

Experimental study of green hydrogen production applied to gasoline engines with brake load capacity 0,25 kg/cm²

Ahmad Ilham Wicaksono^a, Suci Rahmadhani Irawan^a, Awaludin Martin^{a,1}

^aProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Kota Pekanbaru, 28293, Indonesia

¹Email korespondensi: awaludinmartin01@gmail.com

Abstract. Many countries are accelerating their energy transitions in response to rising greenhouse gas emissions that drive global climate change. The COP26 Conference set targets to limit the rise in global temperature to below 1.5°C by 2030 and to achieve net-zero emissions by 2050. Hydrogen is considered a promising alternative fuel because it produces only water vapor as a byproduct and reduces dependence on fossil fuels. This study aims to analyze the effect of hydrogen gas, produced through electrolysis, mixed with Peralite fuel on the performance of an internal combustion engine. The electrolysis process used a wet-cell alkaline electrolyzer cell with a 30% wt NaOH electrolyte, a 12V power supply, and current levels of 40 A and 50 A. Engine performance parameters were evaluated under a brake load of 0.25 kg/cm². The results showed that at 40 A, the highest HHO gas production rate was 0.9 Lpm, resulting in a 16.5% increase in effective shaft power, a 1.9% increase in thermal efficiency, a 9.7% increase in volumetric efficiency, and a 30.1% reduction in BSEC. At 50 A, HHO gas production also reached 1.25 Lpm, with improvements of 27.1% in effective shaft power, 3.4% thermal efficiency, 12% volumetric efficiency, and a 43.5% reduction in BSEC. These findings confirm that hydrogen blending enhances engine performance while supporting emission reduction.

Keywords: Green hydrogen, Alkaline electrolyzer, Internal combustion engine, Engine performance, Energy transition

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/mq361b29>

PENDAHULUAN

Peningkatan emisi gas rumah kaca, khususnya karbon dioksida (CO₂), menjadi isu global yang mengkhawatirkan. Emisi karbon dioksida (CO₂) sebagian besar dihasilkan dari penggunaan bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Berdasarkan data [1] Indonesia menempati peringkat kedua sebagai penghasil karbon terbesar di dunia, dengan kenaikan emisi sebesar 18,3% pada tahun 2023. Emisi CO₂ ini berperan signifikan dalam meningkatkan efek rumah kaca, yaitu proses di mana radiasi panas yang seharusnya dipantulkan ke luar angkasa justru diserap dan dipantulkan kembali ke permukaan bumi [2]. Hal ini menyebabkan kenaikan suhu rata-rata tahunan yang berkontribusi langsung terhadap pemanasan global (global warming) [3]. Untuk menahan kenaikan suhu global di bawah 1,5°C sebagaimana disepakati dalam COP21 Paris (2015), diperlukan upaya transisi penggunaan energi yang rendah karbon dan ramah lingkungan [4]. Salah satu upaya strategis dalam transisi energi adalah pengembangan hidrogen sebagai energi bersih, yang selaras dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs 7) tentang energi bersih dan terjangkau serta (SDGs 13) terkait penanganan perubahan iklim [5]. Gas hidrogen memiliki keunggulan dimana proses pembakarannya tidak menghasilkan emisi karbon pada gas pembuangannya, serta kandungan energinya yang

tinggi menjadikan gas hidrogen sebagai sumber energi yang menjanjikan untuk masa depan [6].

Selain itu, gas hidrogen memiliki kepadatan *energy gravimetric* sekitar 142,18 MJ/kg (HHV) dan 120 MJ/kg (LHV) yang menunjukkan intensitas energi yang tinggi dibandingkan bahan bakar konvensional [7]. Hidrogen sudah tersedia di alam, namun hidrogen yang tersedia di alam merupakan gabungan kimia dari air, bahan bakar fosil dan biomassa [8]. Untuk memisahkan hidrogen dari gabungan kimia tersebut dilakukan dengan beberapa metode. Salah satu yang paling umum dilakukan adalah dengan elektrolisis air yaitu memisahkan atom hidrogen dan oksigen dengan menyuplai energi listrik sebagai faktor yang dapat memisahkannya [9]. Penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar alternatif pada kendaraan konvensional menjadi solusi strategis dalam mempercepat transisi menuju energi bersih [10]. Penginjeksian gas hidrogen dengan bahan bakar fosil seperti bensin dan diesel dapat meningkatkan efisiensi proses pembakaran dengan meminimalkan kerugian energi dalam mesin, sekaligus berkontribusi dalam mendukung peningkatan performa mesin kendaraan [11].

