEMFC ini banyak diterapkan pada alat transportasi, karena mampu memberikan kerapatan daya yang tinggi dan waktu start-up yang cepat, serta tidak menghasilkan gas emisi.

Selama pengoperasian PEMFC, terjadi reaksi oksidasi hidrogen di anoda yang kemudian melepaskan elektron menuju katoda melalui sirkuit eksternal. Di katoda, elektron akan bergabung dengan oksigen, lalu bereaksi dengan ion H^+ yang keluar melalui elektrolit, dan akhirnya membentuk air (H_2O). PEMFC pada umumnya terdiri dari tiga bagian, yaitu dua pelat bipolar, dan sebuah membran yang disebut *membrane electrode assembly* (MEA) yang merupakan jantung dari PEMFC [9].

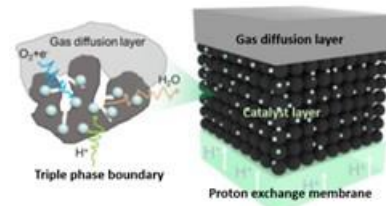


Gambar 1. Skema reaksi pada PEMFC [9].

Oksidasi bahan bakar terjadi di anoda dan reduksi terjadi di katoda, kedua elektroda tersebut dibantu oleh sebuah katalis.

2.2 Membrane Electrode Assembly

Membrane electrode assembly (MEA) adalah inti dari PEMFC yang merupakan tempat terjadinya reaksi elektrokimia dimana terbentuk zona *triple phase boundary* (TPB). MEA tersusun dari anoda GDL, lapisan katalis anoda, membran elektrolit, lapisan katalis katoda, dan katoda GDL. MEA yang baik harus dapat membentuk zona TPB yang dapat menyediakan jalur pengangkutan elektron, proton, dan gas reaktan [9 - 10].



Gambar 2. Skema *triple phase boundary* [6].

a. Membran Elektrolit

Membran ini berfungsi sebagai elektrolit padat untuk memisahkan dan menghantarkan proton dari anoda menuju katoda. Membran yang umum digunakan saat ini adalah membran asam perfluorosulfonat (PFSA) seperti nafion dengan kelebihan yaitu stabilitas termal dan mekanik yang baik, serta konduktivitas proton yang tinggi.

b. Lapisan Katalis

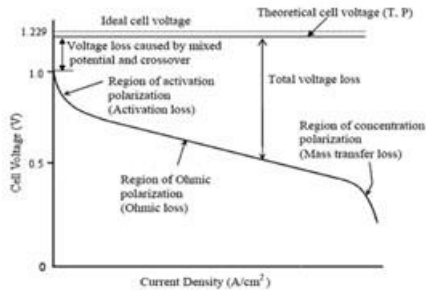
Lapisan katalis pada MEA adalah tempat terjadinya reaksi redoks sehingga dapat menghasilkan listrik. Lapisan katalis umumnya memiliki ketebalan (~10 - 100 μm , biasanya 30 μm) yang terdiri dari serbuk katalis, ionomer konduktif proton (PEM) atau politetrafluoroetilen (PTFE). Katalis yang paling umum digunakan pada PEMFC adalah katalis berbasis platina yang didukung oleh karbon (Pt/C)

c. Gas Diffusion Layer

Gas diffusion layer (GDL) adalah struktur berpori yang berfungsi sebagai pendukung terjadinya reaksi pada lapisan katalis dan menyediakan jalur transportasi untuk gas reaktan dan air. Pada umumnya, GDL memiliki dua lapisan yaitu *gas diffusion media* (GDM) yang terbuat dari serat karbon dan *microporous layer* (MPL) yang terbentuk dari serbuk karbon [10].

2.3 Karakteristik PEMFC

Karakteristik PEMFC dapat ditunjukkan melalui grafik tegangan dan densitas arus (V/i) atau kurva polarisasi PEMFC. Kurva polarisasi didapat dengan mengukur tegangan keluar *fuel cell* pada arus yang berbeda, atau sebaliknya.



