

# Pengaruh Temperatur Terhadap Kinerja Sel Pembangkit Listrik *Direct Methanol* (DMFC)

MAYA RAMADIANTI MUSADI, YUNIA ROSSA, GILANG RAMADHAN SURYAMAN

Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia  
Email: maya\_musadi@itenas.ac.id

*Received* 9 September 2024 | *Revised* 18 Oktober 2024 | *Accepted* 28 Oktober 2024

## ABSTRAK

*Penelitian ini bertujuan menjelaskan prinsip-prinsip termodinamika-elektrokimia pada sel pembangkit listrik Direct Methanol Fuel Cell (DMFC). Investigasi parametrik Fuel Cell dilakukan untuk mensimulasikan perilaku kinerja sel dalam berbagai temperatur operasi. Sistem ini dimodelkan secara matematika dan disimulasikan serta hasilnya divalidasi dengan hasil teoritis dan eksperimental dari literatur. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan meningkatnya temperatur operasi sel pembangkit listrik akan menurunkan energi bebas Gibbs. Hal ini sesuai dengan persamaan termodinamika tentang energi Gibbs. Sedangkan kenaikan temperatur sel akan menaikkan tegangan reversibel dan output cell voltage serta akan menurunkan batas efisiensi maksimum fuel cell. Model yang dihasilkan juga menggambarkan adanya hubungan antara tegangan sel dengan energi bebas Gibbs. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh sel pembangkit listrik yang digunakan memiliki tegangan cell reversibel maksimum adalah sekitar 1,2 V pada 25°C dan batas efisiensi maksimum 96,6% pada 25°C dan minimum 95,2% pada 100°C.*

**Kata kunci:** *fuel cell, sel pembangkit listrik direct methanol, temperatur fuel cell, energi bebas Gibbs, tegangan reversibel, batas efisiensi maksimum*

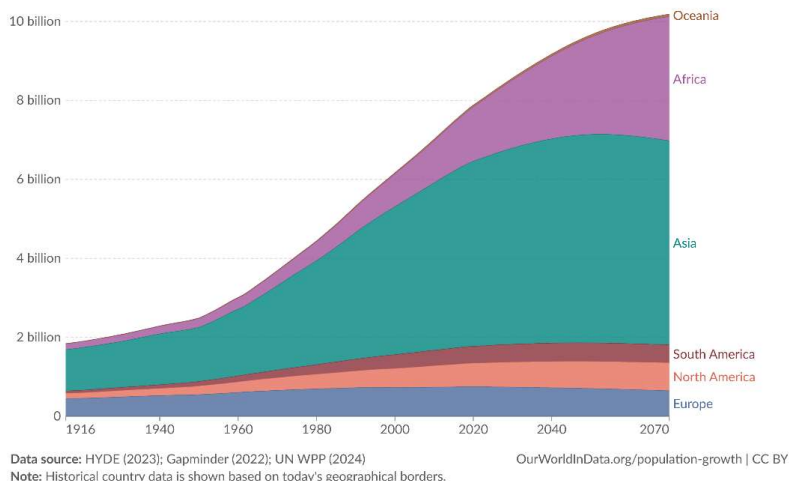
## ABSTRACT

*The purpose of this study is to explain the principles of thermodynamics-electrochemistry in Direct Methanol (DMFC) power generation. Fuel Cell parametric investigations were carried out to simulate the performance of cells under various operating temperatures. The system was modeled and simulated and then the results were validated with theoretical and experimental results from the literature. The simulation results show that with an increase in the operating temperature of the fuel cell will reduce Gibbs' free energy. This corresponds to Gibbs' energy thermodynamics equation. Meanwhile, an increase in the temperature of the cell will increase the reversible voltage and output cell voltage and will lower the maximum efficiency limit of the fuel cell. The resulting model also illustrates the relationship between cell voltage and Gibbs' free energy. Based on the simulation results, the maximum reversible cell voltage used is about 1.2 V at 25°C and the maximum efficiency limit is 96.6% at 25°C and minimum 95.2% at 100°C.*