Sejalan dengan permasalahan tersebut, beberapa penelitian terdahulu telah mengevaluasi pemanfaatan gas HHO sebagai campuran bahan bakar pada mesin pembakaran dalam. Penelitian [12] menunjukkan bahwa penambahan gas HHO dapat meningkatkan *Break Thermal Efficiency* (BTE) hingga 2,9% dan menurunkan *Break Specific Fuel Consumption* (BSFC)

sebesar 1,2%. Penelitian berlanjut [13] menguji gas hidrogen hasil elektrolisis menggunakan *electrolyzer* tipe *wet cell* dan menggunakan elektroda jenis material *stainless steel* 316 L dengan larutan KOH sebagai elektrolit. Hasil pengujian parameter prestasi mesin, didapat performansi terbaik pada daya poros efektif sebesar 4,9%, kenaikan BTE 3,19%, efisiensi volumetrik 5,35%, AFR 6,7% dan penurunan 3%. Namun, pada pengujian ini elektroda *stainless steel* 316 L terdapat noda kuning kecoklatan yang menandakan oksidasi (karat). Gap analisis dari penelitian ini menunjukkan bahwa stabilitas produksi hidrogen dan ketahanan korosi elektroda masih menjadi tantangan utama dalam implementasi praktis pada mesin pembakaran dalam.

Keterbaruan novelty penelitian ini terletak pada pengembangan dan penerapan alkaline electrolyzer tipe *wet cell* menggunakan elektroda *stainless steel* 317L dengan elektrolit NaOH 30%wt, yang diaplikasikan secara langsung pada mesin bensin 4 langkah berkapasitas 97–99 cc pada kondisi pembebanan rem tetap 0,25 kg/cm². Pemilihan *stainless steel* 317L didasarkan pada kandungan molybdenum yang lebih tinggi ($\pm 4\%$), sehingga memiliki ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan *stainless steel* 316L dan diharapkan mampu menghasilkan suplai gas HHO yang lebih stabil [14]. Penelitian ini menjawab permasalahan utama terkait degradasi elektroda dan kualitas gas hasil elektrolisis yang memengaruhi kinerja mesin. Pendekatan eksperimental dilakukan melalui variasi arus listrik dan pembebanan pengereman untuk mengkaji pengaruh laju produksi HHO terhadap daya poros efektif, *Brake Specific Energy Consumption* (BSEC), efisiensi termal, dan efisiensi volumetrik. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah berupa bukti eksperimental bahwa peningkatan stabilitas produksi hidrogen melalui pemilihan material elektroda yang tepat dapat meningkatkan unjuk kerja dan efisiensi mesin pembakaran dalam

skala kecil, sekaligus membuka peluang penerapan sistem *hydrogen generation* sebagai solusi transisi energi yang lebih ramah lingkungan.

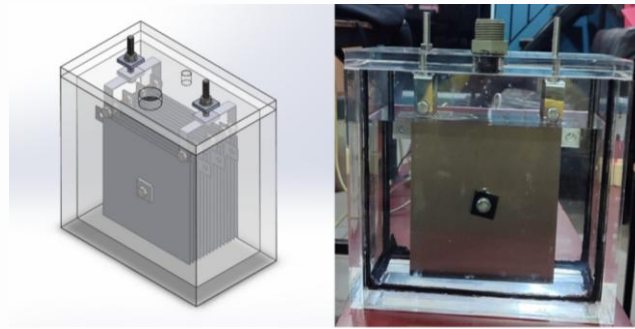
Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah melalui penyajian bukti eksperimental bahwa penggunaan elektroda *stainless steel* 317L pada alkaline electrolyzer mampu meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan menjaga stabilitas produksi gas HHO dibandingkan dengan material elektroda konvensional. Selain itu, penelitian ini menyajikan analisis komprehensif mengenai pengaruh laju produksi gas HHO terhadap parameter unjuk kerja mesin pembakaran dalam skala kecil, meliputi daya poros efektif, *Brake Specific Energy Consumption* (BSEC), efisiensi termal, dan efisiensi volumetrik, pada kondisi pembebanan rem tetap. Hasil yang diperoleh memperkaya pemahaman mengenai peran hidrogen hasil elektrolisis dalam meningkatkan efisiensi konversi energi pada mesin pembakaran dalam serta memberikan referensi teknis bagi pengembangan sistem *hydrogen generation* sebagai solusi transisi energi yang berpotensi menurunkan konsumsi bahan bakar fosil dan meningkatkan efisiensi energi secara berkelanjutan.

