



Simulasi pembangkit listrik *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) untuk kebutuhan daya rumah 1000 watt

JEFRI JEFRI^{1*}, DEDI ROHENDI^{2,4}, BARLIN^{1,5}, DAN ASSAIDAH³

¹ Program Studi Magister Ilmu Material, Program Pascasarjana, Universitas Sriwijaya, Palembang, 30139, Indonesia; ² Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Indralaya, 30862, Indonesia; ³ Program Studi Magister Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Indralaya, 30139, Indonesia; ⁴ Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya, Universitas Sriwijaya, Palembang, 30139, Indonesia; ⁵ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Palembang, 30139, Indonesia

<p>Kata kunci: PEMFC, pembangkit listrik perumahan, simulasi</p>	<p>ABSTRAK: Penelitian ini menyajikan simulasi pembangkit listrik <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i> (PEMFC) untuk perumahan, mempertimbangkan 100 rumah masing-masing membutuhkan 1000 watt pada tegangan 220 V. Simulasi menunjukkan bahwa untuk mencapai kapasitas daya ini, diperlukan pasokan gas hidrogen sebesar 1609,29, 1514,76, dan 1484,94 gram per jam pada tekanan 1, 2, dan 3 atm. Kondisi optimal terjadi pada suhu 333K (60°C) dan tekanan 3 atm dengan efisiensi 30,72%. Tegangan keluaran optimal adalah 0,56 V menggunakan 393 sel, mendekati 220 V yang ditargetkan. Hasil sampingan berupa air dan panas masing-masing rata-rata 359,62 watt dan 0,0020 mL/jam. Asumsi pengeluaran bulanan mencapai Rp. 17.237.929, sehingga dibutuhkan konsep yang lebih efisien untuk hasil yang lebih ekonomis. Penelitian ini memberikan wawasan tentang kelayakan dan optimasi pembangkit listrik berbasis PEMFC untuk aplikasi perumahan.</p>
<p>Keywords: PEMFC, residential power generation, simulation</p>	<p>ABSTRACT: This paper presents a simulation of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) power plant for residential use, considering 100 houses each requiring 1000 watts at a voltage of 220 V. The simulation shows that achieving this power capacity requires a hydrogen gas supply of 1609.29, 1514.76, and 1484.94 grams per hour at pressures of 1, 2, and 3 atm, respectively. Optimal conditions were found at 333K (60°C) and a pressure of 3 atm with an efficiency of 30.72%. The optimum output voltage was 0.56 V using 393 cells, close to the targeted 220 V. By-products of water and heat averaged 359.62 watts and 0.0020 mL/hour, respectively. The assumed monthly expenditure reaches Rp. 17,237,929, indicating that a more efficient concept is needed for more economical results. This research provides insight into the feasibility and optimization of PEMFC-based power generation for residential applications.</p>

1 PENDAHULUAN

Saat ini energi fosil masih menjadi pilihan utama untuk memenuhi kebutuhan energi global. Penggunaan energi fosil secara terus-menerus memberikan dampak negatif berupa krisis energi, degradasi lingkungan, polusi udara dan air, serta emisi gas rumah kaca [1]. Sumber energi alternatif menjadi solusi terdepan untuk mengurangi dampak yang dihasilkan oleh penggunaan energi fosil. Salah satu energi alternatif yang digadang-gadang akan menjadi teknologi masa depan yaitu teknologi *fuel cell* karena teknologi ini merupakan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan, aman, memiliki

tingkat efisiensi energi yang tinggi, dan kepadatan energi yang baik. *Fuel cell* adalah sebuah perangkat elektrokimia yang mengubah energi kimia dari suatu bahan bakar dan oksigen dari udara secara langsung menjadi energi listrik, dengan menghasilkan air dan panas sebagai produk sampingan [2]. *Fuel cell* dikenal sebagai salah satu teknologi energi bersih yang ramah lingkungan, karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca atau polusi udara selama operasinya. Selain itu, *fuel cell* juga memiliki keunggulan dalam efisiensi energi yang tinggi dan dapat diaplikasikan dalam berbagai skala, mulai dari perangkat portabel hingga pembangkit listrik besar.

* Corresponding Author: je.jefri15@gmail.com

Fuel cell memiliki beberapa jenis meliputi Direct Methanol Fuel Cell (DMFC), *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC), *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC), *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC), *Alkaline Fuel Cell* (AFC), dan *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) menjadi satu pilihan utama untuk pembangkit listrik perumahan karena kemampuannya untuk beroperasi pada suhu rendah, efisiensi yang tinggi, dan kemampuan untuk menghasilkan daya listrik yang stabil [3].

Beberapa penelitian telah dilakukan terkait PEMFC, seperti penelitian Kang, *et al* [4] mengenai pembangkit daya *High Temperature*-PEMFC yang dikombinasikan dengan *Organic Rankine Cell* yang menghasilkan efisiensi PEMFC mencapai 53.7%. Penelitian berikutnya, Colombo, *et al* [5] melaporkan bahwa efisiensi PEMFC selama proses operasi otomatis mencapai 47-54%. Tao *et al* [6] melakukan penelitian tentang PEMFC dengan termoelektrik generator menghasilkan efisiensi eksergi PEMFC sebesar 61.69% dan daya 155.33 kW.

