

Aplikasi Gas Hidrogen Hasil Elektrolisis Pada Motor Bakar (Genset)

1st Ni Kadek Noviza Trisna Dwita
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia
novizatrisna@gmail.com

2nd Suwandi, Drs. M.Si.
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia
Suwandi.sains@gmail.com

3rd Nurwulan Fitriyanti, S.Pd.,
M.Pfis.
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia
nurwulanf@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Penggunaan bahan bakar fosil masih mendominasi sektor energi, terutama transportasi dan juga pembangkit listrik, namun ketergantungan ini menimbulkan emisi gas rumah kaca, polusi, serta ancaman keterbatasan cadangan energi fosil di dunia. Hidrogen dipandang sebagai alternatif ramah lingkungan dengan nilai kalor tinggi (120 MJ/kg) dan emisi pembakaran yang hanya berupa uap air saja. Salah satu metode praktis untuk memanfaatkan hidrogen adalah melalui gas HHO hasil elektrolisis air. Penelitian ini difokuskan pada pemanfaatan gas HHO sebagai bahan bakar tambahan (*co-fuel*) pada genset berbahan bakar bensin. Metode penelitian meliputi produksi gas HHO, uji genset tanpa beban, dengan beban, hingga simulasi siklus tertutup yang dilakukan secara bertahap. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan gas HHO memperpanjang durasi nyala, menurunkan nilai Specific Fuel Consumption (SFC), serta meningkatkan efisiensi sistem secara signifikan. Penerapan sistem siklus tertutup menghasilkan performa lebih baik dibandingkan penggunaan bensin murni maupun kombinasi terbuka, sehingga menunjukkan potensi besar hidrogen sebagai energi alternatif yang bersih, efisien, dan berkelanjutan.

Kata kunci— hidrogen, elektrolisis, genset, efisiensi, bensin pertamax, bensin pertalite

I. PENDAHULUAN

Penggunaan bahan bakar fosil seperti bensin dan solar masih mendominasi kebutuhan energi dunia, khususnya dalam sektor transportasi dan pembangkit listrik. Ketergantungan besar terhadap bahan bakar fosil ini telah menyebabkan peningkatan emisi gas rumah kaca, polusi udara, dan percepatan perubahan iklim. Berdasarkan laporan terbaru International Energy Agency (IEA, 2023), konsumsi bahan bakar fosil global pada tahun 2022 mencapai sekitar 7.8 miliar ton setara minyak (Mtoe), dengan sektor transportasi menyumbang lebih dari 50% konsumsi bensin. Di Indonesia, penggunaan bensin tercatat mencapai 1.2 juta barel per hari, sedangkan solar sebesar 0,8 juta barel per hari (BP Statistical Review of World Energy, 2023). Di sisi lain, cadangan energi fosil semakin menipis dengan proyeksi minyak bumi akan habis dalam 50 tahun dan gas alam dalam 53 tahun. Kondisi ini menegaskan urgensi pengembangan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, salah satunya adalah gas hidrogen.

Hidrogen memiliki karakteristik unggul dibandingkan bahan bakar fosil. Dengan nilai kalor mencapai 120 MJ/kg, hidrogen jauh lebih tinggi dibandingkan bensin (44 MJ/kg) maupun solar (42 MJ/kg) (U.S. Department of Energy, 2023);

IRENA, 2023). Selain itu, pembakaran hidrogen tidak menghasilkan emisi karbon dioksida, melainkan hanya uap air sehingga lebih ramah lingkungan (International Renewable Energy Agency, 2023). Hidrogen dapat diproduksi melalui proses elektrolisis air menggunakan arus listrik untuk memisahkan hidrogen dari oksigen. Namun demikian, efisiensi produksi dan stabilitas operasional dari proses elektrolisis masih menjadi tantangan teknis yang perlu ditangani agar pemanfaatannya dapat diterapkan secara luas.

Kajian terkait pemanfaatan hidrogen sebagai bahan bakar tambahan telah banyak dilakukan, khususnya pada kendaraan bermotor dengan sistem pembakaran internal. Berbagai studi menunjukkan bahwa kombinasi bahan bakar fosil dengan gas HHO mampu meningkatkan efisiensi pembakaran sekaligus menurunkan konsumsi bahan bakar utama. Meskipun demikian, penerapan teknologi serupa pada sistem pembangkit listrik skala kecil, seperti *generator set* (genset), masih relatif jarang dikaji. Padahal, genset memiliki peran penting sebagai sumber energi cadangan di berbagai sektor, sehingga peluang riset di bidang ini terbuka luas untuk memberikan kontribusi nyata dalam pemanfaatan energi alternatif.

Bedasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan untuk mengevaluasi pemanfaatan hidrogen sebagai bahan bakar tambahan (*co-fuel*) pada genset berbahan bakar bensin. Tujuan utama penelitian adalah menganalisis apakah penambahan hidrogen dapat memperpanjang durasi operasional genset dengan volume bahan bensin yang sama serta meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Penelitian ini juga menelaah pengaruh arus listrik yang digunakan untuk memproduksi hidrogen terhadap performa genset, meliputi stabilitas kinerja dan konsumsi bahan bakar.

II. KAJIAN TEORI

Kajian teori pada penelitian ini difokuskan pada aspek-aspek yang mendukung penerapan gas HHO hasil elektrolisis sebagai bahan bakar tambahan pada motor bakar (genset).

A. Genset (Generator Set)

Genset merupakan perangkat yang berfungsi sebagai pembangkit listrik mandiri dengan mengubah energi kimia dari bahan menjadi energi mekanik melalui mesin pembakaran dalam, kemudian energi mekanik tersebut diubah menjadi energi listrik oleh generator.

Genset bensin menggunakan mesin berbahan bakar bensin (*gasoline engine*). Mesin bensin biasanya menggunakan sistem pembakaran *spark ignition*

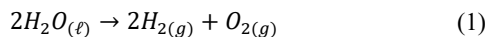
(penyalan percikan api dari busi) dan memiliki karakteristik putaran mesin yang lebih halus serta suara yang realtif lebih senyap dibandingkan mesin diesel. Genset bensin umum digunakan untuk kebutuhan daya kecil hingga menengah, misalnya untuk rumah tangga atau usaha skala kecil.

B. Hidrogen Sebagai Bahan Bakar Alternatif

Hidrogen merupakan salah satu sumber energi alternatif yang memiliki potensi besar karena bersifat ramah lingkungan. Hasil pembakarannya tidak menghasilkan gas rumah kaca maupun polutan berbahaya, melainkan hanya berupa uap air. Hidrogen juga memiliki nilai kalor tinggi serta kecepatan pembakaran yang lebih cepat dibandingkan bahan bakar fosil, sehingga mampu meningkatkan kualitas proses pembakaran di dalam ruang bakar. Keunggulan ini membuat hidrogen sering dipertimbangkan sebagai bahan bakar tambahan untuk mengurangi konsumsi bahan bakar utama dan meningkatkan efisiensi sistem.

C. Proses Elektrolisis Air

Elektrolisis merupakan proses pemecahan senyawa menggunakan arus listrik untuk memisahkan unsur-unsurnya. Reaksi utama dalam elektrolisis air seperti pada persamaan (1).



Dalam konteks hidrogen, elektrolisis melibatkan pemecahan air (H_2O) menjadi gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) dengan menerapkan arus listrik melalui larutan air dengan garam terlarut (elektrolit) sebagai penghantar. Proses ini menggunakan dua elektroda, yaitu katoda (elektroda negatif) dan anoda (elektroda positif) yang terhubung ke sumber daya listrik. Gas hasil elektrolisis ini sering disebut gas HHO atau Brown's Gas karena terdiri dari campuran hidrogen dan oksigen. Keunggulan metode ini adalah gas HHO dapat diproduksi secara langsung, sehingga tidak memerlukan sistem penyimpanan bertekanan tinggi seperti pada hidrogen murni. Hal ini membuatnya lebih praktis dan aman untuk digunakan sebagai bahan bakar tambahan pada mesin.

D. Penggunaan gas HHO pada Genset

Gas HHO dapat dialirkan ke dalam ruang bakar bersama campuran udara dan bahan bakar utama (bensin atau solar). Kehadiran gas HHO mempercepat proses pembakaran karena hidrogen memiliki energi aktivasi yang rendah dan mudah terbakar. Oksigen tambahan yang ikut terbawa dalam gas HHO juga berperan memperbaiki pencampuran udara dan bahan bakar. Dengan demikian, pembakaran dapat berlangsung lebih sempurna, dan konsumsi bahan bakar fosil berkurang.

E. Specific Fuel Consumption (SFC)

Specific Fuel Consumption (SFC) adalah indikator untuk menilai seberapa efisien mesin dalam menggunakan bahan bakar. SFC menunjukkan banyaknya bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah energi listrik tertentu. Semakin kecil nilai SFC, maka semakin hemat penggunaan bahan bakarnya. Dalam penelitian ini, SFC diukur untuk membandingkan kinerja genset bensin dan

genset solar, baik dalam kondisi tanpa maupun dengan tambahan gas HHO.

