

Analysis of the Effect of Oxygen Input Hole Diameter in a Double-Cell Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell on Power Density and Efficiency

[Analisa Pengaruh Diameter Lubang Input Oksigen pada Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Double Cell Terhadap Power density dan Efisiensi]

Syafa Vania Ulhaq¹⁾, A'rasy Fahrudin ^{*,2)}

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

²⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia
arasyfahrudin@umsida.ac.id

Abstract. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) is a clean energy technology with great potential as an environmentally friendly alternative energy source. One factor that influences its performance is the design of the gas flow system, especially the diameter of the oxygen input hole. This study aims to analyze the effect of variations in the diameter of the oxygen input hole in a double cell PEMFC on its power density and efficiency. The diameters tested were 4 mm, 6 mm, and 8 mm. The test was conducted by observing the relationship between voltage, current, current density, power density, and system efficiency. The results showed that variations in diameter had a significant effect on cell performance. A diameter of 4 mm produced the highest current, current density, and power density compared to other variations. This indicates that a smaller diameter is able to optimize oxygen supply and electrochemical reactions. Thus, a diameter of 4 mm is stated as the most optimal condition in improving the overall performance of the double cell PEMFC.*

Keywords – PEMFC, Diameter, Oxygen

Abstrak. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) merupakan teknologi energi bersih yang berpotensi besar sebagai sumber energi alternatif ramah lingkungan. Salah satu faktor yang memengaruhi kinerjanya adalah desain sistem aliran gas, terutama diameter lubang input oksigen. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi diameter lubang input oksigen pada PEMFC double cell terhadap power density dan efisiensinya. Diameter yang diuji adalah 4 mm, 6 mm, dan 8 mm. Pengujian dilakukan dengan mengamati hubungan antara tegangan, arus, current density, power density, serta efisiensi sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi diameter memberikan pengaruh signifikan terhadap performa sel. Diameter 4 mm menghasilkan arus, current density, dan power density tertinggi dibandingkan variasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa diameter lebih kecil mampu mengoptimalkan suplai oksigen dan reaksi elektrokimia. Dengan demikian, diameter 4 mm dinyatakan sebagai kondisi paling optimal dalam meningkatkan kinerja PEMFC double cell secara keseluruhan.*

Kata Kunci - PEMFC, Diameter, Oksigen

I. PENDAHULUAN

Perubahan iklim dan kebutuhan energi yang semakin meningkat mendorong pencarian teknologi energi bersih yang efisien[1]. Permintaan akan sumber energi yang bersih, efisien dan berkelanjutan terus meningkat seiring dengan semakin menipisnya cadangan energi fosil dan meningkatnya perhatian terhadap dampak lingkungan. Salah satu teknologi yang berpotensi besar untuk mendukung pengembangan energi alternatif adalah Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)[2][3][4][5]. Fuel cell telah diidentifikasi sebagai salah satu teknologi energi masa depan karena kemampuannya mengonversi energi kimia menjadi listrik dengan efisiensi tinggi dan emisi rendah jika dibandingkan dengan mesin pembakaran internal tradisional[6]. Di antara berbagai jenis fuel cell, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) menonjol karena karakteristik operasinya pada suhu rendah (30–80 °C), respon dinamis yang cepat, serta aplikasi yang luas dalam kendaraan listrik dan sistem portabel. Power density dan efisiensi yang tinggi merupakan dua parameter kunci yang menentukan sejauh mana teknologi PEMFC dapat diterapkan secara komersial. PEMFC mampu secara langsung mengubah energi kimia hidrogen dan oksigen menjadi energi listrik dengan emisi yang sangat rendah. Oleh karena itu, banyak dikembangkan untuk aplikasi transportasi, pembangkit listrik bergerak, dan sistem energi terbarukan.

Kinerja PEMFC sangat dipengaruhi oleh proses reaksi elektrokimia yang terjadi di dalam sel, terutama pada sisi katoda yang terlibat dalam reaksi reduksi oksigen. Ketersediaan dan distribusi oksigen yang baik penting untuk reaksi

elektrokimia yang optimal. Salah satu parameter desain yang berperan penting dalam mengatur suplai dan distribusi oksigen adalah diameter lubang pemasukan oksigen pada sistem aliran gas atau pelat bipolar.

