

Analisis Pengaruh Tekanan Kerja Anoda Terhadap Performa Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Leo Obed Dwikyra Sibarani, Made Sucipta, I Gede Putu Agus Suryawan
Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

PEMFC adalah perangkat konversi energi dari energi hidrogen menjadi energi listrik melalui proses elektrokimia. PEMFC menjadi salah satu teknologi yang dikembangkan dalam mengatasi permasalahan lingkungan dalam sektor transportasi yang dapat dimanfaatkan sebagai penggerak FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle). Sifat komponen-komponen penyusun PEMFC dan fluida reaktan merupakan faktor-faktor yang memengaruhi kerja dari PEMFC, yang salah satunya adalah tekanan kerja. Penelitian ini dilakukan untuk melakukan penelitian terhadap kinerja dan fenomena aliran dalam PEMFC pada berbagai tekanan kerja anoda dengan nilai beban yang sama sebesar 1 A. Hasil dari penelitian ini menunjukkan performa yang lebih baik pada PEMFC dengan tekanan kerja anoda yang semakin besar. Selain itu, pada tekanan kerja yang lebih tinggi terjadi peningkatan persebaran reaktan pada MEA dan meningkatkan reaksi yang terjadi pada katoda yang ditunjukkan dengan semakin banyaknya produksi air pada sisi katoda.

Kata kunci: PEMFC, tekanan

Abstract

PEMFC is a device for converting energy from hydrogen energy into electrical energy through an electrochemical process. PEMFC is one of the technologies developed in overcoming environmental problems in the transportation sector that can be used as a driver of FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle). The properties of the constituent components of PEMFC and reactant fluids are factors that affect the work of PEMFC, one of which is working pressure. This study was conducted to conduct research on the performance and flow phenomenon in PEMFC at various anode working pressures with the same load value of 1 A. The results of this study showed better performance in PEMFC with greater anode working pressure. In addition, at higher working pressures there is an increase in the distribution of reactants in MEA and an increase in reactions that occur at the cathode as indicated by the increasing production of water on the cathode side.

Keywords: PEMFC, pressure

1. Pendahuluan

Sektor transportasi merupakan kontributor gas emisi rumah kaca yang besar di dunia, sehingga perubahan yang signifikan menuju keberlanjutan dalam sektor transportasi seperti kendaraan berbasis listrik sangat penting untuk dilakukan [1]. Hingga pada saat ini terdapat beberapa jenis kendaraan listrik yang berkembang, yaitu kendaraan listrik berbasis baterai, kendaraan listrik *hybrid*, dan kendaraan listrik berbasis *fuel cell*.

Kendaraan listrik berbasis *fuel cell* (FCEV) adalah kendaraan yang menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar utamanya dan merupakan salah satu pilihan utama untuk digunakan sebagai alternatif kendaraan konvensional di masa depan [2]. Dalam pengoperasiannya, FCEV menggunakan *fuel cell* yang pada umumnya adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) untuk mengkonversi hidrogen menjadi energi listrik.

PEMFC merupakan perangkat konversi energi yang memanfaatkan energi dari hidrogen menjadi energi listrik melalui reaksi elektrokimia [3]. PEMFC tersusun dari komponen-komponen berupa *bipolar plate*, *gas diffusion layer*, *catalyst layer*, dan membran [4]. Sifat-sifat fluida dan komponen penyusun PEMFC menjadi faktor yang mempengaruhi

kemampuan kerja dari PEMFC yang salah satunya adalah tekanan.

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah metode numerik yang digunakan untuk memecahkan dan menganalisis masalah yang melibatkan aliran fluida. Dengan bantuan CFD, fenomena-fenomena yang terjadi dalam fluida dapat dianalisa secara mendalam yang dimana hal ini tidak dapat dilakukan dengan cara eksperimental.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada PEMFC dan performanya dengan variasi tekanan kerja pada anoda dengan pembebanan yang sama. Untuk mengetahui performa dan fenomena aliran pada PEMFC, maka dalam penelitian ini akan digunakan metode simulasi CFD.

