

Performance Analysis of Doublecell PEMFC with Series and Parallel Oxygen Flow Variations on Power Density

[Analisa Performa Doublecell PEMFC dengan Variasi Aliran Oksigen Seri dan Paralel terhadap Power Density]

Saarah Salsabila¹⁾, A'rasy Fahrudin ^{*,2)}, Rachmat Firdaus³⁾, Mulyadi⁴⁾

¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

³⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

⁴⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

arasyfahrudin@umsida.ac.id

Abstract. PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) is an electrochemical energy conversion technology that converts hydrogen-oxygen reactions into electrical power through a proton-conducting polymer membrane. This study analyzed the performance of a double-cell PEMFC with varying oxygen flow rates in series and parallel configurations against power density at a flow rate of 0.4 mL/min. The results showed that the series configuration produced higher peak power (5,069 W/dm²) than the parallel configuration (4,877 W/dm²), although the difference was not significant. The parallel configuration excelled at low current densities with higher initial voltages, while the series configuration was more stable at medium-high current densities. Therefore, the series configuration was more effective at low oxygen flows because the gradual oxygen distribution reduced concentration polarization, while the parallel configuration was suitable for low-load operation with optimal initial response..

Keywords – PEMFC; Doublecell; Parallel; Series

Abstrak. PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) merupakan teknologi konversi energi elektrokimia yang mengubah reaksi hidrogen-oksigen menjadi daya listrik melalui membran polimer penghantar proton. Penelitian ini menganalisis performa double-cell PEMFC dengan variasi aliran oksigen dalam konfigurasi seri dan paralel terhadap power density pada laju alir 0,4 mL/min. Hasil menunjukkan bahwa konfigurasi seri menghasilkan daya puncak lebih tinggi (5,069 W/dm²) dibandingkan paralel (4,877 W/dm²), meskipun perbedaannya tidak signifikan. Konfigurasi paralel unggul pada kerapatan arus rendah dengan tegangan awal lebih tinggi, sementara seri lebih stabil pada kerapatan arus menengah-tinggi. Dengan demikian, konfigurasi seri lebih efektif pada aliran oksigen rendah karena distribusi oksigen bertahap mengurangi polarisasi konsentrasi, sedangkan paralel cocok untuk operasi beban rendah dengan respons awal optimal.

Kata Kunci – PEMFC; Doublecell; Paralel; Seri

I. PENDAHULUAN

Perkembangan industri dan pertambahan jumlah penduduk secara tahunan menyebabkan permintaan energi yang semakin besar. Sampai saat ini, mayoritas kebutuhan energi masih pasok dari sumber energi fosil yang harganya relatif terjangkau dan mudah didapat, namun menimbulkan efek buruk bagi lingkungan dan kesehatan. Pelepasan gas rumah kaca dari pembakaran bahan bakar fosil merupakan faktor utama yang memicu perubahan iklim, pemanasan global, serta polusi udara. Di sisi lain, cadangan energi fosil juga terbatas dan tidak dapat diperbarui, sehingga ketergantungan berlebihan terhadapnya berpotensi membahayakan stabilitas pasokan energi pada masa depan. Melihat persoalan tersebut, energi terbarukan dan energi hijau dipandang sebagai alternatif solusi yang tepat [1]. Upaya ini sejalan dengan komitmen Indonesia dalam mewujudkan Net Zero Emission (NZE) pada tahun 2060.

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) adalah sebuah teknologi yang berpotensi menekan emisi gas buang serta mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil [2], [3]. Prinsip kerja PEMFC adalah mengonversi energi kimia dari reaksi hidrogen dan oksigen menjadi energi listrik dengan memanfaatkan membran elektrolit polimer (khususnya Nafion) untuk menghantarkan proton serta katalis elektrokimia berbasis platinum guna mempercepat reaksi pada suhu rendah [4]. Keunggulan utama PEMFC mencakup efisiensi energi yang tinggi, kepadatan daya yang besar, tidak menghasilkan polusi, nol emisi karbon, dan kemampuan beroperasi pada suhu rendah berkisar antara 30 °C hingga 80 °C [5], [6], [7]. Berkat keunggulan-keunggulan tersebut, PEMFC memiliki peluang aplikasi yang sangat luas, mulai dari perangkat elektronik, kendaraan, sumber listrik portabel, pembangkit listrik, hingga penggunaan di bidang militer [8], [9], [10], [11].