Di Indonesia, Herlambang, *et al* [7] melakukan penelitian PEMFC skala kecil sebagai pembangkit listrik menghasilkan persentase efisiensi 4,25%. Pada penelitian berikutnya Herlambang, *et al* [8] kembali melakukan penelitian PEMFC sebagai pembangkit listrik dengan memodifikasi generator elektrolizer, nilai efisiensi yang dihasilkan sebesar 4,6%. Nilai tersebut tergolong sangat kecil, karena pada dasarnya efisiensi PEMFC dapat mencapai 40-60%. Oleh karena itu, untuk menghasilkan nilai efisiensi yang tinggi, sistem pada PEMFC harus didesain dengan baik. Pada penelitian ini, dilakukan simulasi PEMFC pembangkit listrik perumahan dimana asumsi daya listrik untuk setiap rumah adalah 1000 watt per bulan pada sumber tegangan 220 volt.

2 METODE

2.1 Rancangan Model Simulasi

Asumsi model pada simulasi desain PEMFC kali ini adalah sebagai berikut:

- Model pembangkit listrik PEMFC dirancang untuk perumahan dengan total 100 rumah. Kapasitas daya yang dibutuhkan sebesar 1000 watt per bulan dengan luas area sel (A) = 100 cm² dan arus sel (I_{cell}) = 1 A (Gambar 1).
- Tegangan listrik pada simulasi ini adalah 220 V. Jika ada tegangan berlebih pada anoda diabaikan.

- Pada simulasi ini didesain operasi sistem bervariasi pada 60°C - 80°C.
- Membran sel diasumsikan dapat mengantarkan listrik dengan baik.
- Permukaan elektroda memiliki sifat yang menyerap dan bentuknya seragam.
- Tekanan oksigen dan hidrogen dianggap sama yaitu 1, 2 dan 3 atm.

2.2 Persamaan Elektrokimia dalam Simulasi

Tegangan *fuel cell* merupakan potensial listrik yang dihasilkan oleh reaksi kimia antara hidrogen dan oksigen. Tegangan operasi pada *fuel cell* mencakup tegangan Nersnt dan tegangan yang hilang seperti tegangan saat aktivasi, tegangan akibat hambatan dan saat perpindahan massa. Tegangan *fuel cell* (V_{FC}) dapat dinyatakan menggunakan Persamaan (1) [9].

$$V_{FC} = E_{Nerst} + V_{Act} + V_{Ohmic} + V_{Mt} \quad (1)$$

dengan:

V_{FC} = tegangan output FC, V; E_{Nerst} = tegangan Nernst /tegangan *open circuit*, V; V_{Act} = tegangan aktivasi (*activation polarization*), V; V_{Ohmic} = tegangan Ohmic (*Ohmic polarization*), V; dan V_{Mt} = tegangan akibat perpindahan (*Mass transport losses*), V

2.3 Persamaan Nernst

Tegangan Nernst merupakan tegangan yang dihasilkan dari sel elektrokimia. Tegangan Nernst dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Nersnt. Persamaan Nernst dinyatakan pada Persamaan (2) [10].

$$E_{Nerst} = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}(P_{O_2})^{0.5}} \right) \quad (2)$$

Keterangan:

E_{Nerst} = tegangan Nernst /tegangan *open circuit*, V; E_0 = potensial sel dalam kondisi standar, V; R = konstanta gas ideal; T = Temperatur, K; F = Konstanta Faraday; dan P = tekanan (atm)

Untuk mencari tekanan parsial hidrogen, oksigen, dan air pada elektroda digunakan Persamaan (14) [11].

$$P_{H_2O} = 10^{-X} \quad (3)$$

$$X = -2.1974 + 0.02953T_c + (-9.1837 \times 10^{-5}T_c^2) + (1.4453 \times 10^{-7}T_c^{-3}) \quad (4)$$

$$P_{O_2} = \frac{P_{udara}}{\exp(4.192 \frac{i}{T^{1.334}})} - P_{H_2O} \quad (5)$$

$$P_{H_2} = \frac{0.5P_{udara}}{\exp(1.653 \frac{i}{T^{1.334}})} - P_{H_2O} \quad (6)$$

2.4 Tegangan yang Hilang (Losses Voltage)

Tegangan yang hilang dalam *fuel cell* merupakan penurunan dari potensial yang diakibatkan kerugian yang terjadi selama proses operasi *fuel cell*. Secara matematis, tegangan ini dihitung mengikuti Persamaan (7) [10].

$$V_{Act} = -b \ln\left(\frac{i}{i_o}\right) \quad (7)$$

dengan:

$$b = 2.3 \frac{RT}{2\alpha F} \quad (8)$$

2.5 Tegangan Ohmic

Tegangan ohmic merupakan tegangan yang hilang akibat adanya hambatan ketika proton berpindah tempat, dapat dinyatakan pada Persamaan (9) [10]. Nilai dari hambatan internal R bervariasi antara 0.191 hingga 0.275 [12].

$$V_{Ohmic} = -IR_{internal} \quad (9)$$

2.6 Mass Transport Losses

Mass transport losses adalah penurunan kinerja dalam *fuel cell* yang disebabkan oleh kesulitan mengalirkan reaktan (biasanya oksigen dan hidrogen) ke permukaan elektroda atau mengeluarkan produk sampingan dari permukaan elektroda. Fenomena ini dapat dijelaskan dengan Persamaan (10) [10].

$$V_{Mt} = \alpha_1 i^k (1 - \beta i) \quad (10)$$

2.7 Efisiensi

Efisiensi pada *fuel cell* merupakan parameter penting yang mengukur seberapa efisien proses konversi energi kimia hidrogen dan oksigen menjadi energi listrik. Efisiensi dapat dihitung berdasarkan Persamaan (11) [12].

$$\text{Efisiensi} = \frac{(\mu_f V_{FC} 100)}{HHV} \quad (11)$$

Dimana selama produksi air berbentuk embun, HHV (*Higher Heating Value* = 1.48V) digunakan pada Persamaan (11).

