

Pengaruh Temperatur Air Terhadap Produksi Hidrogen (H₂) Metode Proton Exchange Membrane (PEM) *Electrolyzer*

Nurul Shafiqah Yacub^{1*}, Laode Naufal Rauf Mongkita², Suryanto³, Chandra Bhuana⁴

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar 90245, Indonesia
*nurulshafiqahyacub@gmail.com

Abstract: Fossil energy is still widely used in Indonesia to this day. Its continuous use causes serious environmental impacts. New energy sources, such as hydrogen, have emerged as a solution to address the ecological damage caused by fossil fuels. The unique properties of hydrogen make it an excellent fuel. This research aimed to determine the effect of water temperature on the performance of the PEM Electrolyzer and to develop a hydrogen generator design using Membrane Electrode Assembly (MEA). The research used the Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyzer water electrolysis method by varying the voltage, water temperature, and DC supply from a DC power supply with PWM as the current regulator. The performance of the hydrogen generator is highly influenced by the incoming water temperature. The application of Membrane Electrode Assembly (MEA) provides excellent performance in the PEM Electrolyzer. The highest performance value, 263.76%, was achieved when the current reached 7.59 A, with the water temperature at 30°C, making 30°C the optimal temperature for the PEM Electrolyzer to operate. However, when the water temperature reached its highest point at 60°C, system instability occurred, marked by a decrease in device performance to 83.28%. Furthermore, the high temperature caused swelling in the main component of the PEM Electrolyzer, the Membrane Electrode Assembly (MEA), which led to a reduction in hydrogen production.

Keywords: Hydrogen; hydrogen generator; PEM Electrolyzer

Abstrak: Energi fosil masih banyak digunakan di Indonesia sampai saat ini. Penggunaannya yang terus menerus menimbulkan dampak serius terhadap lingkungan. Energi baru seperti hidrogen hadir menjadi solusi dalam menghadapi dampak kerusakan lingkungan akibat energi fosil. Sifat unik hidrogen menjadikannya bahan bakar yang sangat baik. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh temperatur air terhadap performa PEM Electrolyzer dan mengetahui rancangan generator hidrogen menggunakan Membrane Electrode Assembly (MEA). Penelitian yang dilakukan menggunakan proses elektrolisis air metode Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyzer dengan memvariasikan tegangan, temperatur air, dan arus DC yang bersumber dari *power supply* DC dengan PWM sebagai pengatur arusnya. Nilai performa generator hidrogen sangat dipengaruhi oleh temperatur air yang masuk. Penggunaan Membrane Electrode Assembly (MEA) memberikan performa yang sangat baik pada PEM Electrolyzer. Nilai performa tertinggi sebesar 263.76% saat arus tertinggi 7.59 A dan temperatur air di angka 30°C yang menjadikan temperatur 30°C merupakan temperatur yang optimal untuk PEM Electrolyzer bekerja. Adapun pada saat temperatur air berada pada nilai tertinggi yaitu 60°C terjadi ketidakstabilan sistem ditandai dengan berkurangnya performa alat yang mencapai angka 83.28%. Selain itu, temperatur tinggi menjadi penyebab terjadinya pembengkakan pada komponen utama PEM Electrolyzer yaitu Membrane Electrode Assembly (MEA) sehingga produksi hidrogen menurun.

Kata kunci : Hidrogen; generator hidrogen; PEM Electrolyzer

I. PENDAHULUAN

Penggunaan minyak bumi dapat menimbulkan kelangkaan energi fosil. Selain itu, penggunaan energi fosil secara terus menerus akan menimbulkan dampak serius terhadap lingkungan seperti polusi, efek gas rumah kaca hingga pemanasan global[1]. Dalam menghadapi dampak kerusakan lingkungan akibat energi fosil, energi baru terbarukan (EBT) menjadi salah satu solusi untuk menjaga lingkungan. Berdasarkan data pelaporan manajemen energi (POME) pada tahun 2022 konsumsi energi pada sektor penyedia energi masih di dominasi oleh penggunaan energi fosil dengan persentase secara berturut-turut antara lain batu bara(69%), gas (20%), BBM (6%), EBT(2,9%) dan Listrik (0,98%) [2].