Membran *fuel cell* yang umum digunakan saat ini memiliki luas area berkisar antara 25 cm² hingga 50 cm². Namun, kemampuan setiap membran dalam menghasilkan tegangan dan arus terbatas. Untuk meningkatkan efisiensi dan kepadatan daya, beberapa membran PEMFC perlu digabungkan menjadi rangkaian multi-stack [12]. Pada rangkaian *multi-stack* ini, aliran oksigen dapat dikonfigurasi dalam dua susunan utama, yaitu seri dan paralel. Pada katoda terbuka PEMFC, susunan seri menunjukkan performa yang lebih baik serta lebih hemat biaya, sehingga cocok untuk memperpanjang masa pakai *stack* yang mengalami degradasi [13].

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa distribusi oksigen menggunakan desain aliran biomimetik dapat meningkatkan kepadatan daya hingga 22% [14]. Namun, penelitian desain aliran biomimetik berbentuk daun tersebut masih terbatas pada konfigurasi *single stack* dan belum ada kajian lebih lanjut yang menerapkannya pada konfigurasi *multi-stack*. Dari latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kepadatan daya pada konfigurasi 1 *stack* dengan desain aliran biomimetik berbentuk daun, baik yang disusun secara seri maupun paralel.

II. METODE



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

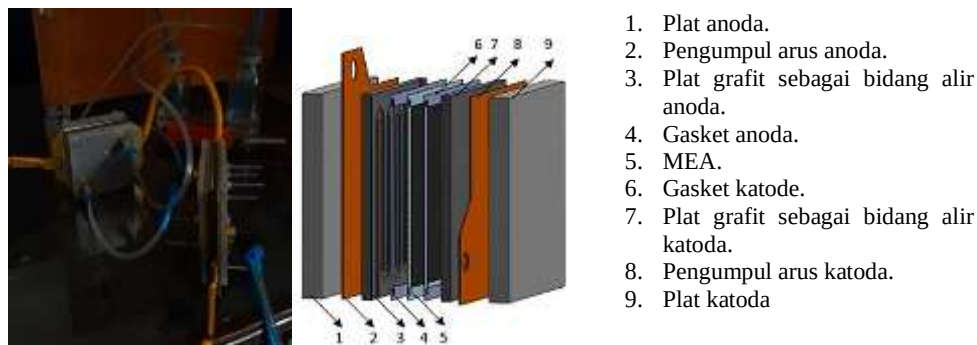
Dalam penelitian ini terdapat 2 buah *stacks* PEMFC yang masing-masing terdiri dari 1 buah MEA (*Membrane Electrode Assembly*) dengan luasan 25 cm². Adapun spesifikasi dari MEA seperti yang tertera pada Tabel 1. Pada tiap *stack* nya terdiri atas 2 plat kuningan dengan tebal 3 cm yang berguna sebagai pengumpul arus baik pada bagian katoda maupun anoda, gasket dari bahan teflon dan silikon untuk mencegah kebocoran gas, dan 2 bidang alir berbahan plat

grafit pada bagian katoda dan anoda dengan ketebalan 5 cm. Untuk bidang alir pada bagian katoda menggunakan bentuk daun, sedangkan pada bagian anoda menggunakan bentuk *serpentine*.