2.8 Produk Sampingan Fuel Cell

Proses elektrokimia pada *fuel cell* akan menghasilkan energi, air dan panas. Produksi air yang dihasilkan oleh *fuel cell* dapat dihitung dengan Persamaan (12).

$$\text{Produksi Air (liter/jam)} = \frac{\text{mol. massa air} \times \text{daya}}{3600 V_{FC} F} \quad (12)$$

Sementara untuk total panas yang dihasilkan oleh setiap n unit tumpukan *fuel cell* (Q_{cell}) dapat dihitung menggunakan persamaan (13) [12].

$$Q_{cell} = nI(HHV - V_{FC}) \quad (13)$$

2.9 Penggunaan Hidrogen

Nilai dari penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar PEMFC tiap sel dalam satuan mol/s, dihitung dengan Persamaan (14) [12].

$$H_{2usage} = \frac{P_{FC}}{2 * V_{FC} * F} \quad (14)$$

Konstanta yang digunakan pada simulasi PEMFC ditunjukkan pada Tabel 1 [10][12].

2.7 Diagram Alir Progam

Diagram Alir pada simulasi PEMFC dibuat berdasarkan urutan pemrograman yaitu input data, pengolahan data, dan hasil yang ditunjukkan dalam bentuk kurva (Gambar 1). Proses data diawali dengan memasukan nilai konstanta tetap, model yang diinginkan, tekanan dan temperatur operasi. Pengolahan data dibuat untuk mencari nilai tegangan *fuel cell* (tegangan nerst, tegangan aktivasi, tegangan ohmic dan tegangan akibat perpindahan massa). Rumus 1-14 digunakan untuk proses pengolahan data dimana ditampilkan dalam kurva.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Hasil Simulasi

Simulasi PEMFC yang telah dilakukan menghasilkan kurva penggunaan hidrogen dan polarisasi. Selain itu, pada simulasi ini juga diperhitungkan produksi air, total panas dan efisiensi. Model simulasi yang digunakan sesuai pada Tabel 1, dengan memvariasikan suhu operasi 333K – 353K atau 60°C – 80°C dan tekanan 1-3 atm. Pemilihan suhu ini didasarkan pada penelitian Tawalbeh, *et al* [13] yang menyatakan bahwa suhu optimal PEMFC yang dikategorikan *low temperature* (LT-PEMFC) berkisar 60°C – 85°C. Pada penelitian lainnya dinyatakan bahwa suhu optimal LT-PEMFC berada dikisaran suhu 80°C [14][15]. Pemilihan suhu rendah untuk simulasi pada

PEMFC lebih cocok untuk digunakan sehari-hari dan memiliki tingkat keamanan yang lebih tinggi serta densitas daya yang dihasilkan cenderung lebih tinggi.

Analisis Penggunaan Hidrogen

Analisis penggunaan hidrogen bertujuan untuk mengetahui banyaknya hidrogen yang diperlukan dalam simulasi. Simulasi menggunakan MATLAB pada penggunaan hidrogen menghasilkan kurva linear (Gambar 3). Kurva (Gambar 3) memperlihatkan bahwa semakin besar suhu tidak mempengaruhi banyaknya hidrogen yang digunakan. Hal ini diasumsikan bahwa suhu tidak berpengaruh secara signifikan terhadap daya dan tegangan yang dihasilkan, sehingga besaran hidrogen yang dibutuhkan cenderung tidak terpengaruh.

Gambar 3 juga menunjukkan bahwa tekanan mempengaruhi penggunaan konsumsi hidrogen. Semakin besar tekanan yang diberikan, penggunaan hidrogen semakin berkurang. Pada tekanan yang lebih tinggi, konsentrasi molekul hidrogen dan oksigen di elektroda meningkat. Peristiwa ini dapat meningkatkan laju reaksi elektrokimia karena lebih banyak molekul bahan bakar yang tersedia untuk bereaksi pada permukaan katalis [16]. Dengan demikian, efisiensi sel bahan bakar meningkat, dan lebih sedikit hidrogen yang dibutuhkan untuk menghasilkan jumlah daya yang sama.

Pada Tabel 2 diperlihatkan hasil perhitungan penggunaan hidrogen disetiap variasi suhu operasi dan tekanan PEMFC. Rata-rata penggunaan hidrogen untuk tekanan 1, 2, dan 3 atm secara berturut-turut 0,22, 0,21, dan 0,20 mol/detik, kemudian dikonversi menjadi 1609,29, 1514,76, dan 1484,94 gram/jam. Kemudian dihitung waktu yang dibutuhkan untuk menghabiskan satu tabung hidrogen. Jika diasumsikan menggunakan tabung hidrogen 12,8 kg. Estimasi waktu yang dibutuhkan ditunjukkan Pada Tabel 3.