Dalam hal ini maka ada beberapa permasalahan yang akan dikaji, yaitu:

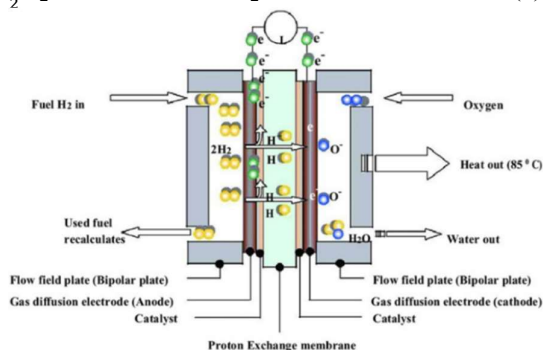
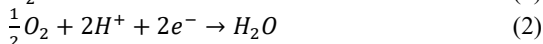
1. Bagaimana pengaruh tekanan kerja anoda terhadap fenomena aliran yang terjadi pada PEMFC?
2. Bagaimana pengaruh tekanan kerja terhadap performa kerja PEMFC?

Beberapa batasan ditetapkan dalam penelitian ini meliputi:

1. Penelitian ini tidak dilakukan pada keseluruhan PEMFC, tetapi hanya terhadap satu jalur aliran PEMFC.
2. Penelitian ini tidak melibatkan perubahan fasa.

2. Dasar Teori

PEMFC adalah perangkat yang berfungsi untuk menghasilkan listrik melalui proses reaksi elektrokimia [5]. PEMFC memanfaatkan hidrogen dan oksigen yang pada biasanya diperoleh dari udara lingkungan pada lingkungan. Proses kerja pada PEMFC melibatkan reaksi redoks pada hidrogen (anoda) dan oksigen (katoda) seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses Kerja dan Komponen Fuel Cell

Elektron yang dihasilkan pada anoda melalui reaksi pada anoda akan berpindah menuju elektroda melalui sirkuit, sementara ion hidrogen mengalir menuju katoda melalui membran yang berfungsi sebagai pemisah anoda dan katoda dan untuk mendistribusikan proton [6]. Elektron dan ion hidrogen yang sampai menuju katoda kemudian akan bereaksi dengan oksigen dan menghasilkan listrik, air, dan panas.

Karakteristik PEMFC ditunjukkan melalui grafik densitas arus (i) dan tegangan (V/i) dari PEMFC tersebut. Karakteristik grafik V/i pada PEMFC merupakan hasil dari adanya energi yang hilang pada operasi fuel cell yang berakibat pada turunnya tegangan PEMFC [7]. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil nilai tegangan PEMFC, maka semakin besar losses yang dialami.

Pada simulasi PEMFC menggunakan bantuan software CFD terdapat persamaan pembangun yang digunakan pada tiap komponen PEMFC [8] sebagai berikut.

- Kekalkan Massa

$$\frac{\partial(\epsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\rho\vec{V}) = S_m \quad (3)$$

- Kekalkan Momentum

$$\frac{\partial(\epsilon\rho\vec{V})}{\partial t} + W_k \nabla \cdot (\epsilon\rho\vec{V}\vec{V}) = -\epsilon\nabla P + \epsilon\mu\nabla^2\vec{V} + S_M \quad (4)$$

- Kekalkan Spesies

$$\frac{\partial(\epsilon\rho W_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\rho W_k\vec{V}) = -\nabla \cdot [D_k\nabla(\rho W_k)] + S_k \quad (5)$$

- Kekalkan Energi

$$\frac{\partial(\epsilon\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\rho C_p T\vec{V}) = \nabla \cdot (k\nabla T) + S_E \quad (6)$$

- Kekalkan Muatan Listrik

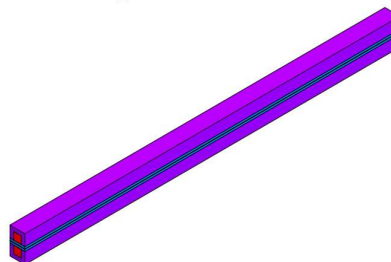
$$-\nabla \cdot (\sigma_e \nabla \Phi_e) = S_e \quad (7)$$

- Kekalkan Muatan Ionik

$$-\nabla \cdot (\sigma_i \nabla \Phi_i) = S_i \quad (8)$$

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode simulasi CFD menggunakan *software* Ansys 2021 R2. Gambar 2 dan tabel 1 secara berturut menunjukkan geometri dan dimensi yang digunakan dalam melakukan penelitian ini.