Tabel 1. Spesifikasi MEA (*Membrane Electrode Assembly*)

Komponen	Keterangan
Katalis anoda dan katoda	0.5mg/cm ² ; 60 wt% Pt, on Carbon Vulcan
Membran	Nafion NR-212; 50,8 µm
Lapisan difusi gas	Woven carbon fibre cloth; 0.410mm

Desain bidang aliran gas pada anoda terdiri dari satu serpentin yang bertujuan untuk memastikan hidrogen bereaksi secara sempurna. Pada bidang alir katoda, saluran cabang memiliki lebar 1,25 mm dengan kedalaman 1 mm. Adapun reaksi kimia yang terjadi baik di sisi anoda (hidrogen) maupun katoda (oksigen) adalah sebagai berikut:



Gambar 2. Konfigurasi dari Satu *Stack* PEMFC



a. Bidang Alir Bentuk Daun



b. Bidang Alir Bentuk *Serpentine*

Gambar 3. Bidang Alir

Hidrogen dialirkan pada bidang alir anoda dengan debit 150 mL/menit pada 1 atm. Sementara oksigen dialirkan pada sisi katoda pada tekanan 1 atm dengan variasi debit 0,2 mL/min, 0,4 mL/min, 0,6 mL/min, dan 0,8 mL/min untuk mengidentifikasi kondisi optimal. Setiap variasi diuji dalam kondisi operasi yang terkontrol, meliputi suhu, kelembaban, dan laju aliran hidrogen.

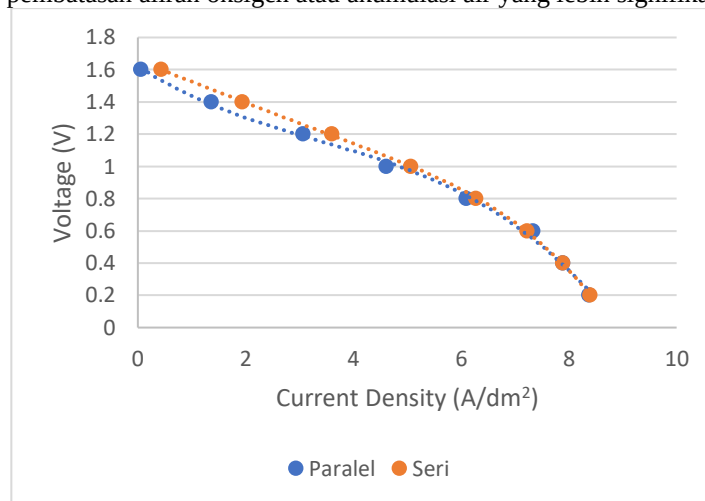
Selama penelitian terdapat 2 konfigurasi aliran yang digunakan, yaitu konfigurasi seri atau paralel. Pada setiap konfigurasi dilakukan pengujian menggunakan voltase konstan dengan variasi 0,2 V, 0,4 V, 0,6 V, 0,8 V, 1 V, 1,2 V, 1,4 V, dan 1,6 V. Pengambilan data sendiri menggunakan Rigol programable DC *electronic load*. Pengujian variasi aliran dilakukan untuk menganalisis pengaruh perbedaan konfigurasi aliran oksigen terhadap kinerja *double cell* PEMFC, khususnya dalam hal *power density*, *current density*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Grafik Tegangan-Rapat Arus pada Laju Alir Oksigen 0,4 mL/min

Berdasarkan grafik hubungan tegangan (*voltage*) dan kerapatan arus (*current density*) pada laju alir oksigen 0,4 mL/min, dapat diamati bahwa konfigurasi seri menunjukkan performa yang lebih unggul dibandingkan konfigurasi paralel. Pada tegangan tinggi (1,6 V) kerapatan arus paralel 0,058 A/dm² sedangkan pada konfigurasi seri berada pada angka 0,42 A/dm². Seiring peningkatan kerapatan arus, kedua konfigurasi mengalami penurunan tegangan yang merupakan ciri dari polarisasi dalam *fuel cell*, namun penurunan pada konfigurasi paralel berlangsung lebih landai.

Konfigurasi seri justru mengalami penurunan tegangan yang lebih curam setelah kerapatan arus melebihi 5 A/dm², menunjukkan terjadinya pembatasan aliran oksigen atau akumulasi air yang lebih signifikan pada saluran seri.