Berdasarkan Tabel 4 dapat diketahui bahwa dalam satu bulan jumlah tabung yang dibutuhkan adalah 91 tabung (12,8 Kg). Diasumsikan bahwa harga satu tabung hidrogen (12,8 Kg) adalah \$10 (\$1 = Rp. 16.032,3). Estimasi jumlah pengeluaran dalam satu bulan ditunjukkan pada Tabel 4. Jika dihitung total pengeluaran yang harus dikeluarkan untuk setiap variasi tekanan secara berturut-turut Rp18.674.423, Rp. 17.648.356 dan Rp. 17.237.929. Meskipun tekanan memberikan pengaruh terhadap total pengeluaran, jika dibandingkan dengan listrik energi fosil masih sangat mahal (listrik 1300 watt = 1444,70 per kWh). Dengan demikian, masih perlu adanya penelitian untuk menekan penggunaan hidrogen agar menghasilkan listrik yang lebih murah.

Analisis Polarisasi

Kurva polarisasi pada simulasi ini tidak dipengaruhi oleh daya melainkan suhu dan tekanan, serta jenis sampel yang diberikan. Karena jenis sampel dan suhu yang diberikan sama, maka sifat polarisasi yang dihasilkan juga sama. Pada simulasi ini, konstanta dan karakteristik dibuat berdasarkan penelitian sebelumnya dan kondisi yang dipasarkan. Kurva polarisasi ditunjukkan pada Gambar 4.

Kurva polarisasi dibuat dengan variasi tekanan dan suhu. Pada variasi tekanan dapat dilihat bahwa semakin besar tekanan yang diberikan, tegangan yang dihasilkan semakin meningkat. Rata-rata tegangan *fuel cell* yang dihasilkan pada variasi tekanan 1, 2, dan 3 atm secara berturut-turut 0,52, 0,55, dan 0,56 volt. Hal ini dapat dikaitkan dengan laju reaksi yang meningkat akibat tekanan yang diperbesar sehingga tegangan yang dihasilkan semakin besar.

Dari Gambar 4 juga terlihat bahwa semakin meningkat suhu operasi, tegangan yang dihasilkan juga menurun. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui konsep energi bebas Gibbs, di mana penurunan suhu menyebabkan peningkatan energi Gibbs [17]. Hal ini menunjukkan bahwa energi bebas Gibbs berperan dalam menentukan perubahan tegangan pada sistem dengan suhu yang berbeda.

Analisis Efisiensi

Efisiensi *fuel cell* merupakan perbandingan antara energi listrik yang dihasilkan dengan bahan bakar yang digunakan dalam simulasi ini, hidrogen. Efisiensi yang ada mengacu pada nilai tegangan saat suhu diberikan berupa konstanta atau E_{HHV} sebesar 1.48 volt. Hasil perhitungan Efisiensi ditunjukkan pada Tabel 5.

Pada Tabel 5 dapat diketahui bahwa rata-rata efisiensi pembangkit listrik untuk setiap variasi tekanan mencapai 27,94, 29,67, dan 30,31%. Sejalan dengan tegangan yang dihasilkan persentase efisiensi semakin meningkat seiring meningkatnya tekanan. Peningkatan tegangan dalam sistem PEMFC memungkinkan untuk mengurangi arus yang mengalir sehingga kerugian daya dapat dikurangi dan efisiensi meningkat.

Selain itu, persentase efisiensi pada setiap variasi suhu operasi menunjukkan semakin tinggi suhu operasi maka nilai efisiensi semakin menurun. Hal ini bersesuaian dengan tegangan *output* yang didapat sebelumnya, berdasarkan Persamaan 11 nilai efisiensi berbanding lurus dengan tegangan *fuel cell*. Semakin tinggi nilai tegangan yang dihasilkan maka persentase efisiensi akan semakin besar.

Analisis Panas dan Air

Selain menghasilkan energi, PEMFC juga menghasilkan produk samping berupa panas dan air. Pada katoda, oksigen dari udara dioksidasi menjadi ion oksigen dan mengikuti reaksi pengurangan dengan proton dan elektron dari anoda untuk membentuk air [18]. Air ini kemudian dikeluarkan dari sel sebagai uap air. Selain itu, energi kimia yang dikonversi menjadi energi listrik di dalam sel juga disertai dengan pembuangan panas. Proses ini disebabkan oleh konversi energi kimia menjadi energi listrik yang tidak bersih secara sempurna, sehingga sebagian energi tersebut hilang dalam bentuk panas. Hasil perhitungan total panas dan produksi air terhadap variasi tekanan dan suhu pada simulasi PEMFC ditunjukkan pada Tabel 6.

Dari Tabel 6 dapat diketahui bahwa tekanan yang lebih besar dapat menekan total panas yang terbuang. Peningkatan tekanan dalam sistem *fuel cell* dapat secara signifikan mengurangi panas yang terbuang dan meningkatkan efisiensi keseluruhan. Tekanan yang lebih tinggi memperbaiki konduktivitas ionik dalam membran elektrolit, mengurangi *overpotential*, dan meningkatkan transfer massa reaktan, seperti hidrogen dan oksigen, ke elektroda. Hal ini memungkinkan reaksi elektrokimia terjadi lebih efisien, menghasilkan lebih banyak energi listrik dan mengurangi energi yang hilang sebagai panas. Selain itu, distribusi gas yang lebih merata di bawah tekanan tinggi mengurangi risiko pembentukan hot spots, yang dapat menyebabkan peningkatan panas yang tidak diinginkan [19]

Berbanding terbalik dengan variasi suhu operasi, suhu operasi meningkat maka total panas yang dihasilkan juga meningkat. Hal ini dapat terjadi ketika suhu ditingkatkan maka kemungkinan energi termal yang tidak dapat dikonversi menjadi listrik semakin meningkat. Selain itu, ketika panas ditingkatkan efisiensi dari termodinamika PEMFC menurun karena tegangan yang dihasilkan berkurang. Ketika tegangan berkurang maka lebih banyak energi kimia yang tidak dikonversi menjadi energi listrik, tetapi menjadi panas [20]. Namun panas yang dihasilkan ini dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi, seperti pemanasan ruangan atau untuk memanaskan air dan seringkali dimanfaatkan sebagai sumber energi tambahan, meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem.