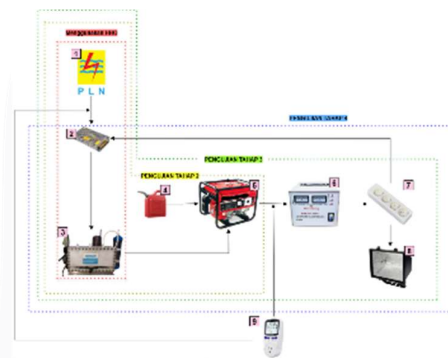
F. Efisiensi Sistem Genset dengan menggunakan gas HHO

Efisiensi sistem genset menunjukkan seberapa besar energi listrik yang dapat dihasilkan dibandingkan dengan energi yang masuk dari bahan bakar. Penggunaan gas HHO diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dengan memperbaiki kualitas pembakaran, sehingga energi yang hilang akibat pembakaran tidak sempurna dapat dikurangi. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji seberapa besar pengaruh gas HHO terhadap efisiensi sistem pada genset bensin maupun genset solar.

III. METODE

Proses implementasi sistem hybrid genset berbasis hidrogen yang telah dilakukan dalam bentuk pengujian bertahap. Implementasi dilakukan berdasarkan empat tahapan utama yang mencerminkan alur kerja dari proyek yang dimulai dari produksi gas HHO, uji performa genset tanpa beban, uji dengan beban lampu menggunakan suplai listrik eksternal, hingga simulasi siklus tertutup di mana sistem berjalan secara mandiri menggunakan output dari genset.

A. Skema Umum Pengujian Genset Hybrid



GAMBAR 1
Skema Pengujian

Untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai sistem yang diimplementasikan, disusun skema umum serta flowchart pengujian berdasarkan tiap skenario pengujian. Skema umum pada Gambar 1 menunjukkan hubungan antar komponen utama, yaitu reaktor elektrolisis, sistem distribusi hidrogen, dan genset. Adanya skema ini memudahkan visualisasi alur energi dan integrasi antar komponen selama implementasi berlangsung.

B. Tahap 1: Pengujian Produksi Hidrogen

Tujuan pengujian produksi hidrogen ini untuk mengetahui komposisi gas hasil dari proses elektrolisis air, khususnya kandungan gas hidrogen (H_2) yang dihasilkan oleh reaktor elektrolisis untuk memastikan bahwa sistem dapat memproduksi hidrogen dengan kadar yang sesuai.

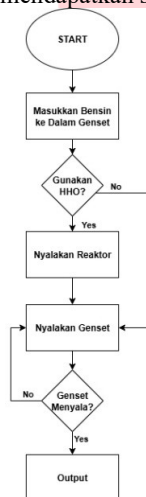
Pada tahap 1, dilakukan pengujian produksi hidrogen dengan menggunakan reaktor elektrolisis. Sebelum pengoperasian, dilakukan persiapan reaktor elektrolisis dengan memastikan bahwa air pada *bubbler* telah diisi hingga setengah dari ukuran botol. Sambungan selang gas dari

reaktor menuju kantong penampung gas (*Tedlar Bag*) berkapasitas 1 liter juga dipastikan telah terpasang dengan benar. Selanjutnya, reaktor elektrolisis dihubungkan ke sumber listrik PLN, dan proses pembentukan gelembung gas pada bubbler diamati sebagai indikator bahwa reaksi elektrolisis sedang berlangsung.

Gas hasil elektrolisis dialirkan langsung ke *Tedlar Bag* hingga volume yang dibutuhkan tercapai. Setelah gas terkumpul, *Tedlar Bag* dilepaskan dari sistem dan segera ditutup rapat untuk menghindari kebocoran. Sampel gas kemudian dibawa ke Laboratorium Instrumentasi, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan (FTSL), Institut Teknologi Bandung (ITB) untuk dianalisis menggunakan alat *GC-TCD* (*Gas Chromatography Thermal Conductivity Detector*).