Gambar 2. Geometri PEMFC

Tabel 1. Dimensi PEMFC

Panjang	:	48 mm
Lebar	:	2 mm
Tinggi <i>Flow Channel</i>	:	1 mm
Lebar <i>Flow Channel</i>	:	1 mm
Tinggi <i>Bipolar Plate</i>	:	1,5 mm
Tinggi <i>Gas Diffusion Layer</i>	:	0,25 mm
Tinggi <i>Catalyst Layer</i>	:	0,016 mm
Tinggi membran	:	0,025 mm

Penelitian ini akan dilakukan dengan memvariasikan tekanan anoda pada PEMFC sebesar 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; dan 3 bar pada pembebanan yang sama sebesar 1 A. Tabel 2 menunjukkan nilai parameter fisik dan elektrokimia yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 2. Parameter Fisik dan Elektrokimia [4]. [9]

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Anode exchange coefficient</i>	0,5	-
<i>Cathode exchange coefficient</i>	1	-
<i>Anode concentration exponent</i>	0,5	-
<i>Cathode concentration exponent</i>	1	-
Porositas GDL	0,78	-
Porositas <i>catalyst layer</i>	0,5	-
<i>Membrane equivalent weight</i>	1100	kg/mol
Rasio luas permukaan terhadap volume	62500	1/m

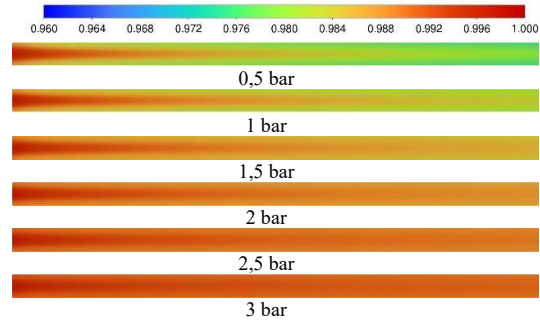
<i>catalyst layer</i> anode dan katode			
Fraksi mol <i>inlet</i> anode	Fraksi mol hidrogen (H ₂)	1	-
	Fraksi mol oksigen (O ₂)	0	-
	Fraksi mol air (H ₂ O)	0	-
	Fraksi mol nitrogen (N ₂)	0	-
Fraksi mol <i>inlet</i> katode	Fraksi mol hidrogen (H ₂)	0	-
	Fraksi mol oksigen (O ₂)	0,2075	-
	Fraksi mol air (H ₂ O)	0,0119	-
	Fraksi mol nitrogen (N ₂)	0,7806	-
Tekanan <i>outlet</i> katode (<i>gauge pressure</i>)	0	bar	
Laju massa <i>inlet</i> anode	3,9175 x 10 ⁻⁷	kg/s	
Laju massa <i>inlet</i> katode	2,0728 x 10 ⁻⁵	kg/s	
Temperatur <i>inlet</i> anode	300,15	K	
Temperatur <i>inlet</i> katode	300,15	K	

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Persebaran Hidrogen

Dari hasil pengujian maka didapatkan hasil bahwa pada MEA terjadi persebaran hidrogen yang lebih pada PEMFC dengan tekanan kerja anoda sebesar 3 bar. Hal ini dikarenakan sifat tekanan pada

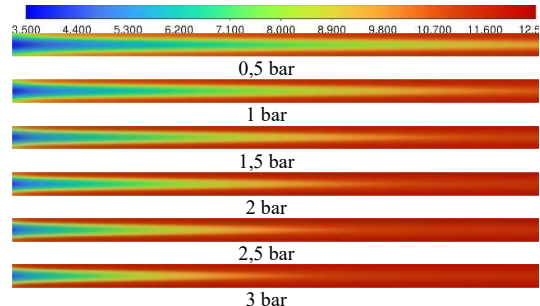
fluida menekan ke segala arah sehingga mengakibatkan hidrogen memiliki gaya yang lebih besar untuk dapat masuk ke MEA. Gambar 3 menunjukkan persebaran hidrogen pada MEA dengan tekanan anoda.



Gambar 3. Persebaran Hidrogen pada MEA

4.2. Kandungan Air Membran

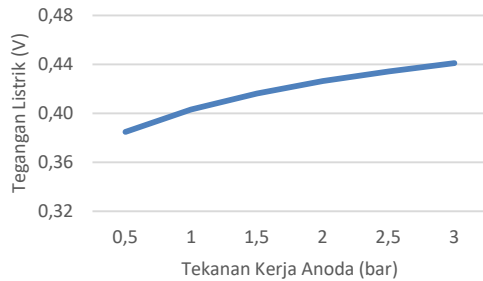
Air merupakan produk yang dihasilkan dari reaksi hidrogen dan oksigen. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pada tekanan kerja anoda yang lebih tinggi menghasilkan lebih banyak air pada katoda. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan tekanan kerja anoda mampu meningkatkan reaksi pada PEMFC sehingga mampu meningkatkan performa PEMFC tersebut. Gambar 4 menunjukkan kandungan air pada membran di sisi katoda pada masing-masing variasi tekanan. Pada gambar ditunjukkan bahwa pada tekanan yang lebih tinggi, maka air yang terbentuk akan semakin banyak pada awal masuk reaktan.