Produksi air yang dihasilkan tidak berbeda secara signifikan. Dapat diketahui bahwa tekanan dan suhu yang diberikan tidak berpengaruh terhadap volume produksi air. Air sebagai produk sampingan PEMFC merupakan produk sampingan yang bersih dan

ramah lingkungan, dibandingkan dengan energi fosil yang dapat meningkatkan emisi gas karbon. Pembangkit listrik PEMFC dapat dikatakan merupakan sumber energi alternatif yang bersih bersih untuk industri dan rumah tangga.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi pembangkit listrik PEMFC untuk perumahan, beberapa kesimpulan dapat ditarik. Untuk mencapai kapasitas daya 1000 watt, diperlukan pasokan gas hidrogen sebesar 1609,29, 1514,76, dan 1484,94 gram/jam pada masing-masing variasi tekanan 1, 2, dan 3 atm. Kondisi optimum dalam simulasi ini terjadi pada suhu operasi 333K atau 60°C dan tekanan 3 atm menghasilkan persentase efisiensi 30,72%. Tegangan optimum berkisar 0,56 V dengan menggunakan 393 sel, mendekati total tegangan yang ditargetkan sebesar 220 V. Hasil sampingan berupa air dan panas sebesar 359,62 dan 0,0020mL/jam. Asumsi pengeluaran satu bulan dengan menggunakan desain PEMFC pada kondisi optimum mencapai Rp. 17.237.929, sehingga diperlukan konsep yang lebih efisien untuk mencapai hasil yang lebih ekonomis.

REFERENSI

- [1] C. Briggs, D. Gilfillan, M. Hefner, E. Marland, and G. Marland, "Annual Estimates of Global and National CO² Emissions from Fossil Fuels: Tracking Revisions to The United Nations Energy Statistics Database Input Energy Data," *Environ. Data Sci.*, vol. 2, pp. 1–13, 2023, doi: 10.1017/eds.2023.38.
- [2] Y. M. A. Welaya, M. M. El Gohary, and N. R. Ammar, "A comparison between fuel cells and other alternatives for marine electric power generation," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 141–149, 2011, doi: 10.3744/JNAOE.2011.3.2.141.
- [3] J. Wang and W. Azam, "Natural Resource Scarcity, Fossil Fuel Energy Consumption, and Total Greenhouse Gas Emissions in Top Emitting Countries," *Geosci. Front.*, vol. 15, no. 2, p. 101757, 2024, doi: 10.1016/j.gsf.2023.101757.
- [4] H. S. Kang, M. H. Kim, and Y. H. Shin, "Thermodynamic modeling and performance analysis of a combined power generation system based on HT-PEMFC and ORC," *Energies*, vol. 13, no. 23, pp. 1–18, 2020, doi: 10.3390/en13236163.
- [5] E. Colombo, A. Baricci, A. Bisello, L. Guetaz, and A. Casalegno, "PEMFC performance decay during real-world automotive operation: Evincing degradation mechanisms and heterogeneity of ageing," *J. Power Sources*, vol. 553, no. July 2022, p. 232246, 2023, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.232246.
- [6] X. Chen *et al.*, "Thermodynamic study of a hybrid PEMFC-solar energy multi-generation system com-