METODOLOGI

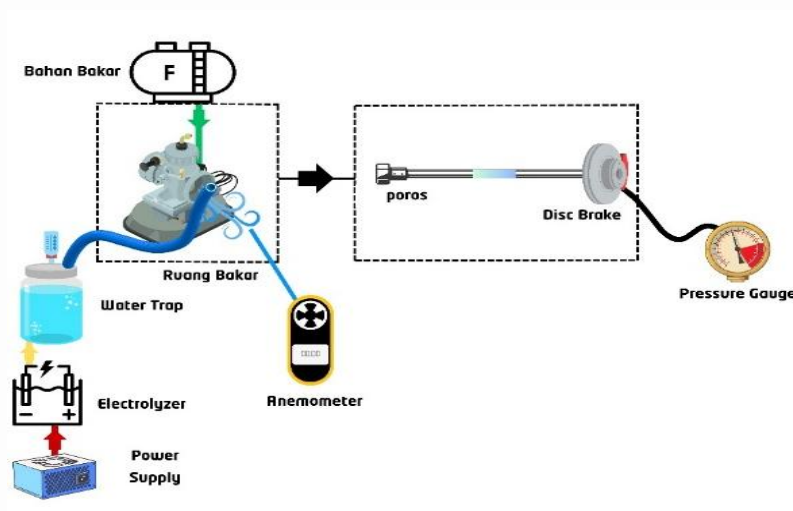
Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah perancangan, pembuatan, dan pengujian *alkaline electrolyzer cells* pada mesin pembakaran dalam. Metode penelitian ini diawali dengan studi literatur mengenai teknologi *alkaline electrolyzer* dan pemanfaatan gas hidrogen (HHO) sebagai bahan bakar tambahan pada mesin pembakaran dalam. Studi literatur ini digunakan untuk menentukan parameter desain *alkaline electrolyzer cell* tipe *wet cell*, seperti jumlah dan dimensi elektroda, konsentrasi elektrolit NaOH, serta variasi arus listrik. Data hasil perancangan didapat sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Data hasil perhitungan perancangan

No	Parameter	Hasil
1.	Volume teoritis hidrogen + oksigen (L/menit)	0,4125 (L/menit)
2.	Luas area elektroda plat (S)	200 (cm ²)
3.	Massa teoritis (g/menit)	0,0369 (g/menit)
4.	<i>Reversible voltage</i> (V_{rev})	1,29 V
5.	<i>Ohmic Voltage</i> (V_{ohm})	0,04388 V
6.	Tegangan aktivasi elektroda <i>stainless steel</i> 317 (V_{act})	0,1619 V
7.	Hambatan sel (V_{cell})	1,49 V
8.	Banyak stack <i>electrolyzer</i> elektroda plat (N_{cell})	8,023 stack