Gambar 3. Kurva polarisasi [10].

Gambar 3 adalah kurva polarisasi PEMFC yang menunjukkan 4 mekanisme/zona *losses*, dimana potensi sel akan menurun dari potensinya karena adanya *losses* tersebut pada sistem.

a. Fuel Crossover

Fuel crossover adalah zona dimana terjadi kehilangan energi pada sistem saat hidrogen melewati membran elektrolit dan berpindahnya elektron melalui elektrolit. Hal ini dipengaruhi oleh kondisi pengoperasian PEMFC, yaitu suhu, tekanan, kelembaban, dan densitas arus.

b. Activation Losses

Activation losses adalah zona dimana energi akan hilang pada sistem yang digunakan untuk memulai reaksi elektrokimia yang terjadi pada permukaan elektroda. Sebagian dari tegangan akan hilang dalam reaksi yang harus memindahkan elektron dari/menjuuri elektroda.

c. Ohmic Losses

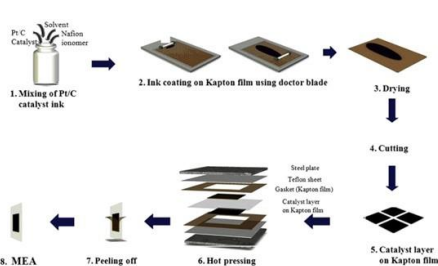
Ohmic losses adalah kerugian energi yang disebabkan karena adanya resistansi internal pada sistem PEMFC. Pada zona ini, tegangan akan menurun secara perlahan seiring meningkatnya arus,

d. Mass Transport Losses

Mass transport losses terjadi karena laju perpindahan massa dari suatu spesies pada elektroda membatasi produksi arus yang pada umumnya terjadi pada densitas arus PEMFC yang tinggi [10 - 11].

2.4 Decal Transfer Methods

Decal transfer methods (DTM) adalah salah satu metode pabrikasi yang disarankan dalam pembuatan MEA.



Gambar 4. Metode Decal Transfer [12].

Melalui metode ini, katalis dibentuk dengan melapiskan tinta katalis ke kapton film menggunakan mesin *doctor blade coating*. Selanjutnya katalis ditransfer ke membran elektrolit menggunakan mesin *hot press*.

a. Doctor Blade Coating

Doctor blade coating adalah teknik pelapisan tinta katalis dengan menggunakan alat yang disebut *doctor blade* atau *knife*. Kelebihan dari teknik ini adalah dapat mengatur ketebalan lapisan katalis dan diaplikasikan dengan mudah untuk pabrikasi MEA.

b. Hot Press

Hot press adalah cara yang efektif dan sederhana dalam pembuatan MEA. Alat ini mampu menghasilkan kontak antarmuka yang baik antara elektroda dengan membran elektrolit. Kondisi *hot press* seperti tekanan, suhu, dan durasi *hot press* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja dan daya tahan dari MEA. Pada umumnya, kondisi *hot press* dalam pembuatan MEA dilakukan pada suhu 120-160 °C, durasi selama 30-300 detik, dan tekanan 2-3,5 MPa, dimana tekanan pada *hot press* akan berpengaruh pada ketebalan MEA yang akan dibuat, umumnya kurang dari 1 mm [10].

3. Metode Penelitian

Pada penelitian ini membahas terkait pengaruh ketebalan MEA terhadap kinerja MEA yang dipabrikasi dengan metode *decal transfer*. Material katalis yang digunakan adalah Pt/C.

3.1 Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini yaitu membran PFSA D170-U dengan dimensi 3 × 3 cm, kapton film, 1 gram tinta katalis Pt/C dengan perbandingan massa 0,4 gram platina dan 0,6 gram karbon, 1,2 gram nafion solution 5wt%, 1,2 gram air deionisasi, 1,2 gram isoprophil alkohol (IPA), dan 1,2 gram etilen glikol.