Hidrogen adalah salah satu energi baru yang di kembangkan untuk mencapai *Net Zero Emissions* (NZE). Sifat unik hidrogen menjadikannya bahan bakar yang sangat baik[3].Elektrolisis air merupakan salah satu cara untuk mendapatkan hidrogen. Metode *Proton Exchange Membrane* (PEM)

Electrolyzer merupakan salah satu metode elektrolisis air dimana air dipecah menjadi hidrogen dan oksigen pada masing-masing elektroda, oksigen di anoda dan hidrogen di katoda seperti yang telah dilakukan oleh Kumar dan Himabindu [4], membuat PEM *Electrolyzer* dengan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) sebagai komponen utama yang berfungsi sebagai pengantar proton (H^+).

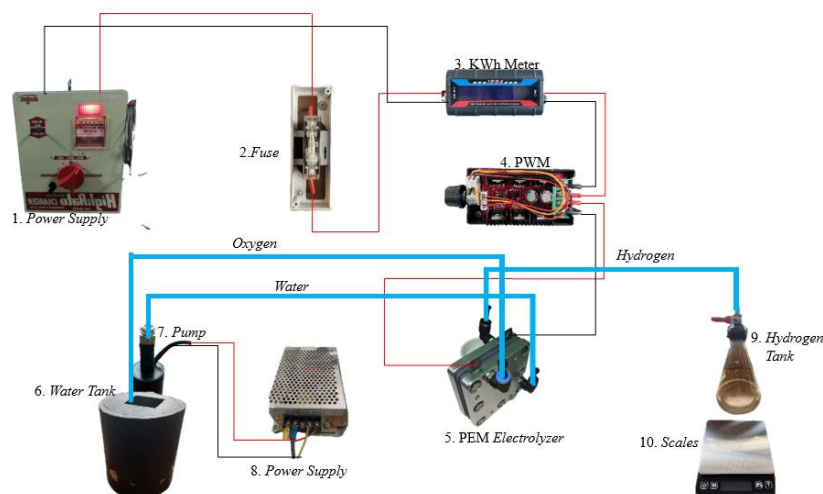
Proses produksi hidrogen menggunakan PEM *Electrolyzer* sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor operasional, salah satunya adalah temperatur air [5-6]. Pada penelitian yang dilakukan oleh Masdar [7], pengaruh temperature air diuji dengan memanaskan air pada suhu yang berkisar antara 25°C hingga 80°C dan didapatkan hasil bahwa peningkatan temperatur dapat mempercepat reaksi elektrokimia, meningkatkan mobilitas ion, dan mengurangi resistansi ohmik, sehingga meningkatkan produksi hidrogen.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur air terhadap produksi hidrogen menggunakan metode PEM *Electrolyzer* dengan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) sebagai komponen utamanya, yang diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan teknologi hidrogen yang lebih efisien dan berkelanjutan.