Gambar 1. *alkaline electrolyzer cell*



Gambar 2. Skema Pengujian

Tabel 1 Persamaan yang digunakan pada Pengujian Mesin Pembakaran Dalam

Keterangan	Parameter	Satuan
Gaya yang bekerja pada rem	$f = P \cdot A$	N
Torsi	$T = \mu \cdot F \cdot K_1 \cdot R_m$	N.m
	$K_1 = \frac{2\phi}{3 \sin \frac{\phi}{2}} \left[1 - \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)^2} \right]$	
	$R_m = \frac{R_1 + R_2}{2}$	m
Daya poros efektif	$N_e = \frac{T \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60} \text{ (w)}$	watt
Konsumsi bahan bakar	$\dot{m}_{bb} = \frac{V_{bb} \cdot \rho_{bb}}{t}$	kg/s
Pemakaian bahan bakar spesifik	$B_e = \frac{(\dot{m}_g \cdot LHV_g + \dot{m}_{H_2} \cdot LHV_{H_2})}{N_e}$	kJ/kwh
Efisiensi termal rata – rata	$\eta_e = \frac{N_e}{(\dot{m}_g \cdot LHV_g + \dot{m}_g \cdot LHV_{H_2})} \times 100 \%$	%
Tekanan efektif rata – rata	$P_e = \frac{450000 \cdot N_e}{V_L \cdot x \cdot z \cdot x \cdot n \cdot x \cdot a}$	kg/cm ²
Laju pemakaian udara ideal	$\dot{m}_{ui} = V_L \cdot \rho_{udara} \cdot Z \cdot n \cdot \frac{1}{2} \cdot 60$	kg/jam
Efisiensi volumetrik	$\eta_v = \frac{\dot{m}_{ud}}{\dot{m}_{ui}} \times 100\%$	%
Perbandingan udara dan bahan bakar	$AFR = \frac{\dot{m}_{ui}}{\dot{m}_{bb}}$	

Selanjutnya dilakukan tahap pembuatan prototipe *alkaline electrolyzer cell* dengan material elektroda *stainless steel 317 L* yang dipilih karena memiliki ketahanan korosi lebih tinggi dibandingkan material *stainless steel 316 L*. Pada tahap ini juga dilakukan pemilihan dan pemasangan komponen pendukung seperti *water trap*, *flow meter*, *flashback arrestor*, dan *power supply DC*. Berikut *set up* eksperimental pengujian *alkaline electrolyzer cell*. Berikut hasil perancangan dan pembuatan *alkaline electrolyzer cell*, diperlihatkan pada Gambar 1.

Setelah perakitan alat selesai, dilakukan pengujian eksperimental dengan mengintegrasikan *alkaline electrolyzer cell* ke mesin bensin 4 langkah, 1 silinder, 97 cc. Variabel yang diuji meliputi variasi kuat arus listrik 40 A dan 50 A dengan konsentrasi NaOH 30%wt. Skematik Pengujian *Alkaline Electrolyzer Cells* pada motor pembakaran dalam dapat dilihat pada Gambar 2.

Pengujian bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan gas HHO terhadap parameter performa mesin. Adapun parameter prestasi mesin yang digunakan dalam pengujian ini adalah sebagai berikut **Error! Reference source not found..**

Data hasil pengujian kemudian dianalisis secara kuantitatif menggunakan tabel dan grafik, serta dibandingkan dengan kondisi mesin tanpa penambahan gas HHO untuk melihat peningkatan performa dan stabilitas produksi gas hidrogen. Penelitian ini juga mengevaluasi kestabilan operasional sistem dan potensi penurunan konsumsi bahan bakar fosil, sebagai langkah mendukung transisi energi bersih dan pengurangan emisi gas rumah kaca.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian penambahan gas hidrogen pada mesin bensin 4 langkah, 1 silinder, 97 cc, didapatkan peningkatan nilai daya poros efektif dan penurunan nilai *Break Specific Energy Consumption* (BSEC) yang menunjukkan mesin memiliki kemampuan untuk menggerakkan suatu beban. Berikut data hasil pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 3.