Variasi desain flow field telah banyak diteliti dalam literatur[7]. Beberapa studi menunjukkan bahwa modifikasi bentuk, lebar, dan tata letak flow field dapat meningkatkan distribusi oksigen dan manajemen air, sehingga mengurangi hambatan transport massa dan meningkatkan keluaran daya serta efisiensi keseluruhan sel [8][9][10]. Studi lain mengungkap bahwa optimasi geometri saluran membantu menyeimbangkan tekanan dan difusi oksigen sehingga terjadi peningkatan current density tanpa penalti tekanan yang besar [11] [12].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara eksperimental pengaruh variasi diameter lubang input oksigen terhadap karakteristik kinerja PEMFC double cell, terutama ditinjau dari current density, power density, dan efisiensi. Diameter lubang pemasukan oksigen secara langsung mempengaruhi laju aliran oksigen, hambatan aliran, dan efisiensi distribusi gas pada permukaan katalis[13]. Diameter yang terlalu kecil menyebabkan pasokan oksigen terbatas sehingga reaksi elektrokimia tidak berjalan optimal sehingga berdampak pada rapat arus dan rendahnya energi yang dihasilkan. Sebaliknya diameter yang terlalu besar dapat menyebabkan suplai oksigen berlebih sehingga tidak dapat digunakan sepenuhnya dalam reaksi sehingga peningkatan efisiensi tidak signifikan.

Berdasarkan data awal hasil pengujian dengan variasi diameter lubang umpan oksigen 4 mm, 6 mm dan 8 mm, diketahui bahwa variasi diameter mempunyai pengaruh yang nyata terhadap karakteristik kelistrikan PEMFC double cell, meliputi arus, rapat arus, dan rapat daya. Meskipun beberapa penelitian sebelumnya telah membahas desain saluran aliran dan distribusi gas pada PEMFC, namun studi eksperimental yang secara khusus membahas pengaruh diameter lubang masuk oksigen terhadap kepadatan daya dan efisiensi pada PEMFC Double cell masih terbatas.

Dengan fokus pada parameter geometris yang relatif sederhana tetapi berdampak besar terhadap performa sel, penelitian ini berkontribusi pada pemahaman lebih lanjut mengenai optimasi desain PEMFC. Temuan dari penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan untuk pengembangan desain flow field yang lebih efisien, sekaligus menjadi referensi ilmiah yang dapat digunakan dalam penelitian dan implementasi PEMFC di aplikasi nyata. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan desain PEMFC yang lebih optimal dan efisien.

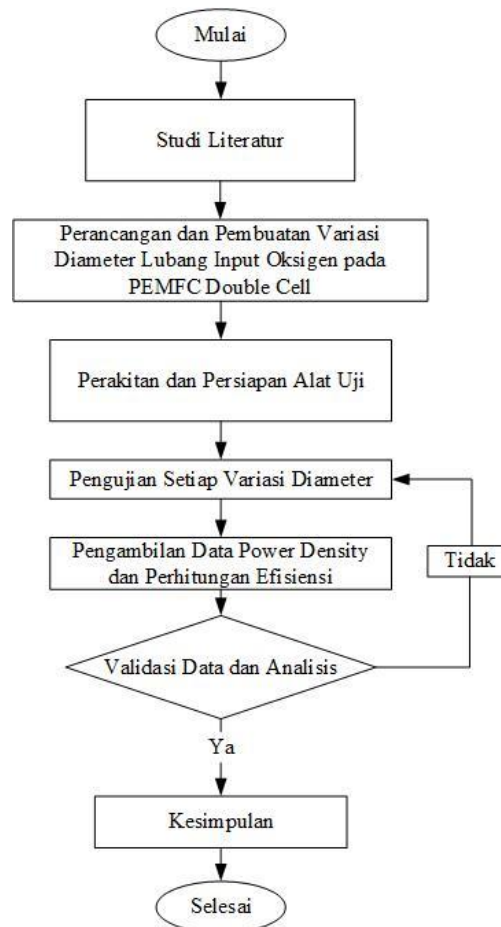
II. METODE

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode eksperimental untuk menganalisis pengaruh variasi diameter lubang input oksigen terhadap kinerja Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) double cell. Objek penelitian berupa PEMFC tipe double cell yang menggunakan membran elektrolit polimer Nafion NR-212 dengan luas area aktif sel dijaga tetap. Variasi yang diterapkan dalam penelitian ini adalah diameter lubang input oksigen pada sisi katoda, yaitu 4 mm, 6 mm, dan 8 mm. Variasi diameter tersebut dirancang untuk merepresentasikan kondisi suplai oksigen yang terbatas, menengah, hingga berlebih. Seluruh pengujian dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo.