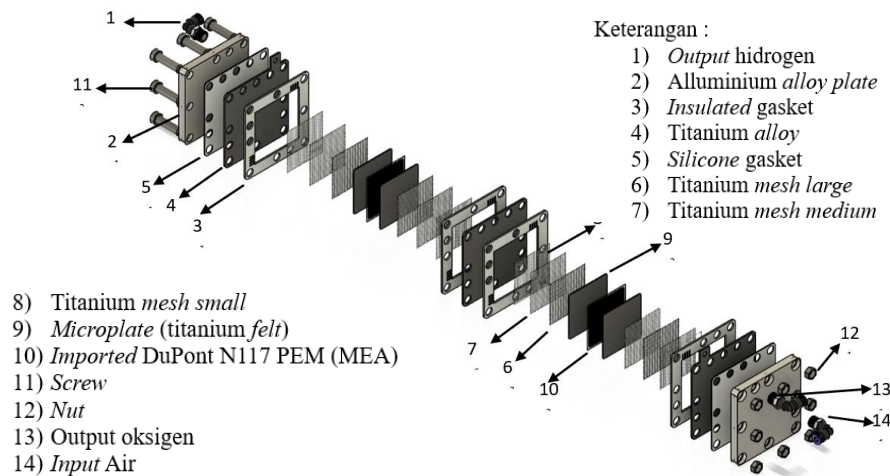
II. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, metode eksperimental (experimental research) digunakan untuk menguji performa generator hidrogen. Proses ini menggunakan pemisahan elemen air pada PEM *Electrolyzer* dan menggunakan tegangan DC dari power supply. Sebelum energi listrik memasuki sistem, energi tersebut perlu melewati pengaman (fuse). *Fuse* berfungsi sebagai perangkat yang melindungi seluruh rangkaian dari kemungkinan kerusakan akibat lonjakan arus listrik. Setelah melewati fuse, energi listrik diukur oleh KWh meter. Alat ini mencatat jumlah energi yang dikonsumsi, tegangan dan arus listrik. Data yang dihasilkan oleh KWh meter memberikan informasi tentang jumlah energi listrik yang diperlukan untuk menghasilkan hidrogen. Untuk mengatur arus listrik yang digunakan, diperlukan PWM (Pulse Width Modulation) agar arus listrik yang masuk ke generator dapat disesuaikan untuk keperluan penelitian. Tahap terakhir dari rangkaian ini adalah menghubungkan generator hidrogen dengan sumber listrik untuk menghasilkan hidrogen.

Pengujian PEM *Electrolyzer* dilakukan dengan memvariasikan tegangan input mulai dari 6 Volt, 7 Volt, 8 Volt, 9 Volt, 10 Volt, dan 11 Volt kemudian menentukan tegangan optimal dari generator hidrogen dengan kondisi arus konstan di 4A. Selanjutnya dilakukan variasi arus input generator hidrogen mulai dari 2A, 3A, 4A, 5A, 6A, dan 7A dengan kondisi tegangan konstan di 8 Volt. Terakhir, dilakukan variasi tegangan dan arus input dengan temperatur air yang berbeda mulai dari 20°C, 25°C, 30°C, 50°C, dan 60°C.



Gambar 1. Skema Penelitian PEM *Electrolyzer*



Gambar 2. Konstruksi PEM Electrolyzer

MEA terdiri dari membran penghantar proton yang dilapisi lapisan katalis, dan lapisan difusi gas. Membran ini memisahkan anoda dan katoda, tetapi memungkinkan proton untuk berpindah melaluinya. Bahan-bahan yang umumnya digunakan dalam MEA pada PEM Electrolyzer meliputi berbagai jenis polimer perfluorosulfonat, seperti Nafion Fumapem, dan Flemion. Namun, yang paling umum digunakan adalah membran Nafion (Nafion 115, 117, dan 212).

PEM Electrolyzer pada penelitian ini menggunakan Membrane Electrode Assembly (MEA) jenis Nafion N-117 ($C_7HF_{13}O_5S.C_2F_4$) yang berfungsi sebagai penghantar proton menuju sisi katoda. Nafion N-117 dipilih karena konduktivitas protonnya yang tinggi dan tahan terhadap suhu tinggi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengamatan dan Pengujian

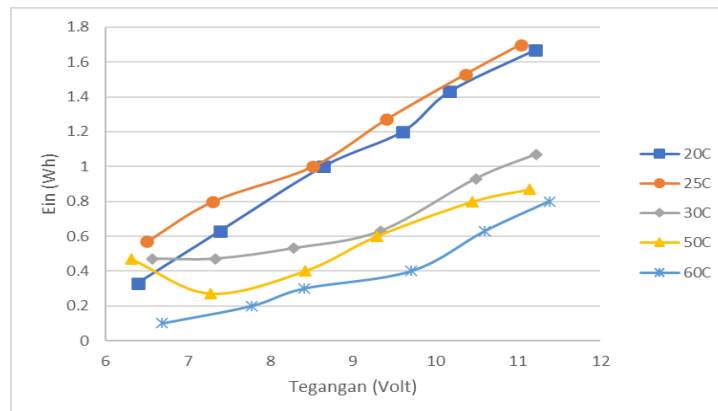
Tahap awal pengujian dilakukan dengan memvariasikan tegangan kerja antara 6 hingga 11 Volt pada keadaan temperatur air normal ($30^{\circ}C$) dan arus konstan pada 4A. Hasil pengujian tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian PEM Electrolyzer Dengan Arus Konstan dan Variasi Tegangan