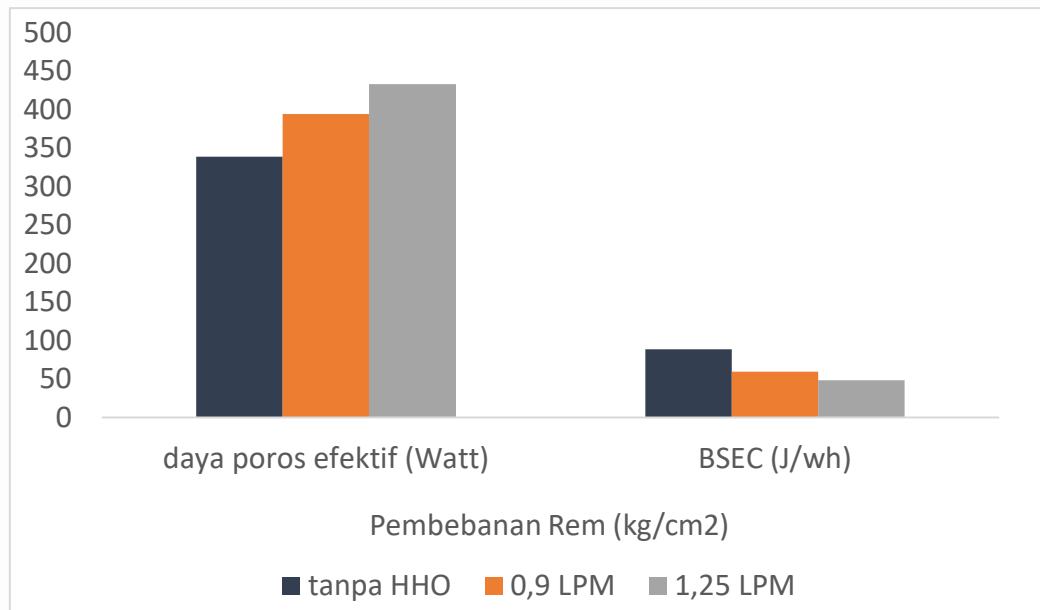
Pada grafik tersebut terlihat bahwa nilai daya poros efektif mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya laju aliran gas HHO yang disuplai ke mesin. Pada pengujian dengan penambahan gas HHO sebesar 1.25 Lpm terjadi peningkatan daya poros efektif sebesar 27,1% sedangkan pada penambahan gas HHO sebesar 0.9 Lpm terjadi peningkatan sebesar 16,5 %. Hasil ini sejalan dengan penelitian [15], adapun peningkatan nilai daya poros efektif sebesar 4% dan penelitian [13], peningkatan daya poros sebesar 5,1%. Peningkatan kinerja ini disebabkan oleh sifat gas hasil elektrolisis (hidrogen) yang memiliki

kecepatan pembakaran tinggi serta memerlukan energi penyalaan yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil konvensional [16]. Karakteristik tersebut menghasilkan proses pembakaran yang lebih cepat, stabil, dan efisien di dalam ruang bakar, sehingga mampu meningkatkan daya poros mesin secara signifikan [17].

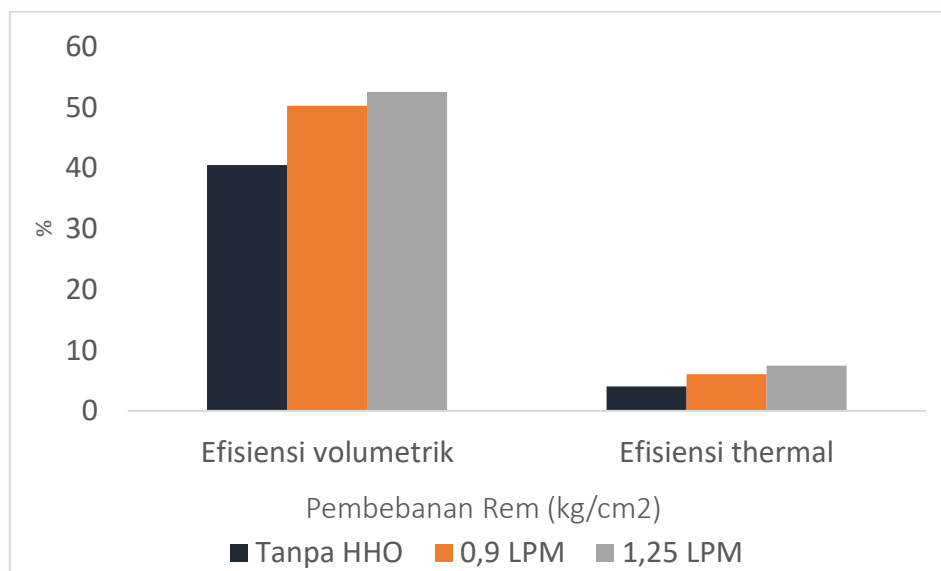
Sementara itu, parameter *Brake Specific Energy Consumption* (BSEC) berdasarkan hasil grafik menunjukkan tren penurunan seiring dengan meningkatnya laju aliran gas HHO yang disuplai ke mesin. Pada pengujian dengan penambahan gas HHO sebesar 1,25 Lpm terjadi penurunan BSEC sebesar 43,5%, sedangkan pada penambahan gas HHO sebesar 0,9 Lpm terjadi penurunan sebesar 30,1%. Hasil ini sejalan dengan temuan [18] penurunan BSEC ditekan hingga 18%, dan penelitian [13] penurunan BSEC dapat ditekan 3%. Penurunan nilai BSEC ini menunjukkan bahwa penambahan hidrogen mampu meningkatkan efisiensi pembakaran karena sifatnya yang mudah terbakar, memiliki kecepatan nyala tinggi, dan dapat bercampur secara homogen dengan udara [19]. Campuran yang lebih homogen ini menghasilkan distribusi temperatur dan tekanan yang lebih merata selama proses pembakaran, meminimalkan terjadinya *misfire* dan rugi panas ke dinding silinder [20]. Kondisi tersebut meningkatkan proses pembakaran di dalam ruang bakar, meningkatkan daya mesin dan menurunkan konsumsi bahan bakar [21].