3.2 Pre-Treatment Membran

Membran PFSA direndam selama 1 jam pada suhu 60 - 80 °C dalam larutan H₂O₂ dengan konsentrasi 3 - 5% untuk menghilangkan pengotor organik dan anorganik yang terkandung dalam membran. Selanjutnya membran direndam kembali selama 1 jam pada suhu 60 - 80 °C dalam larutan H₂SO₄ 0,5 M untuk memprotonisasi membran. Kemudian membran dibilas dengan air deionisasi pada suhu 70 °C hingga mencapai pH 7. Membran yang telah di *pre-treatment* selanjutnya disimpan dalam air destilasi pada suhu kamar.

3.3 Preparasi dan Deposisi Tinta Katalis

Proses pembuatan tinta katalis dimulai dengan mencampurkan 1 gram bubuk katalis Pt/C, 1,2 gram air destilasi, 1,2 gram *nafion solution* 5wt%, 1,2 gram isoprophil alkohol, dan 1,2 gram etilen glikol ke dalam gelas vial. Tinta yang dihasilkan kemudian di ultrasonikasi dengan gelombang 60 Hz selama 3 jam. Selanjutnya tinta katalis diteteskan sebanyak 0,4 mg/cm² pada kapton film dan diratakan menggunakan *doctor blade*. Ketebalan katalis yang dibuat telah

ditetapkan dalam penelitian ini adalah 30 μm . Tinta katalis yang telah dilapiskan pada kapton film kemudian dikeringkan menggunakan *vacuum oven* pada temperatur 100 $^{\circ}\text{C}$ selama 1 jam 10 menit. Setelah kering, lapisan tinta katalis akan dipotong dengan ukuran $3 \times 3 \text{ cm}$ dan siap untuk di *hot press* dengan membran PFSA.

3.4 Proses Decal Transfer

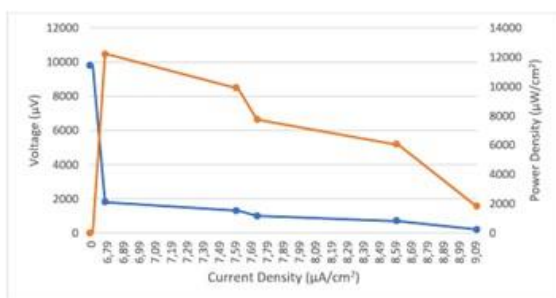
Kapton film yang telah dilapisi tinta katalis disusun dengan mengapit membran PFSA yang sudah di *pre-treatment* dan selanjutnya dilakukan proses *hot press*. Proses *hot press* dilakukan dengan temperatur 80 $^{\circ}\text{C}$. Ketebalan MEA yang dibuat pada penelitian ini telah ditetapkan yaitu 140, 170, dan 200 μm . Setelah proses *hot press* selesai, kapton film dilepas dari kedua sisi elektroda hingga didapatkan MEA.

3.5 Pengujian Kinerja MEA

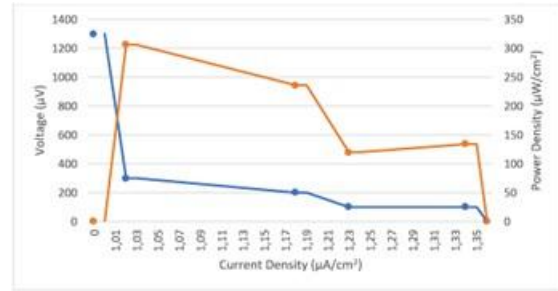
Karakterisasi densitas daya dan arus dilakukan dengan menggunakan PEMFC *testing ED 9741-2*. Pengujian dimulai dengan menyusun MEA menjadi *single cell* PEMFC (MEA, GDL, gasket silikon, *current collector*, *end plate*) untuk diletakkan pada alat uji. Kemudian hubungkan kabel yang tersedia pada alat uji PEMFC dengan *current collector* pada PEMFC. Selanjutnya hubungkan DC *power supply* dengan elektrolizer dan tegangannya diatur pada 10 V. Hubungkan selang pada elektrolizer dengan PEMFC yang telah dirakit pada sisi anoda. Ketika tegangan tanpa resistansi yang dihasilkan PEMFC sudah stabil, catat data tegangan (V) dan arus (I). Berikan resistansi yang telah ditentukan, yaitu 3,4, 10, 15, 20, dan 30 ohm. Saat tegangan pada masing-masing resistansi sudah stabil, catat data tegangan dan arus yang terlihat pada Avometer. Setelah data didapatkan, lakukan proses analisis.