No.	E_{in} (Wh)	Ah	Tegangan (Volt)	Arus (A)	Massa
1	0,47	0,076	6,57	4,22	0,037
2	0,47	0,062	7,33	4,42	0,043
3	0,53	0,058	8,28	4,27	0,08
4	0,63	0,072	9,34	4,5	0,043
5	0,93	0,09	10,49	4,47	0,043
6	1,07	0,103	11,22	4,48	0,033

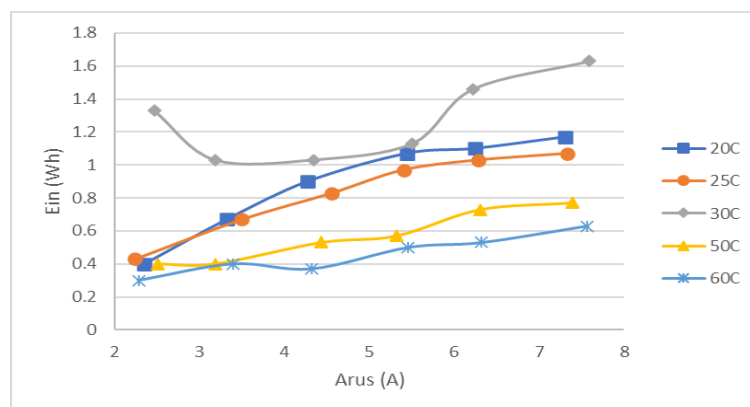
Dari pengujian pertama ini, diperoleh hasil bahwa tegangan optimal untuk generator hidrogen adalah 8 Volt. Temuan ini menjadi dasar penelitian yang kami lakukan, di mana tegangan 8 Volt dipilih karena menghasilkan produksi hidrogen yang lebih optimal.

B. Energi Input PEM *Electrolyzer*



Gambar 3. Grafik Hubungan Antara Tegangan dan Energi Input dengan Arus Konstan

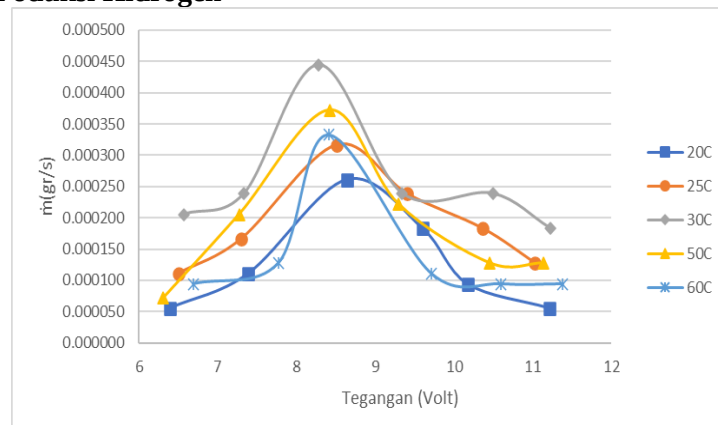
Gambar 3 menunjukkan pada suhu rendah, yaitu 20°C dan 25°C, energi input meningkat secara linear seiring dengan kenaikan tegangan, menunjukkan bahwa sistem bekerja secara efisien. Pada suhu 30°C, peningkatan energi input lebih rendah dibandingkan suhu 20°C dan 25°C, karena proses elektrolisis berlangsung lebih cepat. Namun, pada suhu 50°C, energi input menunjukkan ketidakstabilan, yang mungkin disebabkan oleh ketidakstabilan termal dalam sistem. Pada suhu tertinggi, yaitu 60°C, energi input mencapai nilai terendah, karena kecepatan elektrolisis yang sangat cepat jika dibandingkan dengan suhu lain.