Pengujian penambahan gas hidrogen pada mesin bensin juga dapat meningkatkan nilai efisiensi termal dan menurunkan nilai efisiensi volumetrik. Data hasil pengujian efisiensi termal dan efisiensi volumetrik dapat dilihat pada Gambar 4.

Parameter efisiensi termal mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya laju aliran gas HHO yang disuplai ke mesin. Pada pengujian dengan penambahan gas HHO sebesar 1,25 Lpm terjadi peningkatan efisiensi termal sebesar 3,4 % sedangkan pada penambahan gas HHO sebesar 0.9 Lpm terjadi peningkatan sebesar 1,9%. Temuan ini sejalan dengan penelitian [12] dimana peningkatan efisiensi termal 2,9%, [13] peningkatan efisiensi termal sebesar 3%. Peningkatan efisiensi termal terjadi akibat HHO memiliki sifat terbakar lebih cepat dan merata mengurangi waktu paparan panas terhadap dinding silinder, sehingga rugi panas (heat losses) berkurang ke dinding silinder [22]. Selain itu, penambahan HHO juga meningkatkan tekanan dan temperatur puncak pembakaran akibat laju reaksi yang lebih cepat [23]. Peningkatan tekanan ini memungkinkan ekspansi gas yang lebih besar sehingga energi panas dapat dikonversi lebih optimal menjadi energi mekanik [24].



Gambar 3. Grafik Pembebanan Rem Terhadap Daya Poros Efektif dan Break Specific Energy Consumption



Gambar 4. Grafik Pembebanan Rem Terhadap Efisiensi Termal dan Efisiensi Volumetrik

Selanjutnya, parameter efisiensi volumetrik menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya laju aliran gas HHO yang disuplai ke mesin. Pada pengujian dengan penambahan gas HHO sebesar 1,25 Lpm terjadi peningkatan efisiensi termal sebesar 12%, sedangkan pada penambahan gas HHO sebesar 0,9 Lpm terjadi peningkatan sebesar 9,7%. Besarnya peningkatan ini berkaitan dengan kuat arus yang lebih tinggi, yang menghasilkan produksi hidrogen yang lebih besar. Peningkatan kuantitas gas hidrogen tersebut membantu proses pembakaran di dalam ruang bakar menjadi lebih efisien, sehingga energi panas yang dihasilkan dapat dikonversi lebih optimal menjadi energi mekanik. Kondisi ini menyebabkan putaran mesin menjadi lebih cepat

akibat pembakaran yang lebih sempurna, di mana hidrogen yang memiliki kemampuan bercampur dengan baik dengan udara membantu menjaga kestabilan putaran poros meskipun mesin diberikan pembebanan rem yang lebih besar. Temuan ini sesuai dengan penelitian [15] dimana peningkatan efisiensi Volumetrik sebesar 7,5%, dan pada penelitian [13] peningkatan efisiensi volumetrik sebesar 5,35%. Peningkatan efisiensi volumetrik ini terjadi karena pembakaran yang lebih sempurna, didukung oleh karakteristik hidrogen yang mudah bercampur dengan udara, memiliki energi penyalan rendah, dan kecepatan reaksi tinggi, sehingga proses pengisian udara–bahan bakar di dalam silinder menjadi lebih optimal [25].