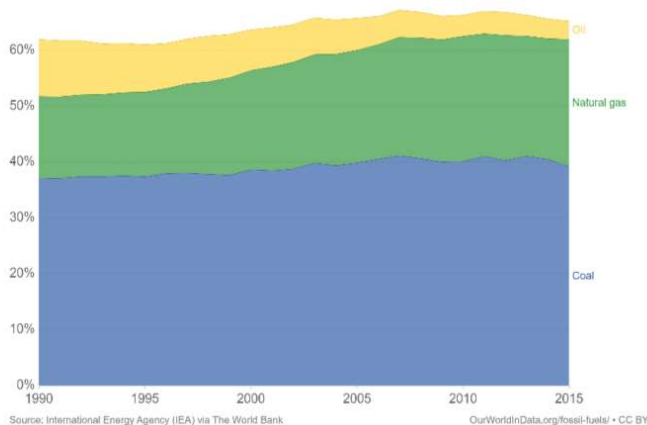
**Keywords:** *fuel cell, direct methanol fuel cell, temperature of fuel cell, Gibbs free energy, reversible voltage, maximum efficiency limit*

### 1. PENDAHULUAN

Populasi dunia telah meningkat dengan pesat, dan bahkan diperkirakan 30 tahun yang akan datang akan mencapai 10 miliar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 (Rosser, 2024). Peningkatan ini menuntut kemajuan teknologi yang secara efektif dapat memenuhi semua kebutuhan masyarakat. Namun, kemajuan teknologi membutuhkan sumber energi yang terus menerus dan berkelanjutan. Selama ini, dunia sangat bergantung pada bahan bakar fosil untuk memenuhi permintaan kebutuhan energi. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 (Ritchie, dkk, 2017), lebih dari 60% listrik dunia disuplai oleh pembakaran bahan bakar fosil. Batubara dianggap sebagai salah satu sumber bahan bakar yang paling melimpah, menyediakan sekitar 40% dari total produksi listrik; diikuti oleh gas alam, berkontribusi sekitar 20%; dan terakhir, minyak, berkontribusi sekitar 5 hingga 10%. Bahan bakar fosil dianggap sebagai sumber energi yang tidak terbarukan dan tidak ramah lingkungan, baik dari segi emisi dan gas rumah kaca yang dihasilkan (Musadi, dkk, 2024). Salah satu cara untuk mengatasi masalah keterbatasan sumber energi dan masalah lingkungan adalah dengan mengembangkan cara-cara baru untuk menghasilkan energi bersih yang berkelanjutan (Alkhalidi, dkk, 2022)( Hill, dkk, 2022).



Gambar 1. Populasi Dunia Berdasarkan Region (Rosser, 2024)

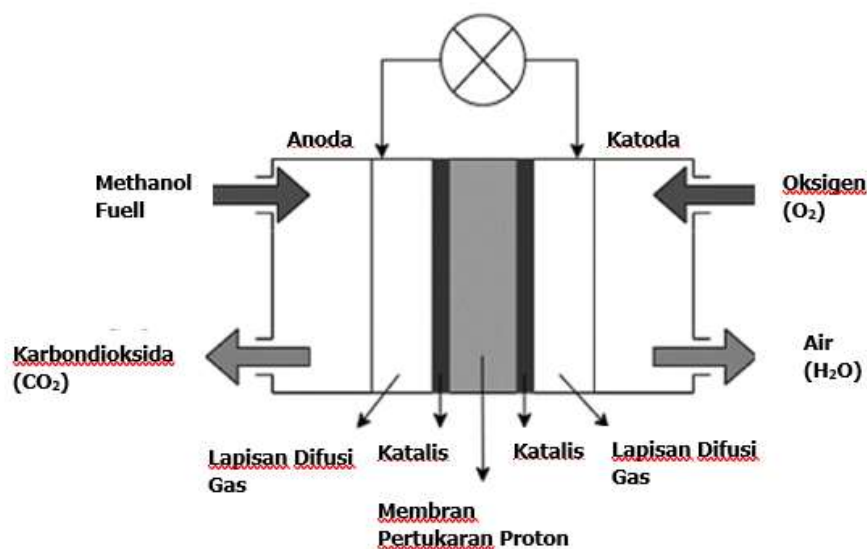


Gambar 2. Distribusi Bahan Bakar Fosil Untuk Energi (Ritchie, dkk, 2017)

Selama ini, beberapa negara telah memanfaatkan energi matahari, energi angin, dan tenaga air sebagai sumber energi terbarukan. Namun, jenis sumber energi ini umumnya berbeda dan menimbulkan kesenjangan antara ketersediaan energi dan kebutuhan pengguna. Untuk mengatasi hal ini perlu dikembangkan sistem energi yang dapat memproduksi energi / Listrik terus menerus **(Sun, dkk, 2019)**. Salah satu alternatif yang menjanjikan adalah melalui konversi energi kimia menjadi energi Listrik secara langsung melalui teknologi elektrokimia *fuel cell*. Teknologi ini memiliki efisiensi energi yang tinggi (96,7%) dan hampir tidak menghasilkan emisi (nihil) **(Purwanto, dkk, 2014)**.