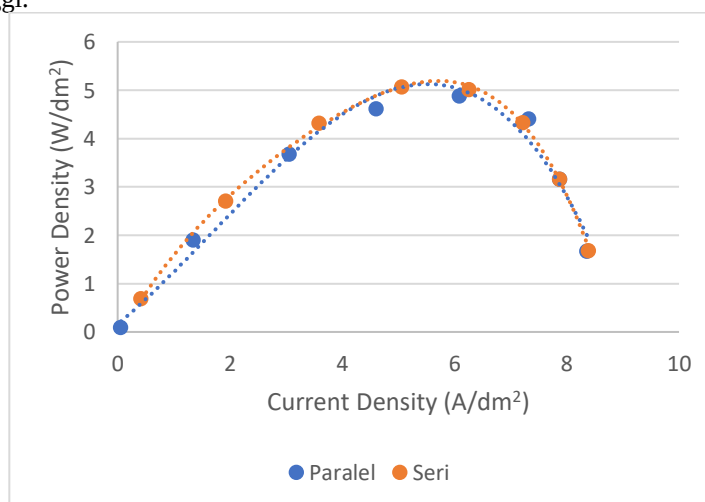


Gambar 4. Grafik Tegangan-Current Density Konfigurasi Paralel dan Seri pada 0,4 slpm

Penurunan tegangan pada konfigurasi paralel lebih landai tetapi konsisten, sementara konfigurasi seri mengalami penurunan lebih curam di awal, tetapi ketika rapat arus diatas 6 A/dm² tidak terdapat perbedaan yang signifikan baik dari konfigurasi paralel maupun konfigurasi seri. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi arus tinggi dengan laju alir rendah, konfigurasi seri memiliki keunggulan dalam manajemen air atau efisiensi utilisasi oksigen secara bertahap, sehingga mengurangi efek polarisasi konsentrasi di selanjutnya. Kemungkinan, aliran oksigen dalam konfigurasi seri mengalami peningkatan tekanan parsial atau aliran lebih terarah yang mendukung reaksi pada beban tinggi, meskipun di awal tampak kurang responsif.

B. Grafik Power Density-Rapat Arus pada Laju Alir Oksigen 0,4 mL/min

Berdasarkan Gambar 5 yang menunjukkan hubungan antara *power density* dan *current density* pada laju alir oksigen 0,4 mL/min, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi seri menghasilkan kinerja yang sedikit lebih baik jika dibandingkan dengan konfigurasi paralel. Meskipun perbedaan antar kedua konfigurasi tidak signifikan, nilai daya puncak (*maximum power density*) pada konfigurasi seri tercatat sebesar 5,069 W/dm², sementara konfigurasi paralel mencapai 4,877 W/dm². Hal ini menunjukkan bahwa pada laju alir oksigen rendah, konfigurasi seri mampu memanfaatkan aliran oksigen secara lebih efektif untuk menghasilkan daya yang lebih tinggi. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui karakteristik aliran dalam konfigurasi seri yang memungkinkan distribusi tekanan dan konsentrasi oksigen yang lebih terkendali di sepanjang saluran sel, sehingga mengurangi kehilangan akibat polarisasi konsentrasi pada kerapatan arus tinggi.



Gambar 5. Grafik Power Density-Current Density Konfigurasi Paralel dan Seri pada 0,4 slpm

Di sisi lain, konfigurasi paralel meskipun unggul dalam distribusi oksigen yang merata pada awal operasi, namun pada kondisi beban tinggi dengan suplai oksigen terbatas, justru dapat mengalami pembatasan aliran yang lebih cepat. Dengan demikian, hasil ini mengindikasikan bahwa dalam aplikasi *double-cell* PEMFC dengan laju alir oksigen rendah, konfigurasi seri memberikan efisiensi konversi energi yang sedikit lebih optimal, meskipun secara umum kedua konfigurasi masih menunjukkan performa yang kompetitif dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan operasional sistem.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan analisis dua grafik performa *double-cell* PEMFC pada laju alir oksigen 0,4 mL/min, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi seri menunjukkan kinerja yang sedikit lebih unggul dibandingkan konfigurasi paralel, meskipun perbedaannya tidak signifikan. Dari grafik *voltage-current density*, konfigurasi paralel unggul pada kerapatan arus rendah dengan tegangan awal yang lebih tinggi, namun konfigurasi seri mampu mempertahankan tegangan lebih baik pada rentang kerapatan arus menengah hingga tinggi. Keunggulan ini tercermin dalam grafik *power density-current density*, di mana konfigurasi seri menghasilkan daya puncak 5,069 W/dm², sedikit lebih tinggi dibandingkan konfigurasi paralel yang mencapai 4,877 W/dm². Hal ini mengindikasikan bahwa pada kondisi suplai oksigen rendah, konfigurasi seri memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mengelola polarisasi konsentrasi dan mempertahankan efisiensi konversi energi di bawah beban tinggi. Dengan demikian, pemilihan konfigurasi aliran oksigen dapat dioptimalkan sesuai rentang operasi yang diinginkan, di mana konfigurasi seri lebih sesuai untuk aplikasi dengan variasi beban menengah hingga tinggi, sementara konfigurasi paralel dapat dipertimbangkan untuk operasi pada beban rendah yang memerlukan respons awal yang baik.