Pada tahap persiapan, PEMFC dirakit dengan memastikan seluruh komponen terpasang dengan baik dan tidak terjadi kebocoran gas. Pelat katoda dengan variasi diameter lubang input oksigen dipasang secara bergantian sesuai dengan konfigurasi pengujian. Gas hidrogen dan oksigen disuplai ke dalam sel melalui sistem regulator dan flow meter. Selama pengujian, laju aliran gas, tekanan operasi, suhu, serta kelembapan reaktan dijaga konstan untuk memastikan bahwa perubahan kinerja yang terjadi hanya disebabkan oleh variasi diameter lubang input oksigen. Sebelum pengambilan data, PEMFC dioperasikan hingga mencapai kondisi stabil (steady state) untuk menjamin kestabilan reaksi elektrokimia. Setelah kondisi stabil tercapai, beban elektronik DC dihubungkan pada terminal keluaran sel bahan bakar. Beban divariasikan secara bertahap untuk memperoleh data tegangan dan arus pada berbagai kondisi pembebanan. Data tersebut dicatat secara sistematis untuk setiap variasi diameter lubang input oksigen.

Data hasil pengujian selanjutnya digunakan untuk menghitung arus, current density, power density, serta efisiensi PEMFC. Nilai current density diperoleh dari perbandingan antara arus yang dihasilkan dengan luas area aktif sel, sedangkan power density dihitung dari hasil perkalian arus dan tegangan yang dibagi dengan luas area aktif. Efisiensi ditentukan berdasarkan perbandingan antara daya listrik keluaran dengan energi kimia reaktan yang masuk ke dalam sistem.

Analisis data dilakukan secara komparatif dengan menyajikan kurva karakteristik tegangan–arus, tegangan–current density, serta hubungan antara power density dan current density. Perbandingan antar kurva digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi diameter lubang input oksigen terhadap kinerja PEMFC double cell. Dari hasil analisis tersebut ditentukan diameter lubang input oksigen yang menghasilkan kinerja paling optimal, ditinjau dari nilai power density maksimum dan efisiensi yang dicapai. Berikut merupakan diagram alir penelitian.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

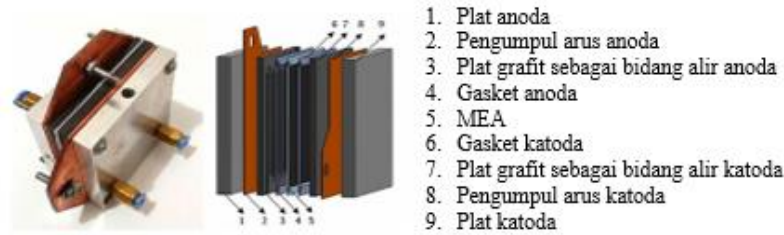
Dalam penelitian ini, dua stack PEMFC terdiri dari satu MEA (Membrane Electrode Assembly) dengan luasan 25 cm² masing-masing. Pada tiap stack terdiri dari dua plat kuningan dengan tebal 3mm yang berfungsi sebagai pengumpul arus baik pada bagian katoda maupun anoda, gasket yang terbuat dari teflon dan silikon untuk mencegah gas keluar, dan dua bidang alir berbahan plat grafit dengan ketebalan lima sentimeter pada bagian katoda dan anoda. Bidang alir katoda berbentuk daun dan anoda berbentuk serpentine. Berikut merupakan spesifikasi dari MEA yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Spesifikasi MEA (Membrane Electrode Assembly)