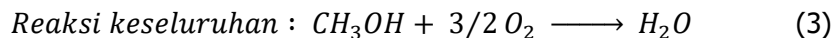
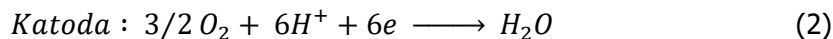
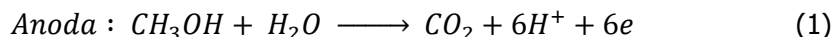
Komponen terpenting pada setiap *fuel cell* adalah *membrane electrode assembly (MEA)*, yang terdiri dari membran polimer, elektroda (anoda dan katoda), lapisan difusi gas (GDL), dan lapisan katalis (CL). Selama ini penelitian difokuskan pada pengembangan MEA, elektrolit dan pelat bipolar yang juga merupakan komponen terpenting dari *fuel cell* **(Ahmed, dkk, 2022)**. Adanya temperatur transisi pada DMFC telah dianalisis oleh Cheng, dkk sebagai akibat dari kinetika reaksi oksidasi methanol **(Cheng, dkk, 2020)**. Pada penelitian ini dilakukan analisis pengaruh temperatur terhadap karakteristik kinerja dasar *fuel cell* yang meliputi *Gibbs free energy*, *tegangan reversible* dan *ouput cell voltage*.

Sel pembangkit listrik *Direct Methanol* (DMFC) adalah jenis sel pembangkit listrik yang menggunakan metanol cair ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) sebagai bahan bakar dan membran pertukaran proton sebagai elektrolit. Struktur umum DMFC dapat dilihat pada Gambar 3 **(Breeze, 2014)** **(Ahmed, dkk, 2022)**, sedangkan reaksi kimia yang terjadi di dalam sistem DMFC dapat dilihat pada persamaan (1) – (3) **(Prapainainar, dkk, 2017)**. Secara umum, bahan bakar methanol teroksidasi dengan adanya air di lapisan katalis anoda, sehingga terjadi pelepasan elektron dan proton selama proses, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (1). Elektron kemudian bermigrasi melalui sirkuit eksternal ke Katoda. Sedangkan proton dipindahkan melalui membran elektrolit ke katoda. Proton dan elektron kemudian bereaksi dengan oksigen yang disuplai pada lapisan katoda katalis membentuk air, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (2) **(Breeze, 2014)** **(Ahmed, dkk, 2022)** **(Biswas, 2023)**.



**Gambar 3. Diagram Skematik DMFC (Ahmed, dkk, 2022).**

Reaksi yang terjadi dalam DMFC :



## 2. METODE

Pada penelitian ini dianalisis pengaruh temperatur *Fuel Cell* terhadap karakteristik kinerja dasar *Fuel Cell* yang meliputi *gravimetric and volumetric power densities of the cell*, *Gibbs free energy*, dan *tegangan reversibel*. *Fuel Cell* yang digunakan untuk pengukuran dan analisis memiliki data seperti yang diunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Data Teknis Fuel Cell (Ahmed, dkk, 2022)**

Parameter	Nilai
Deployment elevation	Up to 4000 m
Noise emission	<37 dB(A) at 1 m
Charging performance per day	600 Wh
Nilai daya	25 W
Output voltage	10 – 20 V DC
Berat	1,7 kg
Dimensi (p x l x t)	184 x 74 x 252 mm

### 2.1 Perhitungan Energi Bebas Gibbs

Dalam mempelajari semua jenis *fuel cell*, perhitungan energi bebas Gibbs sangat penting. Energi bebas Gibbs dapat didefinisikan sebagai energi yang tersedia untuk melakukan kerja, tanpa adanya kerja akibat perubahan tekanan dan/atau volume. Perubahan energi bebas Gibbs pembentukan memberi energi yang dibutuhkan yang dilepaskan dari sistem. Perubahan energi bebas Gibbs dihitung berdasarkan reaksi keseluruhan DMFC, Persamaan (3). Menurut Termodinamika, perubahan energi bebas Gibbs dapat dihitung dari Persamaan (4), berikut ini (Ince, dkk, 2019)

$$\Delta \bar{G}_f = \Delta \bar{h}_f - T \Delta \bar{S}_f \quad (4)$$

$$\Delta \bar{h}_f = -(\bar{h}_f)_{CH_3OH} - 3/2 (\bar{h}_f)_{O_2} + 2 (\bar{h}_f)_{H_2O} + (\bar{h}_f)_{CO_2} \quad (5)$$

$$\Delta \bar{S}_f = -(\bar{S}_f)_{CH_3OH} - 3/2 (\bar{S}_f)_{O_2} + 2 (\bar{S}_f)_{H_2O} + (\bar{S}_f)_{CO_2} \quad (6)$$