REFERENSI

- [1] E. T. Sayed *et al.*, "Renewable Energy and Energy Storage Systems," Feb. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16031415.
- [2] B. Xie *et al.*, "Validation methodology for PEM fuel cell three-dimensional simulation," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 189, p. 122705, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122705.
- [3] L. Ge *et al.*, "A review of hydrogen generation, storage, and applications in power system," *J. Energy Storage*, vol. 75, p. 109307, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.109307.
- [4] Y. Wang, D. F. Ruiz Diaz, K. S. Chen, Z. Wang, and X. C. Adroher, "Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review," Jan. 01, 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.mattod.2019.06.005.
- [5] A. Saco, P. S. Sundari, J. Karthikeyan, and A. Paul, "An Optimized Data Analysis on a Real-Time Application of PEM Fuel Cell Design by Using Machine Learning Algorithms," *Algorithms*, vol. 15, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.3390/a15100346.
- [6] Y. Sayan, "Investigating the impact of inverted-trapezoidal cross-section flow channels on the performance of a proton exchange membrane fuel cell with a parallel flow channel configuration," *Renew. Energy*, vol. 256, p. 124001, Jan. 2026, doi: 10.1016/J.RENENE.2025.124001.
- [7] Y. Yu, M. Chen, S. Zaman, S. Xing, M. Wang, and H. Wang, "Thermal management system for liquid-cooling PEMFC stack: From primary configuration to system control strategy," *eTransportation*, vol. 12, p. 100165, May 2022, doi: 10.1016/J.ETTRAN.2022.100165.
- [8] A. Fahrudin, D. Ichsan, and F. Taufany, "Improving PEM fuel cell performance using in-line triangular baffles in triple serpentine flow field," in *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, Sep. 2018. doi: 10.1051/mateconf/201819708010.
- [9] F. Xie *et al.*, "Recent progresses in H₂-PEMFC at DICP," Sep. 01, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jchem.2019.07.012.
- [10] M. M. Tellez-Cruz, J. Escorihuela, O. Solorza-Feria, and V. Compañ, "Proton exchange membrane fuel cells (Pemfcs): Advances and challenges," Sep. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/polym13183064.
- [11] N. Seselj, S. M. Alfaro, E. Bompolaki, L. N. Cleemann, T. Torres, and K. Azizi, "Catalyst Development for High-Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (HT-PEMFC) Applications," Oct. 05, 2023, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1002/adma.202302207.
- [12] C. Wang, Z. Mao, F. Bao, X. Li, and X. Xie, "Development and performance of 5 kw proton exchange membrane fuel cell stationary power system," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 30, no. 9, pp. 1031–1034, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.ijhydene.2004.11.010.
- [13] V. Natesan, R. Succoja, and Z. Li, "Optimization and Performance Evaluation of Open Cathode Multi-Stack PEM Fuel Cell Systems," *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pp. 1–5, 2024.

- [14] A. ' Rasy Fahrudin, D. Ichsani, F. Taufany, B. Utomo, and K. Widodo, "THE EFFECT OF CHANNEL WIDTH ON BIOMETRIC FLOW FIELD TOWARDS PERFORMANCE OF POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL," 2019.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.