4. Hasil dan Pembahasan

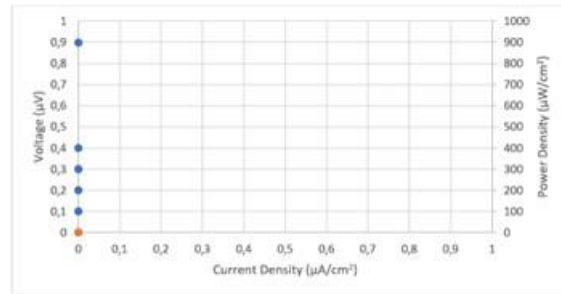
Pengujian PEMFC *testing* pada sampel MEA dengan tiga variasi ketebalan yang berbeda telah dilakukan. Hasil dari pengujian PEMFC *testing* ini berupa kurva polarisasi kinerja PEMFC yang ditunjukkan pada Gambar 5, 6, dan 7. Kurva polarisasi adalah gambaran standar untuk mengevaluasi kinerja dari *fuel cell* selama pengoperasian dan berupa kurva yang menunjukkan hubungan antara tegangan dengan densitas arus yang dihasilkan saat diberikan suatu resistansi.



Gambar 5. Kurva polarisasi PEMFC dengan ketebalan MEA 140 μm .



Gambar 6. Kurva polarisasi PEMFC dengan ketebalan MEA 170 μm .



Gambar 7. Kurva polarisasi PEMFC dengan ketebalan MEA 200 μm .

Gambar 5 menunjukkan kurva polarisasi PEMFC dengan ketebalan MEA 140 μm yang menghasilkan nilai tegangan tertinggi yaitu 9800 μV pada kondisi tanpa resistansi. Selanjutnya diberikan resistansi pada nilai 3,4 ohm dan menghasilkan nilai tegangan 200 μV dengan nilai densitas arus 9,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Penurunan tegangan terjadi karena adanya *activation losses* dan *ohmic losses*. *Activation losses* adalah kerugian yang terjadi saat memulai reaksi elektrokimia, energi yang dibutuhkan untuk memulai reaksi tersebut menyebabkan adanya penurunan tegangan. *Ohmic losses* terjadi karena saat diberikan resistansi, arus yang bergerak menghasilkan resistansi internal dan menyebabkan penurunan tegangan. Sementara itu, nilai densitas daya yang dihasilkan awalnya meningkat seiring dengan meningkatnya densitas arus, pada nilai densitas arus 6,78 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, nilai densitas daya yang dihasilkan adalah 12204 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Nilai tersebut merupakan puncak densitas daya yang dihasilkan oleh MEA dengan ketebalan 140 μm . Namun, Gambar 5. menunjukkan nilai densitas arus tertinggi yang dihasilkan adalah 9,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, terlihat bahwa densitas daya maksimum tidak selalu tercapai pada densitas arus maksimum [10 - 11].