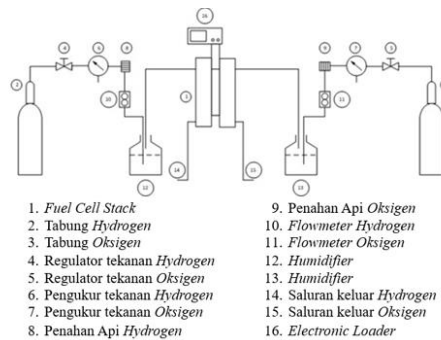
Component	Specification
Membrane	Nafion NR-212; 50,8 µm
Anode and Cathode Catalyst	0,5mg/cm ² ; 60wt%Pt, on Carbon Vulcan
Gas diffusion layer	Woven carbon fibre cloth; 0,410mm

Desain saluran gas di anoda menggunakan satu bentuk spiral yang bertujuan agar hidrogen bisa bereaksi dengan baik. Di bagian aliran katoda, saluran cabang memiliki lebar 1,25mm dan kedalaman 1mm. Berikut merupakan reaksi yang terjadi di katoda dan anoda hingga menghasilkan air.

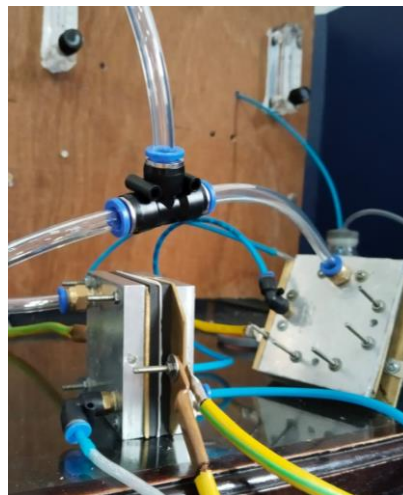
- Masuknya Hydrogen ke anoda
Di anoda, gas hidrogen dipecah oleh katalis menjadi ion H⁺ (proton) dan elektron (e⁻)
Reaksi yang terjadi yakni $H_2 = 2H^+ + 2e^-$
- Aliran elektron ke Luar (Menghasilkan Listrik)
Elektron tidak bisa melewati elektrolit sehingga mengalir melalui sirkuit luar dan menghasilkan listrik
- Perpindahan proton H⁺ lewat elektrolit
Proton H⁺ bergerak melalui elektrolit menuju katoda
- Masuknya oksigen O₂ ke katoda
Di katoda, oksigen bereaksi dengan proton H⁺ dan elektron e⁻ untuk membentuk air
Reaksinya yakni: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$



Gambar 2. Penjabaran Alat pada Satu Stack PEMFC



Gambar 3. Skema Rangkaian Pengujian



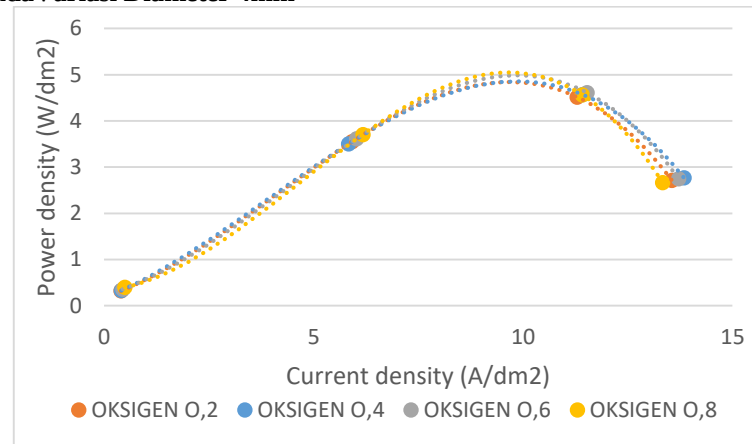
Gambar 4. Pengujian Variasi

Pada sisi anoda, gas hidrogen dialirkan melalui bidang alir anoda dengan laju aliran tetap sebesar 150 mL/menit pada tekanan operasi 1 atm. Sementara itu, pada sisi katoda, gas oksigen dialirkan dengan tekanan yang sama, yaitu 1 atm, namun dengan variasi laju aliran sebesar 0,2 mL/menit, 0,4 mL/menit, 0,6 mL/menit, dan 0,8 mL/menit. Variasi debit oksigen ini bertujuan untuk menentukan kondisi aliran yang paling optimal dalam mendukung reaksi elektrokimia pada katoda. Selain variasi laju aliran, penelitian ini juga menerapkan empat variasi diameter lubang input oksigen, yaitu 4 mm, 6 mm, dan 8 mm. Perbedaan diameter lubang ini dimaksudkan untuk menganalisis pengaruh distribusi dan difusi oksigen terhadap kinerja PEMFC double cell. Setiap variasi diameter diuji secara terpisah dengan kondisi operasi yang sama agar hasil pengujian dapat dibandingkan secara objektif.