### 2.2 Perhitungan Tegangan Reversibel *Cell* dan Efisiensi Maksimum

Jika tidak ada kehilangan panas dalam *fuel cell* atau prosesnya reversibel, maka semua energi bebas Gibbs diubah menjadi energi listrik. Oleh karena itu, nilai energi bebas Gibbs digunakan untuk menghitung tegangan teoritis reversibel dengan persamaan (7) di bawah ini:

$$E = -\Delta \bar{G}_f z F \quad (7)$$

dimana  $F$  adalah tetapan Faraday dan  $z$  umlah mol elektrons per mol bahan bakar. Dalam DMFC,  $z$  sama dengan enam karena satu mol bahan bakar metanol setara dengan enam elektron, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (1).

Bahan bakar apabila dioksidasi (dibakar) akan menghasilkan energi, sehingga secara termodinamika efisiensi dapat ditentukan dengan membandingkan energi listrik yang dihasilkan dari *fuel cell* dengan panas yang dihasilkan pada proses pembakaran bahan bakar, Persamaan (8). Entalpi pembakaran dianggap sama dengan perubahan entalpi pembentukan yang hitung menggunakan Persamaan (5), sedangkan energi yang dihasilkan oleh *Fuel Cell* dapat diambil secara efektif dari perubahan energi bebas Gibbs, yang dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$\eta = \frac{\Delta \overline{G}_f}{\Delta \overline{h}_f} \times 100\% \quad (8)$$

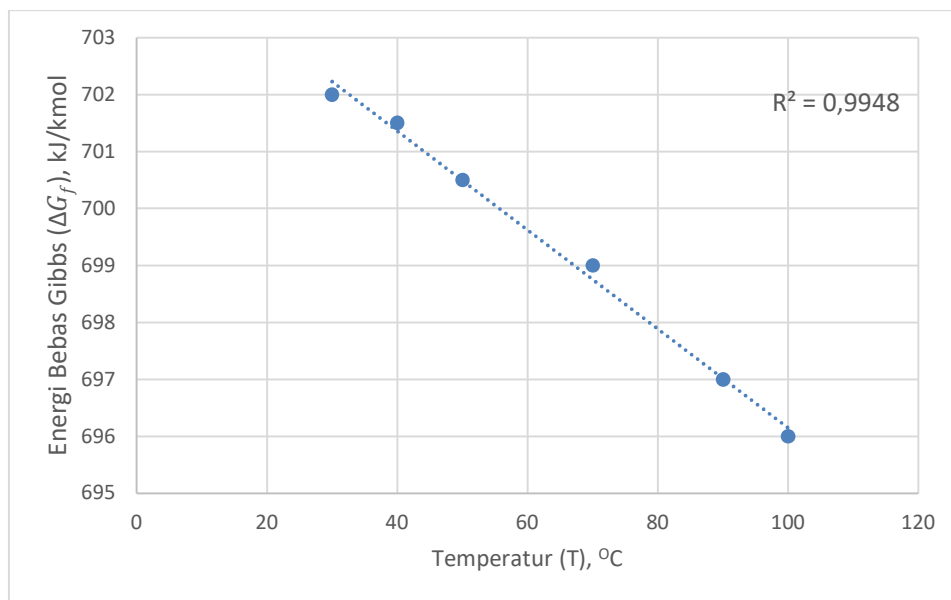
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian yang dilakukan mempelajari pengaruh temperature terhadap karakteristik kinerja dasar sel bahan bakar yang meliputi *gravimetric and volumetric power densities of the cell; Gibbs free energy, dan tegangan reversible*.