C. Tahap 2: Pengujian Genset Tanpa Beban

Pengujian tahap 2 ini bertujuan untuk melihat dampak awal dari keberadaan gas HHO terhadap kestabilan genset dalam kondisi tanpa beban. Sistem diuji dalam dua kondisi, yaitu dengan dan tanpa penggunaan gas HHO, sementara reaktor elektrolisis tetap mendapatkan suplai listrik dari PLN



GAMBAR 2

Flowchart Pengujian Tanpa Beban

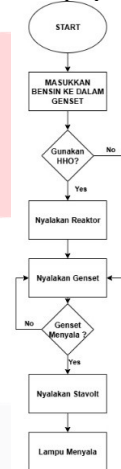
Pada tahap 2, dilakukan dua jenis pengujian yaitu tanpa penambahan gas HHO dan dengan penambahan gas HHO. Pada pengujian tanpa gas HHO, bahan bakar yang digunakan adalah Pertalite dan Pertamax dengan volume 50 mL, 100 mL, 150 mL, dan 200 mL, yang diukur menggunakan gelas ukur lalu dituangkan ke dalam tangki genset bensin 2.2 kVA. Setelah bahan bakar terisi, genset dinyalakan menggunakan starter, stopwatch digital diaktifkan, dan mesin dibiarkan menyala tanpa beban hingga bahan bakar habis. Stopwatch dihentikan saat mesin mati total, lalu lama waktu nyala dicatat. Setiap variasi volume bahan bakar diuji sebanyak tiga kali untuk memperoleh data yang akurat.

Sementara itu, pada pengujian dengan gas HHO, persiapan bahan bakar dilakukan dengan prosedur yang sama namun ditambahkan pemasangan selang keluaran gas dari reaktor elektrolisis ke saluran masuk udara (intake) genset. Reaktor elektrolisis dihubungkan ke sumber listrik PLN melalui watt meter untuk memantau konsumsi daya, lalu dinyalakan hingga terbentuk gelembung gas HHO pada bubbler sebagai tanda proses elektrolisis berlangsung.

Setelah itu, genset dinyalakan, stopwatch diaktifkan, dan mesin dibiarkan menyala tanpa beban hingga bahan bakar habis. Lama nyala dicatat setelah mesin berhenti, kemudian pengujian diulangi tiga kali untuk setiap volume bahan bakar.

D. Tahap 3: Pengujian Genset dengan Beban Lampu

Pengujian tahap 3 ini bertujuan untuk menilai perbedaan performa dan efisiensi antara sistem konvensional dan sistem hybrid berbasis gas HHO saat genset bekerja dengan beban nyata. Dengan mengulang pengujian tahap 1 dan tahap 2 namun menambahkan beban seperti lampu halogen 1000 watt pada output genset, sementara reaktor elektrolisis masih tetap mendapatkan suplai listrik dari PLN. Sistem diuji dalam dua kondisi, yaitu dengan dan tanpa penggunaan gas HHO.



GAMBAR 3

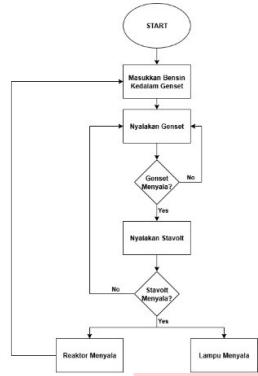
Flowchart Pengujian Beban Lampu dengan Reaktor dari PLN

Pada tahap 3, dilakukan pengujian kinerja genset dengan beban menggunakan dua kondisi, yaitu tanpa gas HHO dan dengan penambahan gas HHO. Pada pengujian tanpa gas HHO, bahan bakar Pertalite dan Pertamax disiapkan dalam volume 50 mL, 100 mL, 150 mL, dan 200 mL menggunakan gelas ukur, lalu dituangkan ke tangki genset. Output genset dihubungkan ke stavolt untuk menstabilkan tegangan serta watt meter guna mengukur daya keluaran, kemudian dihubungkan ke beban lampu halogen 1000 watt. Stopwatch dijalankan bersamaan dengan penyalaan genset, dan waktu lama nyala hingga bahan bakar habis dicatat. Prosedur ini diulangi sebanyak tiga kali untuk setiap volume bahan bakar.

Pada pengujian dengan tambahan gas HHO, prosedur pengisian bahan bakar dilakukan sama, namun dilengkapi dengan sistem suplai gas HHO dari reaktor elektrolisis yang dihubungkan ke intake mesin genset. Reaktor mendapat suplai listrik dari PLN melalui watt meter untuk memantau konsumsi dayanya, sementara watt meter lain ditempatkan pada jalur keluaran genset sebelum stavolt untuk mengukur daya keluaran. Terbentuknya gelembung gas HHO pada bubbler menjadi tanda elektrolisis berjalan, setelah itu genset dinyalakan dan stopwatch diaktifkan. Genset dioperasikan dengan beban lampu 1000 watt hingga bahan bakar habis, sambil mencatat parameter yang diperlukan. Sama seperti sebelumnya, pengujian diulangi tiga kali untuk setiap volume bahan bakar.