Gambar 6 menunjukkan kurva polarisasi PEMFC dengan ketebalan MEA 170 μm yang menghasilkan nilai tegangan tertinggi yaitu 1300 μV pada kondisi tanpa resistansi. Setelah diberikan resistansi pada nilai 3,4 ohm, nilai densitas arus yang dihasilkan adalah 1,36 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, namun tegangan listrik menunjukkan nilai 0 μV . Hal ini terjadi karena adanya *activation losses* sehingga tegangan listrik yang dihasilkan terlalu kecil untuk dideteksi oleh Avometer. Namun saat diberikan resistansi 10 ohm, terlihat nilai densitas arus yang dihasilkan adalah 1,34

$\mu\text{A}/\text{cm}^2$ dan menunjukkan adanya kenaikan nilai tegangan yaitu sebesar $100\ \mu\text{V}$. Sementara itu, terjadi penurunan densitas daya pada resistansi $15\ \text{ohm}$, hal ini disebabkan adanya *ohmic losses* sehingga nilai arus yang dihasilkan menurun dan menyebabkan nilai densitas daya yang dihasilkan ikut menurun. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 densitas arus tertinggi yang dihasilkan adalah $1,36\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ dan puncak densitas dayanya adalah $306\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$.


Gambar 7 menunjukkan kurva polarisasi PEMFC dengan ketebalan MEA $200\ \mu\text{m}$ yang menghasilkan nilai tegangan tertinggi yaitu $900\ \mu\text{V}$ pada kondisi tanpa resistansi. Namun setelah diberikan resistansi, arus listrik yang dihasilkan terlalu kecil untuk dideteksi oleh Avometer. Hal ini terjadi karena adanya delaminasi lapisan katalis dan membran yang disebabkan oleh kurangnya tekanan saat proses pabrikasi. Hal ini menyebabkan tidak terbentuknya ikatan yang baik antara lapisan katalis dengan membran, sehingga zona *triple phase boundary* (TPB) pada MEA tidak terbentuk [6] [13].

5. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisa yang dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa pengaruh ketebalan MEA berbanding terbalik dengan kinerja MEA, dimana semakin tipis MEA yang dibuat maka semakin baik kinerja yang dihasilkan oleh MEA tersebut. Pada penelitian ini, MEA dengan ketebalan $140\ \mu\text{m}$ menghasilkan kinerja terbaik. Pada kondisi tanpa resistansi, nilai tegangan tertinggi yang dihasilkan adalah $9800\ \mu\text{V}$. Setelah diberikan resistansi, nilai densitas arus tertinggi yang dihasilkan adalah $9,1\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ dan nilai densitas daya maksimum yaitu $12204\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Daftar Pustaka