- bined with SOEC and dual Rankine cycle," *Energy Convers. Manag.*, vol. 226, no. October, p. 113512, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113512.
- [7] Y. D. Herlambang and A. Roihadin, "Teknologi Pembangkit Listrik Energi Baru Terbarukan Menggunakan Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell Skala Kecil," *Eksergi*, vol. 15, no. 1, p. 27, 2019, doi: 10.32497/eksergi.v15i1.1464.
- [8] Y. D. Herlambang, K. Kurnianingsih, A. Roihadin, and F. Arifin, "Unjukkerja Electrolyzer tipe Dry Cell Terhadap Variasi Konsentrasi Elektrolit dan Arus Listrik pada Mesin PEM Fuel Cell Skala Kecil untuk Pembangkit Listrik," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 16, no. 3, p. 447, 2021, doi: 10.32497/jrm.v16i3.3077.
- [9] EG&G Services and I. Parson, *Fuel Cell Handbook*, Fifth Edit. U.S Departmen of of Energy, 2000.
- [10] A. Mansouri, S. A. Alenabi, and R. Gavagsaz-ghoachani, "Investigating Performance of Hydrogen Fuel Cells in Different Charge Transfer Coefficients and its Effect on Maximum PowerPoint," *Iran. J. Energy Environ.*, vol. 15, no. 3, pp. 311–318, 2024, doi: 10.5829/ijee.2024.15.03.10.
- [11] C. Spiegel, *PEM Fuel Cell : Modelling and Simulation Using Matlab*. Elsevier, 2008.
- [12] V. A. Kashyap, *PEM Fuel Cell Power Plant Simulation Using Matlab*. University of South Alabama, 2004.
- [13] M. Tawalbeh, S. Alarab, A. Al-Othman, and R. M. N. Javed, "The Operating Parameters, Structural Composition, and Fuel Sustainability Aspects of PEM Fuel Cells: A Mini Review," *Fuels*, vol. 3, no. 3, pp. 449–474, 2022, doi: 10.3390/fuels3030028.
- [14] A. Zucconi, J. Hack, R. Stocker, T. A. M. Suter, A. J. E. Rettie, and D. J. L. Brett, "Challenges and opportunities for characterisation of high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cells: a review," *J. Mater. Chem. A*, vol. 12, no. 14, pp. 8014–8064, 2024, doi: 10.1039/d3ta06895a.
- [15] Q. Meyer, C. Yang, Y. Cheng, and C. Zhao, *Overcoming the Electrode Challenges of High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells*, vol. 6, no. 1. Springer Nature Singapore, 2023. doi: 10.1007/s41918-023-00180-y.
- [16] U. I. F. Styana and N. Uyasaroh, "Pengaruh Laju Alir dan Tekanan Hidrogen terhadap Arus dan Tegangan yang Dihasilkan oleh Proton Exchange Membrane Fuel Cell," pp. 382–388, 2019.
- [17] J. J. Stephanos and A. W. Addison, "Free Energi and Temperature at Constant Pressure," in *Energy Free Gibss*, Elsevier, 2023, p. 171.
- [18] G. Anilkumar, N. Puneetha, G. V. Brahmendra Kumar, K. Palanisamy, and A. Gupta, "Design and testing of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) power pack for platform vehicle," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 937, no. 1, pp. 0–12, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/937/1/012007.
- [19] G. Radica, I. Tolj, M. V. Lototskyy, and S. Pasupathi, "Air Mass Flow and Pressure Optimization of a PEM Fuel Cell Hybrid System for a Forklift Application," *Engines*, vol. 17, no. 1, 2024, doi: 10.3390/en17010120.
- [20] V. Tjahyono, M. R. Kirom, and A. Qurthobi, "Analisis pengaruh temperatur terhadap daya yang dihasilkan microbial fuel cell (mfc) dengan substrat campuran lumpur sawah dan air tebu," *e-Proceeding Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 1178–1183, 2020.

LAMPIRAN

Tabel 1. Data Konstanta untuk Simulasi

Konstanta	Nilai
I_0	$10^{-6,912} \text{ A/cm}^2$
r	$0,191 \text{ W/cm}^2$
α	0,5
α_1	0,085
k	1,1
b	$0,06 \text{ V / doc}$
β	$1,148 \text{ cm}^2 / \text{A}$
μ_f	0,8014

Tabel 2. Total Hidrogen yang Digunakan Terhadap Variasi Suhu dan Tekanan

Suhu (K)	Tekanan (atm)					
	1		2		3	
	N (mol/s)	Konsumsi gram/jam	N (mol/s)	Konsumsi (gram/jam)	N (mol/s)	Konsumsi gram/jam
333	0,22	1609,29	0,21	1514,76	0,20	1484,94
343	0,22	1609,29	0,21	1514,76	0,20	1484,94
353	0,22	1609,29	0,21	1514,76	0,20	1484,94

Tabel 3. Estimasi Waktu yang Dibutuhkan untuk Menghabiskan 1 Tabung Hidrogen (12,8 Kg)

Suhu (K)	Tekanan (atm)					
	1		2		3	
	Konsumsi (gram/jam)	t _a (jam)	Konsumsi gram/jam	t _a (jam)	Konsumsi gram/jam	t _a (jam)
333	1609,29	7,95	1514,76	8,45	1484,94	8,62
343	1609,29	7,95	1514,76	8,45	1484,94	8,62
353	1609,29	7,95	1514,76	8,45	1484,94	8,62

*t_a = waktu yang dibutuhkan untuk menghabiskan satu tabung 12,8 Kg

Tabel 4. Estimasi Pengeluaran dalam Satu Bulan

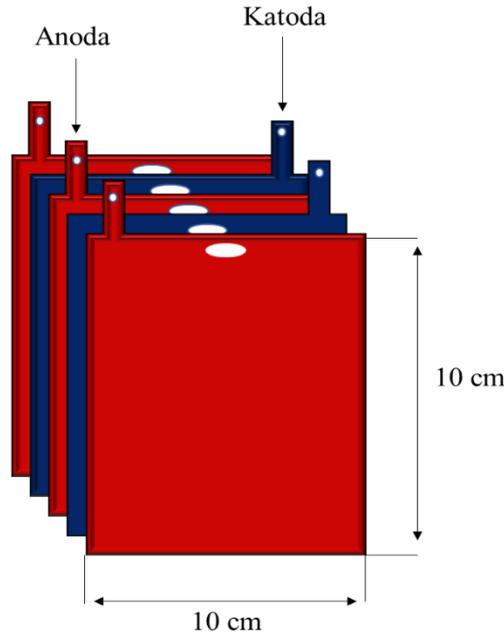
Suhu (K)	Tekanan (atm)					
	1		2		3	
	Jumlah tabung/bulan	Total Pengeluaran	Jumlah tabung/bulan	Total Pengeluaran	Jumlah tabung/bulan	Total Pengeluaran
333	91	Rp. 18.674.423	86	Rp. 17.648.356	84	Rp. 17.237.929
343	91	Rp. 18.674.423	86	Rp. 17.648.356	84	Rp. 17.237.929
353	91	Rp. 18.674.423	86	Rp. 17.648.356	84	Rp. 17.237.929