KESIMPULAN

Hasil pengujian dengan variasi arus listrik sebesar 40 A, laju produksi gas HHO tertinggi dicapai pada konsentrasi katalis 30%wt NaOH, yaitu sebesar 0,9 liter per menit (LPM). Pada kondisi ini, diperoleh peningkatan unjuk kerja mesin yang paling signifikan, yaitu daya poros efektif sebesar 15,3%, efisiensi termal 5,7%, efisiensi volumetrik 6,7%, AFR 1,1% dan penurunan *brake specific energy consumption* (BSEC) 29,06 %. Pada pengujian dengan variasi arus listrik sebesar 50 A, laju produksi gas HHO tertinggi dicapai pada konsentrasi katalis 30% wt NaOH, yaitu sebesar 0,9 liter per menit (Lpm). Pada kondisi ini, diperoleh peningkatan unjuk kerja mesin yang paling signifikan, yaitu daya poros efektif sebesar 18,3%, efisiensi termal 8,6%, efisiensi volumetrik 10,8%, AFR 2,84% dan penurunan *brake specific energy consumption* 40,7%.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi alkaline electrolyzer dengan katalis NaOH 30% wt dan

variasi arus listrik hingga 50 A mampu menghasilkan suplai gas HHO yang efektif untuk meningkatkan unjuk kerja mesin pembakaran secara signifikan. Implikasi dari temuan ini menegaskan bahwa pemanfaatan hidrogen hasil elektrolisis sebagai bahan bakar tambahan (fuel enrichment) berpotensi menjadi solusi transisi energi yang aplikatif pada mesin bensin skala kecil, khususnya dalam upaya peningkatan efisiensi energi dan penurunan konsumsi bahan bakar fosil. Selain itu, peningkatan daya poros efektif, efisiensi termal, dan efisiensi volumetrik yang disertai dengan penurunan BSEC menunjukkan bahwa sistem HHO dapat meningkatkan kualitas proses pembakaran tanpa memerlukan modifikasi besar pada sistem mesin. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan lebih lanjut teknologi alkaline electrolyzer yang lebih stabil, tahan korosi, dan efisien untuk aplikasi kendaraan ringan maupun sistem energi ramah lingkungan lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Pierre *et al.*, "Global Carbon Budget 2023," *Earth Syst Sci Data*, vol. 13, no. 4, pp. 1791–1805, 2023, [Online]. Available: <https://essd.copernicus.org/articles/13/1791/2021/>
- [2] M. Filonchyk, M. P. Peterson, L. Zhang, V. Hurynovich, and Y. He, "Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O," *Science of the Total Environment*, vol. 935, no. May, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173359.
- [3] M. Redlin and T. Gries, "Anthropogenic climate change: the impact of the global carbon budget," *Theor Appl Climatol*, vol. 146, no. 1–2, pp. 713–721, 2021, doi: 10.1007/s00704-021-03764-0.
- [4] I. M. Al-Akraa, Y. M. Asal, and A. M. Mohammad, "Surface Engineering Of Pt Surfaces With Au And Cobalt Oxide Nanostructures For Enhanced Formic Acid Electro-Oxidation," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 15, no. 8, p. 103965, 2022, doi: 10.1016/j.arabjc.2022.103965.
- [5] A. W. Sari, A. Martin, and M. Habibillah, "Design of Wet Cell Type Hydrogen Electrolyzer Using Distilled Water As Raw Material," *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, no. October, pp. 17–21, 2024, doi: 10.1109/ICoNEEI64414.2024.10748096.
- [6] N. Sazali, "Emerging Technologies By Hydrogen: A Review," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 38, pp. 18753–18771, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.021.
- [7] M. U. S. Akhtar, F. Asfand, M. I. Khan, R. Mishra, and A. D. Ball, "Performance And Emissions Characteristics of Hydrogen-Diesel Dual-Fuel Combustion for Heavy-Duty Engines," *Int J Hydrogen Energy*, pp. 1–14, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.246.
- [8] S. Shiva Kumar and H. Lim, "An Overview Of Water Electrolysis Technologies For Green Hydrogen Production," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 13793–13813, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.10.127.
- [9] L. H. & I. I. Mai Fajar Fajri, "Produksi Gas Hidrogen Menggunakan Metode Elektrolisis Fotovoltaik (P_v)," p. 889, 2022.
- [10] M. T. Islam and A. Ali, "Sustainable Green Energy Transition In Saudi Arabia: Characterizing Policy Framework, Interrelations And Future Research Directions," *Next Energy*, vol. 5, no. April, p. 100161, 2024, doi: 10.1016/j.nxener.2024.100161.
- [11] F. Gambou, D. Guilbert, M. Zasadzinski, and H. Rafaralahy, "A Comprehensive Survey of Alkaline Electrolyzer Modeling: Electrical Domain and Specific Electrolyte Conductivity," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 9, 2022, doi: 10.3390/en15093452.
- [12] C. P. García, S. Orjuela Abril, and J. P. León, "Analysis Of Performance, Emissions, And Lubrication In Spark-Ignition Engine Fueled With Hydrogen Gas Mixtures," *Heliyon*, vol. 8, no. 11, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11353.