Gambar 4. Kontur Persebaran Air pada Membran

4.3. Tegangan Listrik Kerja PEMFC

Peningkatan persebaran hidrogen pada anoda mengakibatkan semakin besarnya reaksi yang terjadi pada PEMFC. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin besar tekanan kerja anoda maka akan semakin rendah nilai tegangan kerja dari PEMFC. Hal ini berarti pada tekanan kerja yang lebih tinggi, maka semakin kecil nilai *losses* yang dialami oleh PEMFC. Gambar 5 menunjukkan nilai tegangan kerja PEMFC pada masing-masing variasi tekanan kerja.



Gambar 5. Grafik Tegangan Kerja PEMFC

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh tekanan anoda pada performa PEMFC.

1. Tekanan kerja anoda yang semakin tinggi meningkatkan persebaran hidrogen pada MEA.
2. Tekanan kerja anoda yang semakin tinggi meningkatkan reaksi yang terjadi pada PEMFC yang ditunjukkan oleh peningkatan produksi air pada katoda.
3. Peningkatan persebaran hidrogen dan produksi air pada PEMFC mampu meningkatkan performa PEMFC yang ditandai dengan mengecilnya nilai *losses* pada PEMFC.

Daftar Pustaka

- [1] I. Veza, M. Z. Asy'ari, M. Idris, V. Epin, I. M. Rizwanul Fattah, and M. Spraggon, “*Electric vehicle (EV) and driving towards sustainability: Comparison between EV, HEV, PHEV, and ICE vehicles to achieve net zero emissions by 2050 from EV*,” Alexandria Engineering Journal, vol. 82, pp. 459–467, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.10.020.
- [2] G. Di Pierro, E. Bitsanis, A. Tansini, C. Bonato, G. Martini, and G. Fontaras, “*Fuel Cell Electric Vehicle Characterisation under Laboratory and In-use Operation*,” Energy Reports, vol. 11, pp. 611–623, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2023.12.013.
- [3] Z. Liu, L. Sun, W. Zhu, Y. Li, H. Pei, and L. Xing, “*Investigation of the current density's non-uniform distribution in dead-end PEMFC with multi-zone measurement methods*,” Energy Conversion and Management: X, vol. 20, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100478.
- [4] Y. Wei, L. Xu, Y. Li, and J. Tan, “*Better Electrochemical Performance of PEMFC with a Symmetrical Serpentine Flow Field Bipolar Plate*,” Int J Electrochem Sci, vol. 17, 2022, doi: 10.20964/2022.12.20.
- [5] G. Reza Molaeimanesh and F. Torabi, “*Fuel Cell Modeling and Simulation: From Microscale to Macroscale*,” 2023.
- [6] M. Sucipta et al., “*Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Membrane*

Electrode Assembly Based on Platinum-Carbon Electrocatalyst with Activated Carbon-Chitosan-Nickel,” 2023.

- [7] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, and A. Emadi, “*Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*.”
- [8] J. P. Kone, X. Zhang, Y. Yan, G. Hu, and G. Ahmadi, “*Three-dimensional multiphase flow computational fluid dynamics models for proton exchange membrane fuel cell: A theoretical development*,” Journal of Computational Multiphase Flows, vol. 9, no. 1, pp. 3–25, Mar. 2017, doi: 10.1177/1757482X17692341.
- [9] A. D'Adamo, M. Riccardi, M. Borghi, and S. Fontanesi, “*CFD modelling of a hydrogen/air PEM fuel cell with a serpentine gas distributor*,” Processes, vol. 9, no. 3, Mar. 2021, doi: 10.3390/pr9030564.



Leo Obed Dwikyra Sibarani menempuh studi S1 di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, pada tahun 2020, yang memiliki minat bidang ilmu *Computer Aided Design (CAD)*, *Computer Aided Manufacturing (CAM)*, dan *Computer Aided Engineering (CAE)*.

Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan *Computational Fluid Dynamics*.



Made Sucipta menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 1998, melanjutkan pendidikan S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan menyelesaikan studi pada tahun 2001, dan melanjutkan studi S3 di Shibaura Institute of Technology. Made Sucipta memiliki konsentrasi ilmu dalam teknologi hidrogen.



I Gede Putu Agus Suryawan menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun 1994, S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2001, dan S3 di Universitas Udayana pada tahun 2020. I Gede Putu Agus Suryawan memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang komposit.