Tabel 5. Hasil Perhitungan Efisiensi PEMFC terhadap Variasi Tekanan dan Suhu Operasi

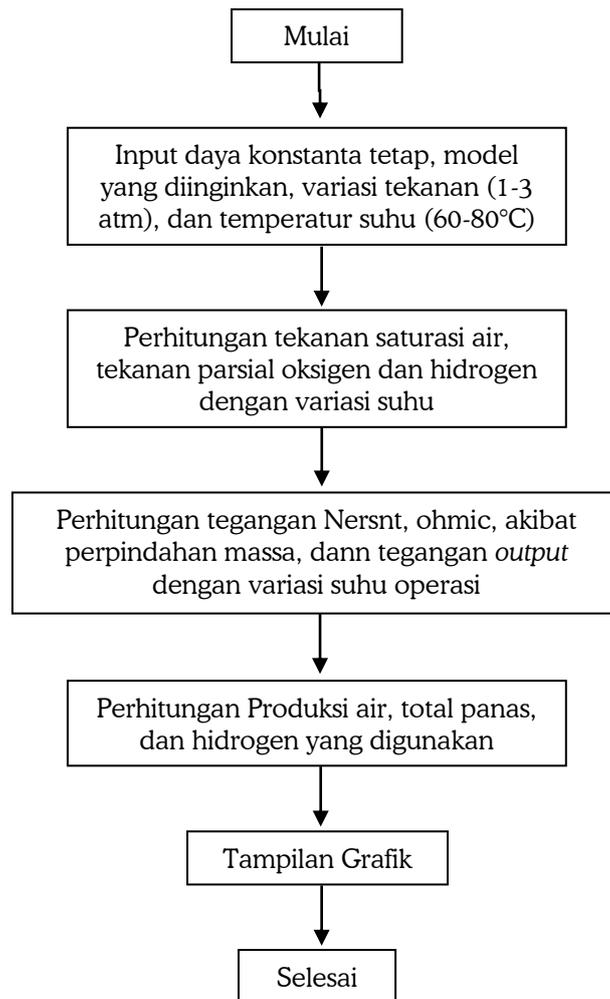
Suhu (K)	Efisiensi (%)		
	1 atm	2 atm	3 atm
333	29,10	30,17	30,72
343	28,32	29,71	30,33
353	26,40	29,13	29,88

Tabel 6. Total Panas dan Produksi Air terhadap Variasi Suhu

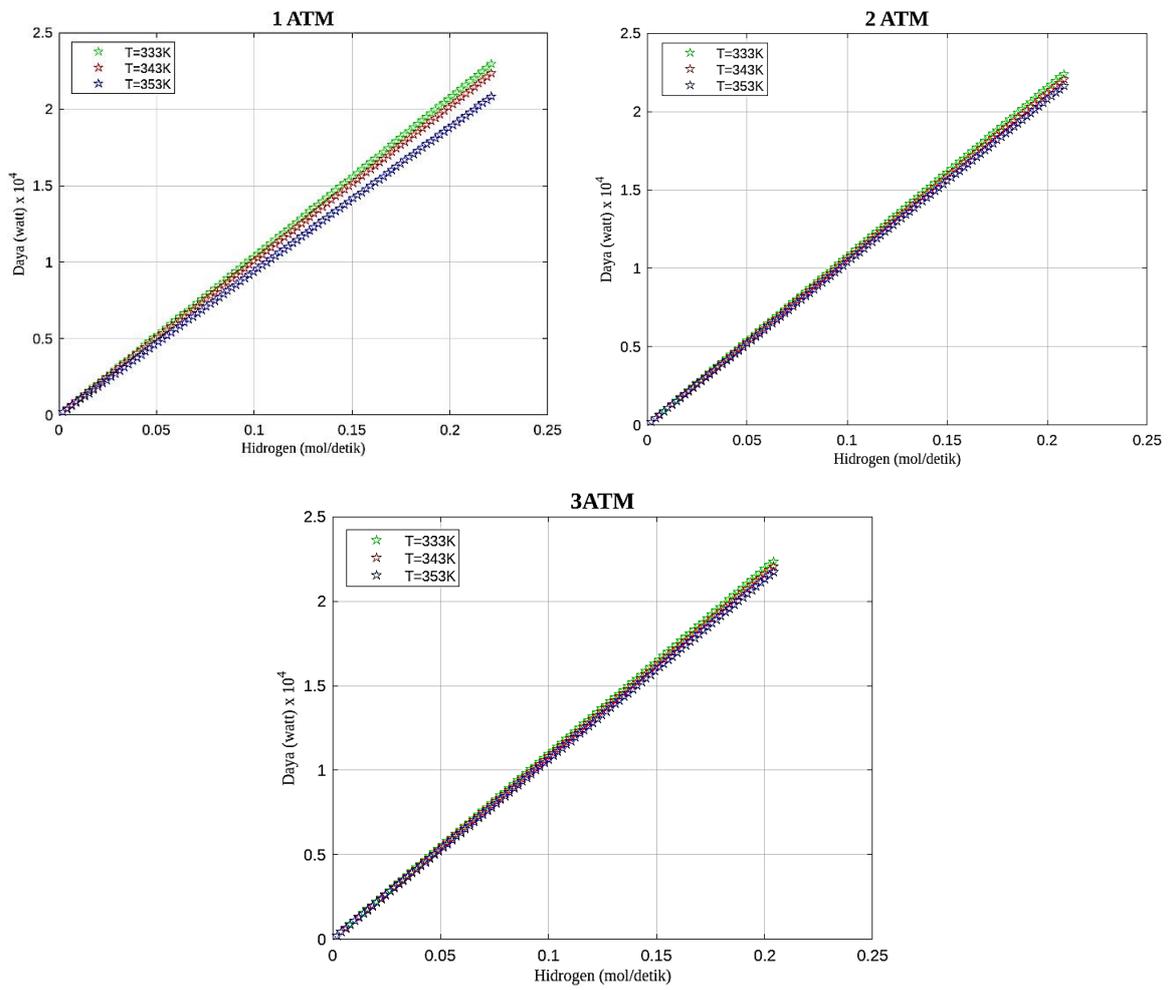
Suhu (K)	Tekanan (atm)					
	1		2		3	
	Tota Panas (watt)	Produksi Air (mL/jam)	Tota Panas (watt)	Produksi Air (mL/jam)	Tota Panas (watt)	Produksi Air (mL/jam)
333	402,5	0,0022	370,99	0,0021	359,62	0,0020
343	408,6	0,0022	374,42	0,0021	362,46	0,0020
353	423,8	0,0022	378,71	0,0021	365,70	0,0020