- [13] A. Hidayatullah, “Kaji Eksperimental Electrolyzer Hidrogen Tipe Wet Cell Pada Mesin Pembakaran Dalam,” *Universitas Riau*, 2024.
- [14] H. N. Farneze, S. S. M. Tavares, J. M. Pardal, R. F. do Nascimento, and H. F. G. de Abreu, “Degradation of mechanical and corrosion resistance properties of AISI 317L steel exposed at 550 °C,” *Eng Fail Anal*, vol. 61, pp. 69–76, 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.08.044.
- [15] M. S. Gad, A. S. El-Shafay, Ü. Ağbulut, and H. Panchal, “Impact Of Produced Oxyhydrogen Gas (HHO) From Dry Cell Electrolyzer On Spark Ignition Engine Characteristics,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 553–563, 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.210.
- [16] L. Wang, X. Li, C. Hong, P. Guo, S. Guo, and Z. Yang, “Research and Development of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines in China,” *ACS Omega*, vol. 8, no. 51, pp. 48590–48612, 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c05397.
- [17] Z. Stępień, “Analysis of the prospects for hydrogen-fuelled internal combustion engines,” *Combustion Engines*, vol. 197, no. 2, pp. 32–41, 2024, doi: 10.19206/CE-174794.
- [18] W. M. Adaileh and K. S. AlQdah, “Performance Improvement And Emission Reduction Of Gasoline Engine By Adding Hydrogen Gas Into The Intake Manifold,” *Mater Today Proc*, vol. 60, pp. 1769–1778, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.314.
- [19] E. Giacomazzi *et al.*, “Hydrogen Combustion: Features and Barriers to Its Exploitation in the Energy Transition,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 20, 2023, doi: 10.3390/en16207174.
- [20] H. Goyal *et al.*, “International Journal of Hydrogen Energy Design trends and challenges in hydrogen direct injection (H 2 DI) internal combustion engines – A review,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 86, no. June, pp. 1179–1194, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.284.
- [21] S. Ben Abdelwahed *et al.*, “Enhancing Diesel Engine Performance Through Hydrogen Addition,” *Fire*, vol. 8, no. 5, pp. 1–13, 2025, doi: 10.3390/fire8050206.
- [22] W. Gao, Z. Fu, Y. Li, Y. Li, and J. Zou, “Progress of Performance, Emission, and Technical Measures of Hydrogen Fuel Internal-Combustion Engines,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 19, 2022, doi: 10.3390/en15197401.
- [23] R. Georgescu, C. Pană, N. Negurescu, A. Cernat, C. Nuțu, and C. Sandu, “The Influence of Hydrogen Addition on a SI Engine—Theoretical and Experimental Investigations,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 16, 2024, doi: 10.3390/su16166873.
- [24] A. Ballerini, T. Lucchini, and A. Onorati, “Numerical Assessment of a Heavy-Duty (HD) Spark Ignition (SI) Biogas Engine,” *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 1, 2025, doi: 10.3390/en18010051.
- [25] E. Dimitrov, M. Peychev, and A. Tashev, “Study of the hydrogen influence on the combustion parameters of diesel engine,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 123, no. February, pp. 219–230, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.114.