Seluruh pengujian dilakukan dalam kondisi operasi yang terkontrol, meliputi suhu sel, tingkat kelembaban, serta laju aliran hidrogen, guna meminimalkan pengaruh variabel luar terhadap hasil penelitian. Pengambilan data performa listrik dilakukan menggunakan *Rigol programmable DC electronic load*, yang berfungsi sebagai beban elektronik untuk mengatur dan menjaga kondisi pengujian secara stabil. Pada setiap variasi diameter lubang input oksigen, pengujian dilakukan menggunakan tegangan konstan, yaitu 0,2 V, 0,4 V, 0,6 V, dan 0,8 V. Dari pengujian ini diperoleh data arus keluaran, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung current density dan power density. Analisis variasi aliran oksigen dan diameter lubang input difokuskan untuk mengevaluasi pengaruh konfigurasi aliran oksigen terhadap peningkatan kinerja PEMFC double cell secara keseluruhan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

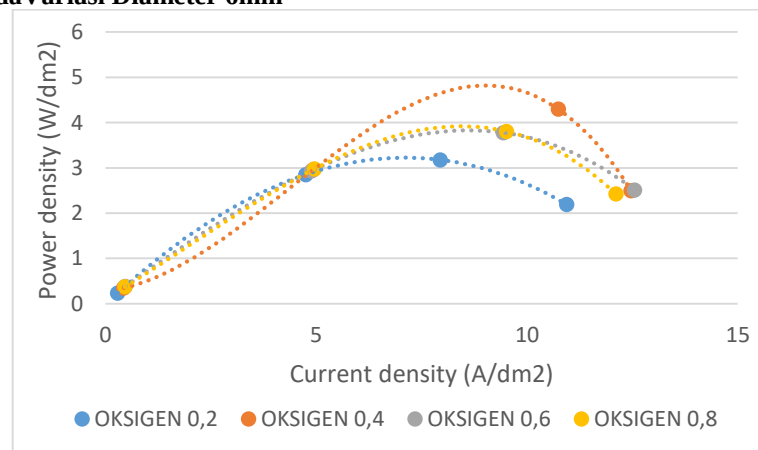
A. Power density pada Variasi Diameter 4mm



Gambar 5. Grafik Power density dan Current density pada Diameter 4mm

Pada pengujian diameter saluran 4 mm dengan tegangan operasi 0,2 V, perubahan laju aliran oksigen terbukti memengaruhi nilai *current density* dan *power density*. Pada laju aliran oksigen 0,2, kinerja sel sudah cukup baik, namun masih dibatasi oleh suplai oksigen ke area reaksi. Peningkatan laju aliran menjadi 0,4 menghasilkan *current density* dan *power density* tertinggi, masing-masing sebesar 13,84 A/dm² dan 2,768 W/dm², akibat difusi oksigen yang lebih efektif dan penurunan concentration losses di katoda. Namun, ketika laju aliran oksigen dinaikkan lebih lanjut menjadi 0,6 dan 0,8, kinerja sel justru menurun karena kelebihan aliran oksigen tidak lagi meningkatkan reaksi elektrokimia secara signifikan, serta berpotensi menimbulkan gangguan distribusi gas, berkurangnya residence time, dan ketidakseimbangan manajemen air. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan adanya laju aliran oksigen optimum pada nilai 0,4 untuk diameter saluran 4 mm, di mana kinerja sel ditentukan oleh keseimbangan antara suplai oksigen, difusi gas, kinetika reaksi, dan manajemen air.