#### 3.1 Pengaruh Temperatur Terhadap Energi Bebas Gibbs

Gambar 4 menunjukkan Energi Bebas Gibbs menurun dengan naiknya temperatur, hal ini disebabkan adanya peningkatan entropi. Berdasarkan Persamaan (6), naiknya temperatur dan entropi mengakibatkan penurunan Energi Gibbs. Pengaruh temperatur terhadap energi bebas Gibbs ( $\Delta \overline{G}_f$ ) mengikuti persamaan berikut:

$$\Delta \overline{G}_f = 704,83 - 0,0869 T \quad (9)$$



**Gambar 4. Pengaruh Temperatur Terhadap Energi Bebas Gibbs**

Untuk menghindari agar sel tidak mengering maka disarankan temperatur operasi berkisar antara 25 – 100°C. Menurut Govindarasu, temperatur 333 K merupakan temperatur operasi optimal untuk mencapai kinerja yang produktif untuk DMFC dengan spesifikasi luas Membrane Electrode Assembly (MEA) area of 45 cm<sup>2</sup> dan menggunakan katalis Pt-Ru/C (**Govindarasu, dkk, 2012**).

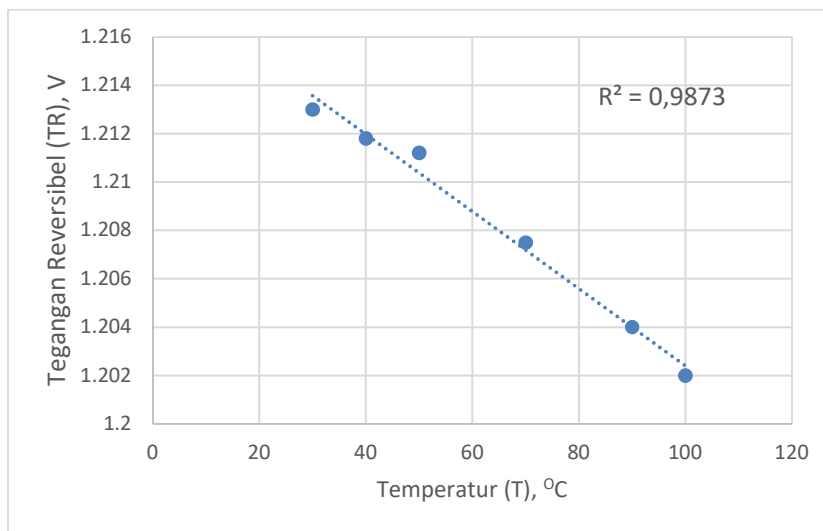
### 3.2 Pengaruh Temperatur Terhadap Tegangan Cell Reversibel

Hubungan tegangan *cell* reversibel dengan temperatur dan energi bebas Gibbs dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6. Tegangan meningkat dengan naiknya Energi bebas Gibbs. Di sisi lain, terdapat hubungan terbalik antara tegangan dan temperatur *cell*. Dengan kata lain, pada saat temperatur meningkat, tegangan *cell* reversibel berkurang secara linier. Hal ini sesuai dengan Persamaan (7), di mana peningkatan temperatur yang dikaitkan dengan peningkatan suhu  $T\Delta S$ , mengakibatkan menurunnya perubahan energi bebas Gibbs sehingga tegangan *cell* reversible pun akan menurun. Pengaruh temperatur terhadap tegangan reversible (TR) mengikuti Persamaan (10), sedangkan hubungan energi bebas Gibbs ( $\Delta\bar{G}_f$ ) dengan tegangan reversible (TR) mengikuti Persamaan (11)