Gambar 4. Grafik Hubungan Antara Arus dan Energi Input dengan Tegangan Konstan

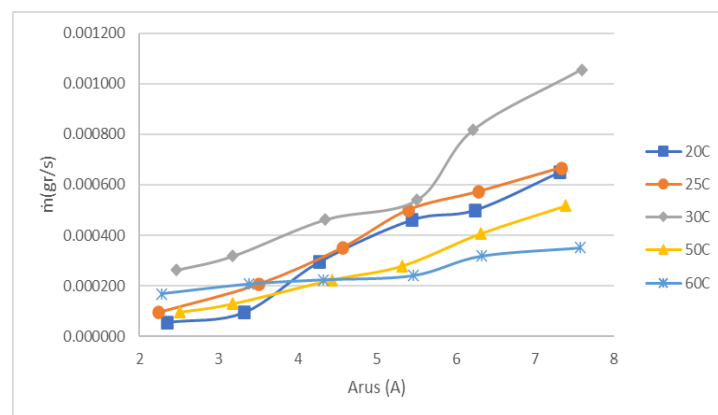
Gambar 4 menunjukkan pada suhu rendah, yaitu 20°C dan 25°C, energi input meningkat secara bertahap seiring dengan kenaikan arus, menunjukkan stabilitas sistem dan kebutuhan energi yang sesuai dengan peningkatan arus. Pada suhu 30°C, terjadi penurunan energi input sebelum kembali meningkat, menunjukkan adanya optimalisasi kinerja pada rentang arus 5A hingga 7A. Pada suhu 50°C dan 60°C, energi input juga meningkat seiring meningkatnya arus, namun menunjukkan ketidakstabilan pada titik tertentu. Pada suhu tertinggi, yaitu 60°C, energi input mencapai nilai terendah dibandingkan suhu lainnya karena proses elektrolisis berlangsung lebih cepat.

C. Mass Flowrate Produksi Hidrogen



Gambar 5. Grafik Hubungan Antara Tegangan Terhadap Laju Produksi Aliran Gas Hidrogen dengan Arus Konstan

Gambar 5 menunjukkan bahwa setiap suhu memiliki tegangan optimal dimana laju aliran hidrogen mencapai puncaknya sebelum menurun meskipun tegangan terus meningkat. Pada suhu 30°C, laju aliran hidrogen mencapai puncaknya pada tegangan 8 Volt dengan arus konstan 4A, yang menunjukkan kondisi optimal untuk produksi hidrogen. Pada suhu yang lebih rendah, yaitu 20°C dan 25°C, puncak aliran hidrogen juga terjadi pada tegangan 8 Volt, tetapi dengan laju aliran yang lebih rendah, menandakan aktivitas elektrokimia yang kurang efisien. Sebaliknya pada suhu yang lebih tinggi, yaitu 50°C dan 60°C, laju aliran hidrogen menurun lebih tajam setelah mencapai puncaknya, terutama pada suhu 60°C yang disebabkan oleh degradasi material.

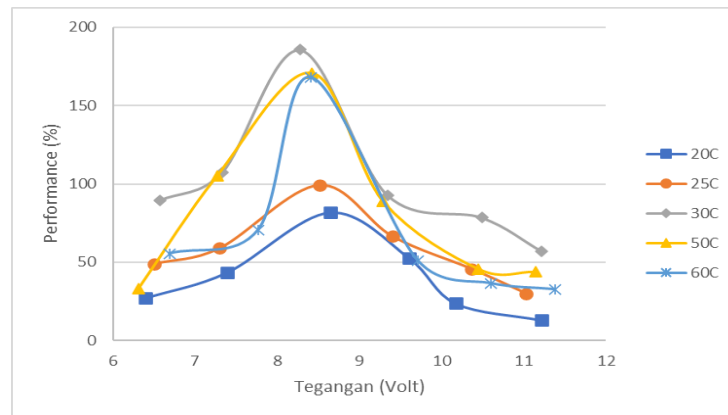


Gambar 6. Grafik Hubungan Antara Arus Terhadap Laju Produksi Aliran Gas Hidrogen dengan Tegangan Konstan