B. Power density pada Variasi Diameter 6mm

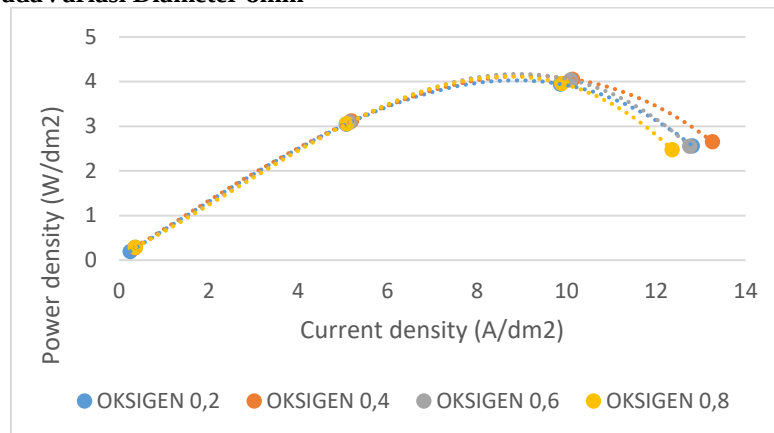


Gambar 6. Grafik Power density dan Current density pada Diameter 6mm

Pada pengujian diameter saluran 6 mm dengan tegangan operasi 0,2 V, variasi laju aliran oksigen berpengaruh signifikan terhadap *current density* dan *power density*. Pada laju aliran oksigen 0,2, kinerja sel masih rendah akibat suplai oksigen dan difusi gas yang belum optimal, diperparah oleh diameter saluran yang besar sehingga kecepatan aliran menurun. Peningkatan laju aliran menjadi 0,4 meningkatkan kinerja sel secara nyata karena distribusi dan difusi oksigen ke area reaksi menjadi lebih efektif. Kinerja optimum dicapai pada laju aliran oksigen 0,6 dengan *current density* 12,550 A/dm² dan *power density* 2,510 W/dm², menunjukkan bahwa suplai oksigen telah mencukupi kebutuhan reaksi elektrokimia tanpa menimbulkan efek negatif yang berarti. Namun, pada laju aliran 0,8 terjadi penurunan kinerja akibat berkurangnya waktu tinggal oksigen, gangguan distribusi gas, serta ketidakseimbangan manajemen air di dalam sel. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa diameter saluran 6 mm memerlukan

laju aliran oksigen yang lebih tinggi untuk mencapai kondisi optimum, di mana kinerja sel ditentukan oleh keseimbangan antara suplai oksigen, difusi gas, karakteristik aliran, dan manajemen air.

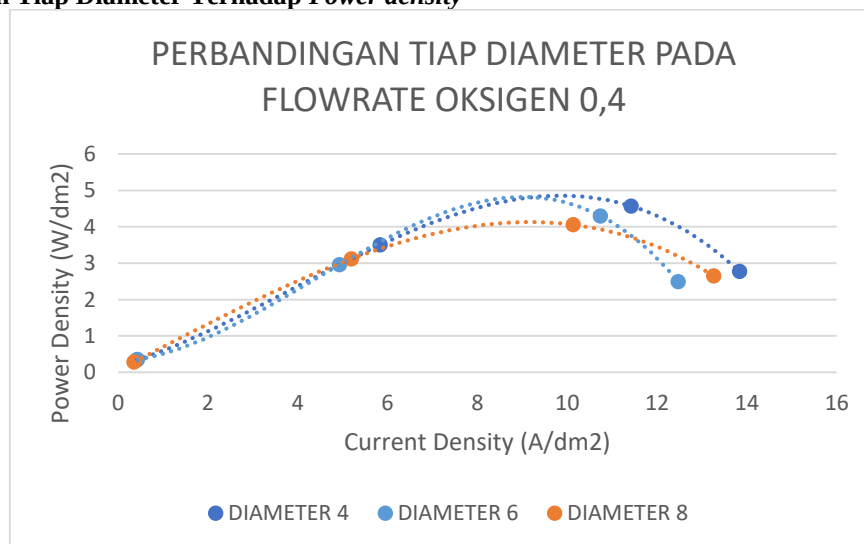
C. Power density pada Variasi Diameter 8mm