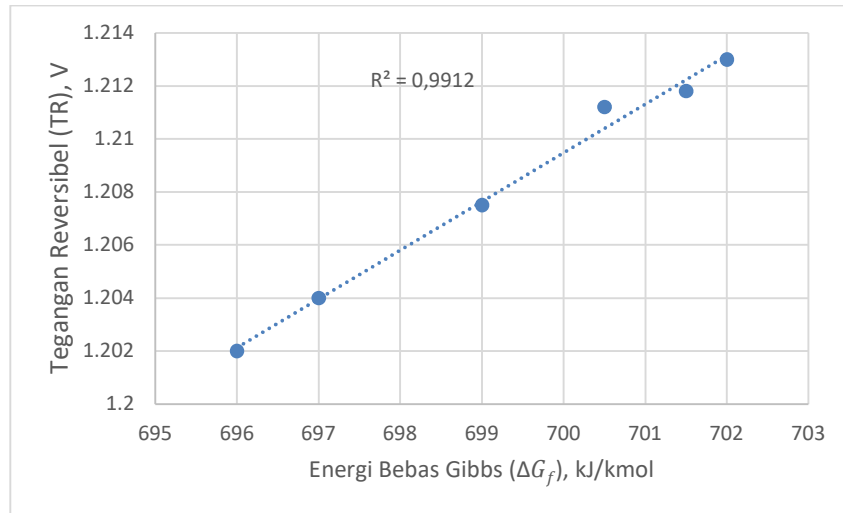
$$TR = -0,0002 T + 1,2184 \quad (10)$$

$$TR = 0,0018(\Delta G_f) - 0,0763 \quad (11)$$

Berdasarkan Gambar 5 dan 6, tegangan *cell* reversibel maksimum yang diperoleh adalah sekitar 1,2 V pada 25°C, hal ini sesuai dengan yang diperoleh dari studi model analitik DMFC di mana potensial termodinamika/reversibel standar sama dengan 1,214 V (**Rosenthal, dkk, 2012**)(**Fakourian, dkk, 2015**).



**Gambar 5. Pengaruh Temperatur Terhadap Tegangan Cell Reversibel**

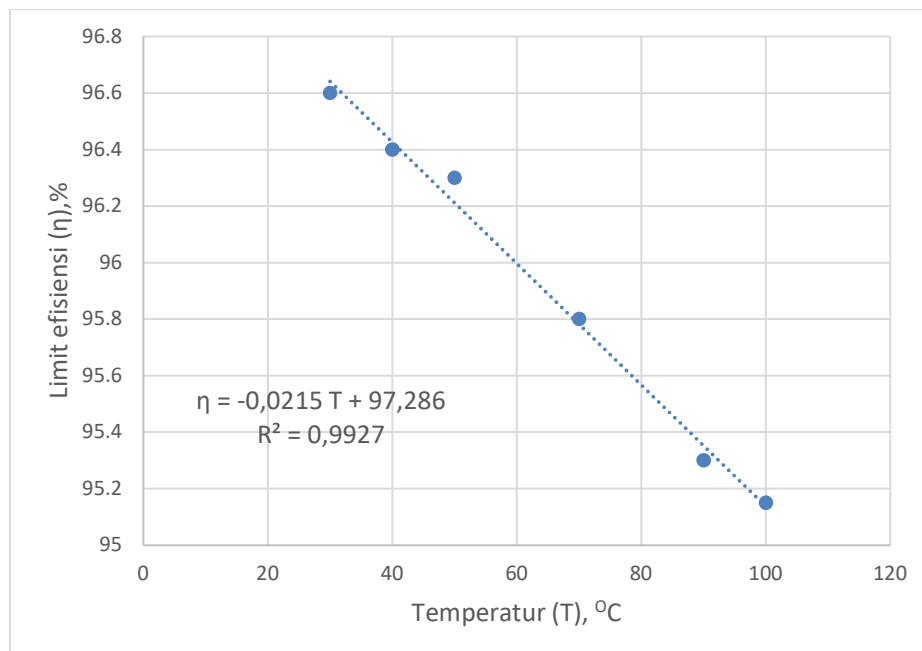


**Gambar 6. Hubungan antara Energi Bebas Gibbs dan Tegangan Cell Reversibel**

### 3.3 Pengaruh Temperatur Terhadap Efisiensi Maksimum

Efisiensi maksimum sistem DMFC dianalisis pada temperatur operasi yang berbeda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Pengaruh temperatur terhadap efisiensi maksimum ( $\eta$ ) mengikuti persamaan berikut: sebagai berikut:

$$\Delta\eta = -0,0215 T + 97,286 \quad (12)$$



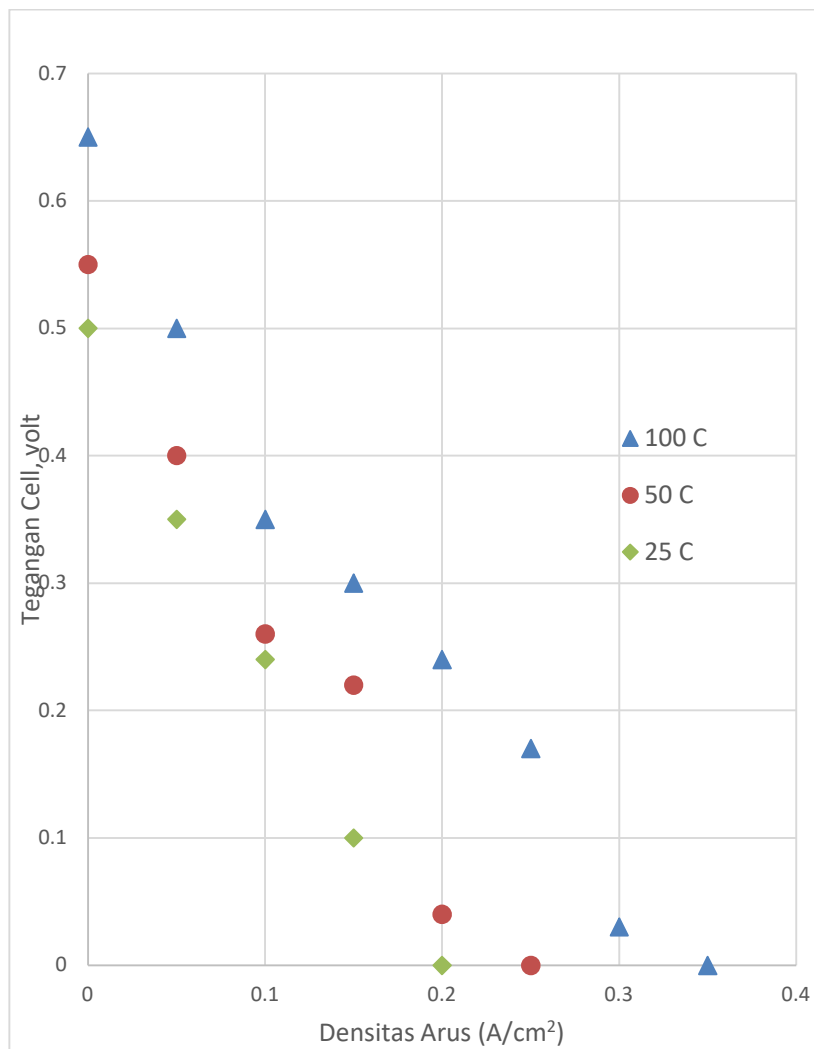
**Gambar 7. Pengaruh Temperatur Terhadap Limit Efisiensi**

*Sel* dapat mencapai batas efisiensi maksimum 96,6% pada 25°C dan minimum 95,2% pada 100°C. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur sebesar 75°C akan

mengakibatkan penurunan limit efisiensi sebesar 1,45%. Secara umum, ada korelasi negatif antara batas efisiensi sel bahan bakar dan temperatur. Penurunan efisiensi dengan temperatur dikaitkan dengan penurunan energi bebas Gibbs dengan peningkatan temperatur, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (7). Disamping itu, penurunan efisiensi atau kinerja *Cell* pada temperatur tinggi disebabkan terjadinya peningkatan fuel crossover. Hal ini akan mempermudah methanol untuk berdifusi menembus membrane sehingga jumlah methanol di katoda meningkat. Peningkatan ini mengakibatkan berkurangnya reaksi reduksi di katoda dan menghambat difusi gas ke katalis karena katoda terbasahi oleh methanol.

### 3.4 Pengaruh Temperatur Terhadap Output Cell Voltage

Gambar 8 menunjukkan efek peningkatan temperature terhadap output cell voltage. Terlihat jelas bahwa output cell voltage meningkat dengan naiknya temperatur. Hal ini disebabkan adanya peningkatan kinetika reaksi oksidasi methanol (Cheng, dkk, 2020) dan elektroda menjadi lebih reaktif sehingga akan meningkatkan densitas arus dan menurunkan *activation overpotentials*.