Gambar 6 menunjukkan pada suhu 30°C, laju aliran gas hidrogen meningkat paling signifikan dibandingkan dengan suhu lainnya, menunjukkan bahwa suhu ini merupakan kondisi optimal untuk beroperasi, karena pada suhu 30°C, reaksi elektrokimia berlangsung efisien tanpa menyebabkan kelebihan panas yang mengganggu produksi hidrogen. Pada suhu 20°C dan 25°C, laju alir gas hidrogen meningkat namun, kenaikannya lebih lambat dan jumlah hidrogen yang dihasilkan lebih sedikit karena proses elektrolisis berlangsung lebih lambat pada suhu rendah. Pada suhu yang lebih tinggi, yaitu , yaitu 50°C dan 60°C, laju gas hidrogen mulai menurun pada arus tinggi. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh degradasi material pada suhu tinggi, yang mengakibatkan penurunan produksi hidrogen karena melampaui batas operasional material. Oleh karena itu, semakin tinggi arus yang

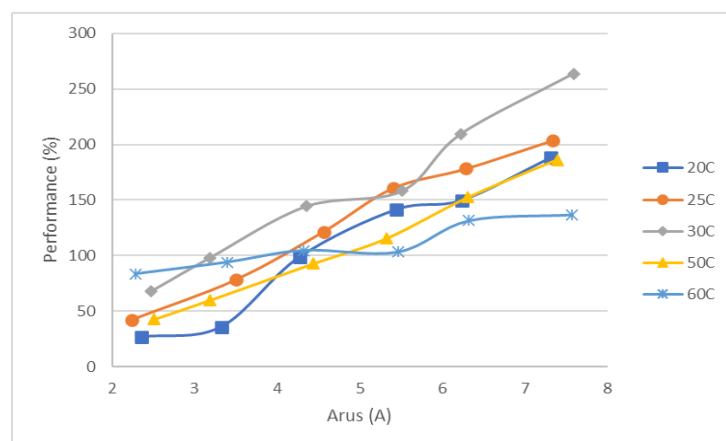
digunakan, semakin optimal sistem bekerja dalam memproduksi hidrogen, tetapi harus memperhatikan batas suhu material agar sistem tetap stabil.

D. Performa PEM *Electrolyzer*



Gambar 7. Grafik Hubungan Antara Tegangan Terhadap Performa PEM *Electrolyzer* dengan Arus Konstan

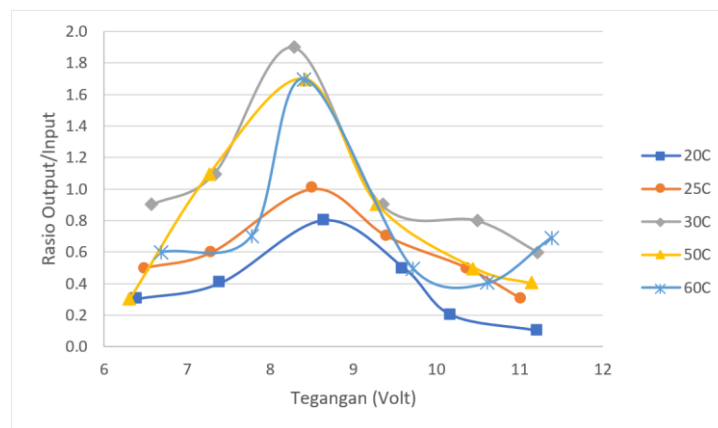
Gambar 7 menunjukkan pada suhu 20°C, performa meningkat seiring dengan kenaikan tegangan, mencapai puncak pada 8,64V dengan performa 81,82%, ini menunjukkan bahwa pada suhu rendah, sistem memerlukan tegangan tertentu untuk mencapai performa optimal. Pada suhu 25°C, performa sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan 20°C, mengindikasikan bahwa peningkatan suhu membantu, meski belum cukup optimal. Pada suhu 30°C, performa terbaik dicapai, yaitu pada puncak tegangan 8,28V dan nilai performa 185,61%. Ini menandakan bahwa 30°C adalah suhu optimal untuk performa tertinggi dalam elektrolisis, dengan performa maksimal pada tegangan sekitar 8V. Pada suhu 50°C, performa mulai menurun dibandingkan dengan 30°C, meskipun ada peningkatan performa di awal, namun setelah tegangan 8V, terjadi penurunan lebih cepat, menandakan gangguan stabilitas pada suhu tinggi. Pada suhu 60°C, performa lebih rendah dari pada suhu 50°C, menunjukkan bahwa suhu terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi material atau komponen seperti membran pada proses elektrolisis.