- [1] De Oliveira-Assis, L., Garcia-Trivino, P., Soares-Ramos, E. P., Sarrias-Mena, R., Garcia-Vazquez, C. A., Ugalde-Loo, C. E. and Fernandez-Ramirez, L. M. (2021). Optimal Energy Management System Using Biogeography Based Optimization for Grid-Connected MVDC Microgrid with Photovoltaic, Hydrogen System, Electric Vehicles and Z-Source Converters. *Energy Convers Manag*, vol. 248.
- [2] Chen, Y., Lan, L., Hao, Z. and Fu, P. (2022). Cradle-Grave Energy Consumption, Greenhouse Gas and Acidification Emissions in Current and Future Fuel Cell Vehicles: Study based on five hydrogen production methods in China. *Energy Reports*, vol. 8, pp. 7931–7944.
- [3] Shi, H., Su, C., Ran, R., Cao, J. and Shao, Z. (2020). Electrolyte Materials for Intermediate-Temperature Solid Oxide Fuel Cells. *Progress in Natural Science: Material International*, 30, 764 – 774.
- [4] Hu, C., Zhao, Y., Zhang, Z., Zhang, H. and Chen, D. (2023). Optimization of Flow Field Structure for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack by Multi-Physics Coupling Simulation. *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 18, no. 7, 2023.
- [5] Huah, L. B., Majlan, E. H., Tajuddin, A., Husaini, T., Daud, W. R. W., Radzuan, N. A. M. and Haque, M. A. (2020). Comparison of Catalyst-Coated Membranes and Catalyst-Coated Substrate for PEMFC Membrane Electrode Assembly: A review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*.
- [6] Wang, K., Zhou, T., Cao, Z., Yuan, Z., He, H., Fan, M. and Jiang, Z. (2023). Advanced 3D Ordered Electrodes for PEMFC Applications: From Structural Features and Fabrication Methods to the Controllable Design of Catalyst Layers. *Green Energy & Environment*.
- [7] Squadrito, G. (2018). Preparation of MEA. In *Fuel Cells and Hydrogen: From Fundamentals to Applied Research*, pp. 117–138.
- [8] Zucconi, A., Hack, J., Suter, T. A. M., Braglia, M., Shearing, P. R., Brett, D. J. L. and Rettie, A. J. E. (2023). In Situ X-Ray Imaging of HT-PEMFC Hot-Pressing Using Contrast Enhancement. *J Power Sources*, vol. 584.
- [9] Guaitolini, S. V. M. and Fardin, J. F. (2018). Fuel Cells: History (Short Remind), Principles of Operation, Main Features, and Applications. *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, vol. 2, pp. 123–150.
- [10] Zhang, J., Wu, J. and Zhang, H. (2013). PEM Fuel Cell Testing and Diagnosis. Newnes.
- [11] Kaur, G., Gates, B. D., Chhina, H., Taylor, A. K., Gautam, S., Schneider-Coppolino, M. and Duncan, K. L. (2022). Charge and Mass Transport and Modeling Principles in Proton-Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells. In *PEM Fuel Cells* (pp. 173-195).
- [12] Cho, H. J., Jang, H., Lim, S., Cho, E., Lim, T., Oh, I., Kim, H. and Jang, J. H. (2011). Development of a Novel Decal Transfer Process for Fabrication of High-Performance and Reliable Membrane Electrode Assemblies for PEMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 19, pp. 12465–12473.
- [13] Silva, R. A., Hashimoto, T., Thompson, G. E. and Rangel, C. M. (2012). Characterization of MEA Degradation for an Open Air Cathode PEM Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, pp, 7299–7308.

	<p>Pande Nyoman Agus Adnyana menyelesaikan studi S1 tahun 2024 Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bali.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi mengenai pabrikan MEA dari Proton Exchange Membrane Fuel cell.</p>	

	<p>Made Suarda menyelesaikan studi S1 tahun 1989 program studi Teknik Permesinan Kapal di Universitas ITS Surabaya, Jawa Timur. Kemudian menyelesaikan studi S2 tahun 2004 program studi Advanced Manufacturing Technology di University of South Australia, Adelaide dan menyelesaikan studi S3 tahun 2020 program studi ilmu teknik di Universitas Udayana, Bali.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah mengenai modelling dan simulasi planar mechanism using bondgraph. Analisis dinamika fluida pada pompa. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana.</p>	

	<p>Made Sucipta menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya pada tahun 1998, kemudian melanjutkan program S2 di Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya 2001, serta S3 di Shibaura Institute of Technology, Jepang 2007, dan Profesi di Universitas Udayana, Bali tahun 2020.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan fuel cell, penyimpanan energi, dan green energy. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana</p>	

	<p>Ketut Astawa menyelesaikan studi S1 tahun 1996 program studi Teknik Mesin di Universitas Udayana, Bali. Kemudian menyelesaikan studi S2 program studi teknik mesin tahun 2006 di Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi meliputi perencanaan ketel uap serta topik mengenai kolektor surya.</p>	

	<p>I Made Joni menyelesaikan studi program S1 di Universitas Padjadjaran tahun 1998. S2 di Jawaharlal Nehru University, New Delhi, India tahun 2000. Dan S3 di Hiroshima University Japan pada tahun 2011. Saat ini beliau bekerja pada Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah teknologi nanopartikel serta perkembangan baterai. Saat ini beliau bekerja pada departemen fisika, FMIPA Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Jawa Barat.</p>	