**Gambar 8. Pengaruh Temperatur Terhadap Output Cell Voltage**



#### 4. KESIMPULAN

Studi ini memberikan gambaran singkat tentang pengaruh temperature terhadap kinerja sel pembangkit listrik Direct Methanol (DMFC) yang meliputi perhitungan karakteristik kinerja dasar sel bahan bakar, seperti energi bebas Gibbs, tegangan reversible, limit efisiensi dan *output voltage cell*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketika temperatur meningkat, tegangan reversible dan limit tegangan cell akan menurun karena adanya penurunan energi bebas Gibbs. Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi kenaikan arus listrik dengan adanya kenaikan temperatur. Sel Pembangkit listrik *Direct Methanol* yang digunakan memiliki tegangan cell reversibel maksimum adalah 1,2 V pada 25°C dan batas efisiensi maksimum 96,6% pada 25°C dan minimum 95,2% pada 100°C dan menghasilkan tegangan cell 0,5 – 0,65 volt, densitas arus 0,2 – 0,35 A/cm<sup>2</sup>.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Ahmed, A.A., Labadidi, M.A., Hamada, A.T., & Orhan, M.F. (2022). Design and Utilization of a Direct Methanol Fuel Cell. *Membranes*, 12, 1266 <https://doi.org/10.3390/membranes12121266>
- Alkhalidi, A., Alqarra, K., Abdelkareem, M.A., & Olabi, A.G. (2022). Renewable Energy Curtailment Practices in Jordan And Proposed Solutions. *Int. J. Thermofluids*, 16, 100196 <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100196>. VolumeISSN 2666-2027
- Biswas, M., & Wilberforce, T. (2023). Dynamic Thermal Model Development ff Direct Methanol Fuel Cell. *Int. J. Thermofluids*, 17, 100294 <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100294>
- Breeze, P.(2014). Fuel Cells., *Power generation technologies (2nd ed.)*, Boston : Newnes, 129-152 <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098330-1.00007-7>
- Cheng, Y., Zhang, J., Lu, S.& Jiang, S.P. (2020). Significantly Enhanced Performance of Direct Methanol Fuel Cells at Elevated Temperatures. *J. Power Sources*, 450, 227620. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227620>
- Fakourian, Sh., Kalbasi, M., & Hasani-Sadrabadi, M.M. (2015). A Simple Analytical Model of a Direct Methanol Fuel Cell. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 12(5).
- Govindarasu, R.& Somasundaram, S. (2020). Studies on Influence of Cell Temperature in Direct Methanol Fuel Cell Operation. *Processes*, 8(3), 353 <https://doi.org/10.3390/pr8030353>
- Hill, D., Martin, A., Martin-Nelson, N., Granger, C., Memmott, M., Powell, K., & Hedengren, J. (2022). Techno-Economic Sensitivity Analysis for Combined Design and Operation of A Small Modular Reactor Hybrid Energy System. *Int. J. Thermofluids*, 16, 100191.
- Ince, A.C., Karaoglan, M.U., Glösen, A., Colpan, C.O., Müller, M., & Stolten, D. (2019). Semiempirical Thermodynamic Modeling of A Direct Methanol Fuel Cell System. *International Journal Energy Research*, 1–15. DOI: 10.1002/er.4508

- Musadi, M.R., Salma, S., Rozada, F., Annisaa, N.R., Lucyana, A., Faulina, F., & Khalid, F. (2024). Investigation of the Effects of Temperature and Catalyst on the Liquid Products of Waste Lubricant Oil Catalytic Pyrolysis. *Faculty of Industrial Technology International Congress (FOITIC)*, (pp. 1 – 10). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448401001>
- Prapainainar, P., Dua, Z., Kongkachuichaya, P., Holmes, S.M., & Prapainainar, C. (2017). Mordenite/Nafion and Analcime/Nafion Composite Membranes Prepared by Spray Method for Improved Direct Methanol Fuel Cell Performance. *Applied Surface Science*, 421 (Part A), 24-41 <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.02.004>
- Purwanto, W.P., Slamet, Rifki, M., Hayatina, I., Theresa, T., Priyanggoro, P., Pattyranie, S.P., Verina, J.W.D, & Rochani, S. (2014). Pengembangan Prototipe Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) dan Pengaruh Kandung Nafion Membrane Electrode Assembly (MEA). *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, 7(2), 792 -797
- Ritchie, H., & Roser, M. (2017, Oktober 2). *Fossil Fuels*. <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>
- Rosenthal, N., Vilekar, S. & Datta, R.(2012) A Comprehensive Yet Comprehensible Analytical Model for The Direct Methanol Fuel Cell. *J. Power Sources*, 206, 129–143 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.080>Get rights and content
- Roser, M., Ritchie, H. & Ortiz-Ospina. (2024, Juli 1). *World Population Growth*. [Population by world region \(ourworldindata.org\)](https://ourworldindata.org/population-by-world-region).
- Sun, C., Negro, E., Vezzù, K., Pagot, G., Cavinato, G., Nale, A., Bang, Y.H., & Di Noto, V. (2019). Hybrid Inorganic-Organic Proton-Conducting-Conducting Membranes Based on SPEEK Doped with WO<sub>3</sub> Nanoparticles for Application in Vanadium Redox Flow Batteries. *J. Electrochim. Acta*, 309, 311–325.