Gambar 8. Grafik Hubungan Antara Arus Terhadap Performa PEM *Electrolyzer* dengan Tegangan Konstan

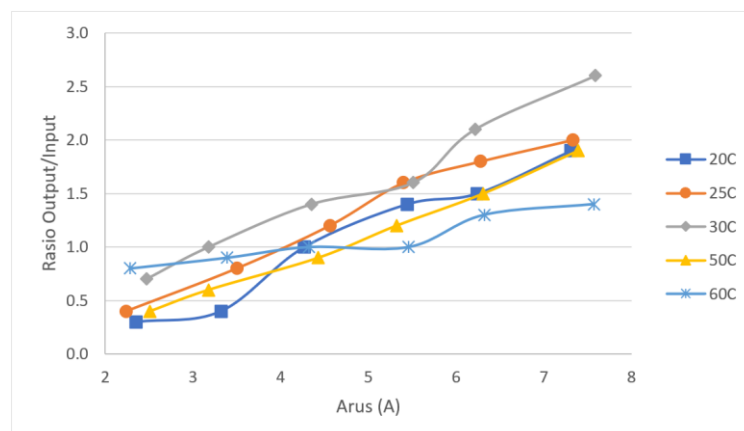
Gambar 8 menunjukkan pada suhu 20°C, performa sistem meningkat perlahan dengan kenaikan arus, mencapai nilai 187,99% pada arus 7,31A, namun menunjukkan bahwa sistem tidak beroperasi optimal pada suhu rendah karena laju reaksi elektrolisis yang rendah. Pada suhu 25°C, performa meningkat hingga mencapai nilai 103,68% pada arus 7,33A, menunjukkan bahwa peningkatan suhu membantu memperbaiki performa elektrolisis. Pada suhu 30°C menunjukkan performa terbaik pada arus 7,59A hingga mencapai nilai performa 263,76%, menandakan suhu ini optimal untuk elektrolisis dengan performa maksimal. Namun, pada suhu 50°C, performa mulai menurun, kemungkinan akibat efek termal yang mengganggu stabilitas sistem. Pada suhu 60°C, performa terus menurun dan hanya mencapai nilai 136,96% pada arus 7,57A, yang mungkin disebabkan oleh kerusakan komponen akibat suhu terlalu tinggi.

E. Rasio Output/Input PEM *Electrolyzer*



Gambar 9. Grafik Hubungan Antara Tegangan dan Rasio Output/Input dengan Arus Konstan

Gambar 9 menunjukkan pada suhu 20°C, rasio output/input relatif rendah dan mulai meningkat pada tegangan 8V, namun performa menurun drastis setelah itu. Pada suhu 25°C menunjukkan peningkatan rasio hingga mencapai nilai 1, namun masih membutuhkan banyak energi untuk mencapai output yang signifikan. Suhu 30°C menghasilkan performa terbaik dengan rasio output/input mencapai nilai 1,9 pada tegangan 8,28V, menjadikannya suhu optimal untuk elektrolisis. Pada suhu 50°C, rasio mencapai nilai 1,7 namun performa mulai menurun akibat panas berlebih, sedangkan pada suhu 60°C, performa menurun drastis setelah tegangan optimal tercapai, menunjukkan bahwa pada suhu tinggi menyebabkan kerusakan material dan menurunkan stabilitas sistem.