Gambar 7. Grafik Power density dan Current density pada Diameter 8mm

Pada pengujian diameter saluran 8 mm dengan tegangan operasi 0,2 V, variasi laju aliran oksigen memengaruhi *current density* dan *power density* secara signifikan. Pada laju aliran oksigen 0,2, kinerja sel sudah relatif baik karena distribusi gas yang cukup merata, meskipun difusi oksigen ke lapisan katalis belum optimal. Peningkatan laju aliran menjadi 0,4 menghasilkan *current density* dan *power density* tertinggi, masing-masing sebesar 13,261 A/dm² dan 2,652 W/dm², yang menunjukkan kondisi paling seimbang antara suplai oksigen, difusi gas, kecepatan aliran, dan waktu tinggal oksigen di saluran. Namun, pada laju aliran oksigen 0,6 dan 0,8, kinerja sel menurun akibat berkurangnya efektivitas pemanfaatan oksigen, penurunan waktu kontak gas dengan katalis, serta potensi gangguan manajemen air dan ketidakseragaman distribusi gas. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa pada diameter saluran 8 mm dan tegangan 0,2 V, kinerja sel optimum dicapai pada laju aliran oksigen yang moderat, yaitu 0,4, dengan keseimbangan yang tepat antara karakteristik aliran gas, difusi oksigen, dan manajemen air.

D. Perbandingan Tiap Diameter Terhadap Power density



Gambar 8. Perbandingan Tiap Diameter pada Flow Rate Oksigen 0,4 slpm

Berdasarkan grafik *power density* pada flow rate oksigen 0,4 slpm, terlihat bahwa variasi diameter saluran dan laju aliran oksigen berpengaruh signifikan terhadap daya yang dihasilkan, dengan kecenderungan penurunan kinerja pada diameter menengah (6 mm) dan peningkatan kembali pada diameter yang lebih besar (8 mm). Diameter 4 mm menunjukkan *power density* relatif tinggi karena kecepatan aliran gas yang lebih besar menghasilkan kontak oksigen–katalis yang lebih intensif dan difusi oksigen yang efektif. Pada diameter 6 mm, *power density* menurun akibat berkurangnya kecepatan aliran dan distribusi oksigen yang belum optimal sehingga meningkatkan concentration

losses. Selanjutnya, pada diameter 8 mm, *power density* kembali meningkat karena distribusi gas yang lebih merata memungkinkan reaksi elektrokimia berlangsung lebih efektif. Secara umum, peningkatan laju aliran oksigen hingga kisaran 0,4–0,6 meningkatkan *power density* pada semua diameter, sedangkan pada laju aliran tertinggi (0,8) kinerja cenderung stagnan atau menurun akibat berkurangnya waktu tinggal oksigen dan potensi gangguan manajemen air. Hasil ini menegaskan bahwa kinerja sel ditentukan oleh keseimbangan antara diameter saluran, laju aliran oksigen, efektivitas difusi gas, dan manajemen air, sehingga diperlukan kombinasi parameter yang tepat untuk memperoleh *power density* maksimum.

E. Efisiensi

Nilai efisiensi sistem dihitung dari perbandingan antara tegangan operasi 0,4 V dengan tegangan referensi sebesar 1,481 V [14],

$$\eta = 0,4/1,481 \quad (1)$$

Tegangan 0,4 V dipilih dalam perhitungan efisiensi karena merupakan tegangan yang menghasilkan nilai *power density* tertinggi dibandingkan tiga variasi tegangan lainnya yang diuji. Dari perhitungan didapatkan nilai efisiensi sebesar 27 %. Hal ini menunjukkan bahwa pada tegangan tersebut, sistem PEMFC beroperasi pada kondisi paling efektif dalam mengonversi energi kimia menjadi energi listrik berdasarkan parameter daya keluaran yang dihasilkan.

V. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis *power density* pada variasi diameter saluran 4 mm, 6 mm, dan 8 mm, dapat disimpulkan bahwa diameter saluran berpengaruh signifikan terhadap kinerja daya sel. Diameter 4 mm menunjukkan *power density* tertinggi dan paling stabil pada berbagai laju aliran oksigen karena mampu meningkatkan kecepatan aliran gas dan intensitas kontak oksigen dengan lapisan katalis, sehingga reaksi elektrokimia berlangsung lebih efektif. Diameter 6 mm menghasilkan *power density* terendah akibat distribusi oksigen dan kecepatan aliran gas yang belum optimal, sedangkan diameter 8 mm menunjukkan peningkatan kinerja dibandingkan diameter 6 mm karena distribusi gas yang lebih merata, meskipun pada laju aliran oksigen tinggi kinerjanya menurun akibat berkurangnya waktu tinggal oksigen dan potensi gangguan manajemen air. Secara keseluruhan, diameter 4 mm ditetapkan sebagai diameter paling optimal berdasarkan nilai *power density* tertinggi dan kestabilan kinerja. Selain itu, perhitungan efisiensi sistem menunjukkan efisiensi sebesar 27 % pada tegangan operasi 0,4 V, yang dipilih karena menghasilkan *power density* maksimum, sehingga tegangan ini merepresentasikan kondisi operasi terbaik dengan keseimbangan optimal antara daya keluaran dan efisiensi konversi energi pada sistem PEMFC yang diuji.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada orang tua serta pihak-pihak yang telah berperan dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih disampaikan kepada laboratorium teknik mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo atas fasilitas dan dukungan teknis yang diberikan sehingga penelitian dapat berjalan dengan baik. Serta seluruh pihak pendukung yang tidak dapat penulis ucapkan satu persatu. Seluruh kontribusi tersebut sangat membantu dalam kelancaran dan keberhasilan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] A. Jose, S. Bekal, and S. T. Revankar, "Effect of oxidant quantity and humidity on performance of PEMFC with twin inlet and twin outlet flow field," no. June, pp. 1–13, 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1390956.
- [2] A. Fahrudin, D. Ichsan, F. Taufany, B. U. K. Widodo, and W. A. Widodo, "The effect of baffle shape on the performance of a polymer electrolyte membrane fuel cell with a biometric flow field," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 8, pp. 6028–6036, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.054.
- [3] A. Fahrudin, D. Ichsan, F. Taufany, and B. U. K. Widodo, "The effect of channel width on biometric flow field towards performance of polymer electrolyte membrane fuel cell," *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. 2552–2564, 2019.
- [4] A. Fahrudin, D. Ichsan, F. Taufany, B. U. K. Widodo, and W. A. Widodo, "Improved performance of polymer electrolyte membrane fuel cell using leaf-baffle flow field design," *Int. J. Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 4782–4788, 2022, doi: 10.1080/01430750.2022.2037458.
- [5] A. Fahrudin, D. Ichsan, F. Taufany, and B. U. K. Widodo, "The effect of mother channel width on biometric flow field towards polymer electrolyte membrane fuel cell performance," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1402, no. 4, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1402/4/044042.
- [6] S. Pirou *et al.*, "Production of a monolithic fuel cell stack with high *power density*," pp. 1–8, 2022, doi: 10.1038/s41467-022-28970-w.
- [7] A. S. Samosir, "A simple PEM Fuel Cell Emulator using Electrical Circuit Model," pp. 881–885, 2010.
- [8] S. T. Bunyan, H. A. Dhahad, and D. S. Khudhur, "The Effect of Flow Field Design Parameters on the Performance of PEMFC: A Review," *Sustainability*, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su151310389>.
- [9] S. Shimpalee, S. Greenway, D. Spuckler, and J. W. Van Zee, "Predicting water and current distributions in a commercial-size PEMFC," vol. 135, no. 0378, pp. 79–87, 2004, doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.03.059.

- [10] Y. Irmawati *et al.*, “KAJIAN KINERJA POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL OPEN CATHODE TERHADAP VARIASI TEGANGAN KIPAS KATODA DAN VARIASI LAJU ALIR HIDROGEN Pengaruh Kipas pada Kinerja PEMFC Open,” vol. 13, no. 3, pp. 216–220, 2012.
- [11] S. Tanvir, A. Rimon, S. Rahman, and M. Mourshed, “Energy Conversion and Management : X Flow field configurations in PEMFCs : Design , Modeling , and performance insights,” *Energy Convers. Manag. X*, vol. 28, no. September, p. 101263, 2025, doi: 10.1016/j.ecmx.2025.101263.
- [12] K. Song *et al.*, “Assembly techniques for proton exchange membrane fuel cell stack : A literature review”.
- [13] Z. Niu, J. Wu, Z. Bao, Y. Wang, Y. Yin, and K. Jiao, “International Journal of Heat and Mass Transfer Two-phase flow and oxygen transport in the perforated gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cell,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 139, pp. 58–68, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.008.
- [14] C. Spiegel, L. Hagar, J. McKenzie, L. Hahn, M. McGee, and S. Ingle, *Designing and Building Fuel Cells*.

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.