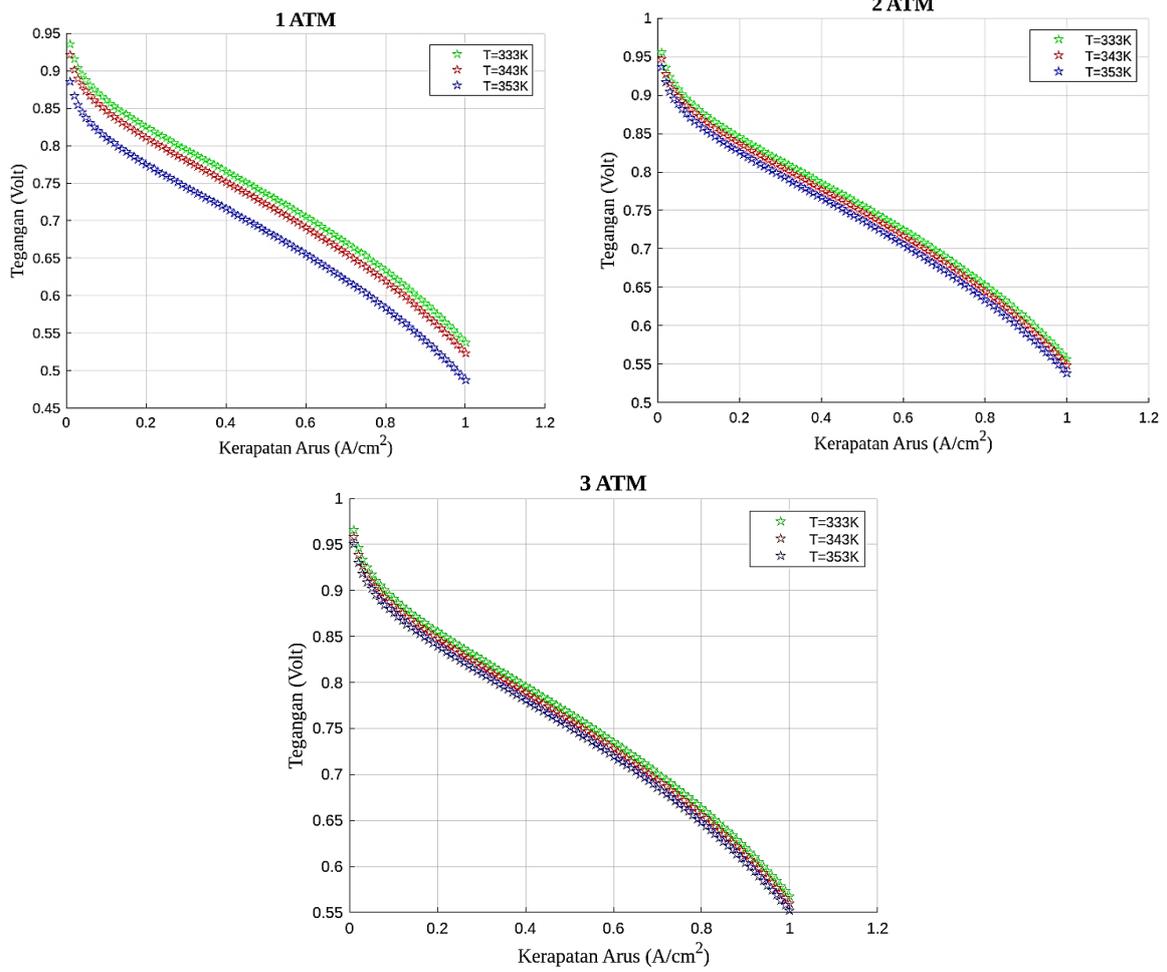
Gambar 1 Skema desain sel



Gambar 2. Diagram Alir Program



Gambar 3. Penggunaan Hidrogen pada Simulasi PEMFC terhadap Daya dengan Variasi Suhu dan Tekanan



Gambar 4. Kurva Polarisasi Hasil Simulasi Menggunakan MATLAB