Gambar 10. Grafik Hubungan Antara Arus dan Rasio Output/Input dengan Tegangan Konstan

Gambar 10 menunjukkan pada suhu 20°C, rasio output/input meningkat secara bertahap hingga mencapai 1,9 pada arus 7,31 A, menunjukkan pengaruh arus terhadap peningkatan rasio. Suhu 25°C menunjukkan performa yang lebih baik dengan peningkatan rasio yang konsisten. Suhu 30°C menghasilkan rasio tertinggi sebesar 2,6 pada arus 7,59 A, menjadikannya suhu optimal untuk elektrolisis. Pada suhu 50°C, performa menurun dengan rasio output/input mencapai 1,9, lebih rendah dibandingkan suhu 30°C. Pada suhu 60°C, rasio menurun secara signifikan hingga 1,4, menandakan bahwa suhu tinggi menyebabkan penurunan performa akibat potensi kerusakan material.

F. Nafion N-117 Pada PEM *Electrolyzer*

Dalam penelitian ini Nafion N-117 digunakan karena memiliki kemampuan yang tahan terhadap kondisi operasi suhu tinggi. Namun, selama pengujian MEA mengalami kerusakan pada suhu 70°C ditandai dengan tidak meningkatnya arus dan rendahnya produksi hidrogen. Kerusakan ini menunjukkan ketidakstabilan kinerja MEA pada suhu tinggi. Kerusakan MEA juga ditandai dengan pembengkakan MEA dan terdapat lubang kecil akibat suhu tinggi, sehingga memerlukan analisis lebih lanjut untuk memahami penyebabnya.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan data yang telah diperoleh dari hasil pengujian alat maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Temperatur air memiliki pengaruh yang signifikan terhadap produksi hidrogen dalam PEM *Electrolyzer*, dengan suhu 30°C sebagai suhu optimal dengan tegangan 8V dengan arus 7A dengan nilai produksi 0,001056 gr/s. Temperatur air yang terlalu rendah sampai 20°C atau terlalu tinggi sampai 70°C dapat menurunkan performa produksi dan bahkan suhu yang terlalu tinggi menyebabkan kerusakan pada MEA.
- 2) Penggunaan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) N-117 dalam generator hidrogen memberikan performa yang lebih baik terhadap PEM *Electrolyzer* pada suhu 30 °C, namun penggunaan pada suhu tinggi dapat merusak MEA yang mengakibatkan tidak optimalnya performa PEM *Electrolyzer*. Penggunaan MEA berlapis ganda pada PEM *Electrolyzer* memberikan luas permukaan elektroda yang lebih luas dan dapat mendukung reaksi elektrokimia dan produksi hidrogen jika dibandingkan dengan MEA lapis tunggal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Luo and D. Wu, "Environment and Economic Risk : An Analysis of Carbon Emission Market and Portofolio Management". *Enviromental Research*, 297-301, 2016.
- [2] R. Indonesia, "Statistik Minyak dan Gas Bumi Direktorat Minyak dan Gas Bumi", Jakarta : Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 23 Mei 2023, [Online]. Tersedia: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/kementerian-esdm-terbitkan-heesi-2022#:~:text=Pada%20tahun%202022%2C%20sektor%20industri%20mempunyai%20share%20tertinggi,konsumsi%20batubara%20domestik%20di%20sektor%20industri%20dan%20smelter.>
- [3] O. Arjasa, "Aplikasi Proton Exchange Membrane Fuel Cell untuk Peralatan Elektrokimia Berbahan Bakar Gas Hidrogen". *ACADEMIA*, 2009.
- [4] S. Kumar and V. Himabindu, "Hydrogen Production by PEM Water Electrolysis", *Materials Science for Energy Technologies*, 442-454, 2019.
- [5] W. Liu, "Effect of Temperature on Proton Conductivity of a Nafion Membrane", *Petroleum Science*, 765-772, 2019.
- [6] Y. Wang, "Effects of Current Density on Performance and Efficiency of a Proton Exchange Membrane Water Electrolyzer", *International Journal of Hydrogen Energy*, 3041-3050, 2020.
- [7] M.S. Masdar. 2023. "Parametric Study and Electrocatalyst of Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Electrolysis Performance", *National Library of Medicine*, 560, 2023.