E. Tahap 4: Pengujian Siklus Tertutup

Tujuan tahap terakhir ini untuk menilai kelayakan sistem dalam skema berkelanjutan dan independen dari sumber listrik eksternal. Dengan menguji kinerja sistem dalam siklus energi tertutup dengan menggunakan output listrik dari genset sebagai input daya untuk lampu 1000 watt dan reaktor elektrolisis.



GAMBAR 4
Flowchart Sistem Siklus Tertutup

Pada tahap pengujian akhir (Gambar 4), kinerja genset diuji dalam kondisi siklus tertutup tanpa pasokan listrik eksternal, di mana output genset dialirkan ke stavolt untuk menjaga kestabilan tegangan sekaligus dipantau melalui meter guna mengetahui konsumsi daya reaktor elektrolisis. Dari stavolt, daya disalurkan ke dua beban, yaitu lampu halogen 1000 watt dan reaktor elektrolisis, sementara gas HHO hasil reaktor dialirkan langsung ke intake ruang bakar genset sebagai bahan bakar tambahan. Pengujian dilakukan dengan variasi volume bahan bakar 50 mL, 100 mL, 150 mL, dan 200 mL, dimulai sejak genset dinyalakan hingga mati karena kehabisan bahan bakar, dengan stopwatch mencatat durasi nyala sebagai parameter utama. Setiap variasi pengujian diulang tiga kali untuk memperoleh data yang lebih akurat dan reliabel.

F. Massa Bahan Bakar (kg)

Persamaan (2) digunakan untuk menghitung massa bahan bakar dari hasil perkalian antara massa jenis bahan bakar dan volume bahan bakar yang digunakan.

$$m_{BBM} = \rho_{BBM} \times V_{BBM} \quad (2)$$

Keterangan:

m_{BBM} = Massa bahan bakar (kg)

ρ_{BBM} = Massa jenis bahan bakar (kg/L)

V_{BBM} = Volume bahan bakar yang digunakan (Liter)

G. Daya Input Bahan Bakar (Watt)

Persamaan (3) menghitung daya input dari bahan bakar berdasarkan massa bahan bakar yang digunakan, nilai kalor bawah (Lower Heating Value), dan waktu konsumsi.

$$P_{BBM} = \frac{m_{BBM} \times LHV}{t} \quad (3)$$

Keterangan:

P_{BBM} = Daya input bahan bakar (watt)

m_{BBM} = Massa bahan bakar (kg)

LHV = Lower Heating Value atau kalor bawah bahan bakar (Solar 43,4 MJ/kg dan Bensin 43,448 MJ/kg)

t = Waktu konsumsi bahan bakar (detik)

H. Volume Rate (L/s)

Persamaan (4) digunakan untuk mengetahui laju aliran volume bahan bakar, yaitu perbandingan antara volume bahan bakar yang digunakan dengan waktu konsumsi.

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad (4)$$

Keterangan:

Q_v = Volume rate (L/s)

V = Volume bahan bakar yang digunakan (Liter)

t = Waktu konsumsi bahan bakar (detik)

I. Laju Massa Aliran ($\dot{m}$)

Persamaan (5) menghitung laju aliran massa bahan bakar dengan mengalikan massa jenis bahan bakar dengan laju aliran volumenya.

$$\dot{m} = \rho_{BBM} \times Q_v \quad (5)$$

Keterangan:

$\dot{m}$ = Laju massa bahan bakar (kg/s)

ρ_{BBM} = Massa jenis bahan bakar (kg/L)

Q_v = Volume rate (L/s)

J. Daya Efektif Mesin Genset (Ne)

N_e merupakan daya mekanik yang digunakan untuk menghasilkan daya listrik. Perhitungannya mempertimbangkan efisiensi konversi energi dari bahan bakar menjadi daya mekanik. Mencari daya efektif mesin genset ini menggunakan Persamaan (6) di bawah.

$$N_e = \frac{P_{output\ genset}}{\eta_{genset}} \quad (6)$$

Keterangan:

N_e = Daya efektif mesin (kW)

$P_{output\ genset}$ = Daya keluaran genset (kW)

η_{genset} = 1,0 (faktor efisiensi genset 1 fase)

K. Spesific Fuel Consumption (SFC)

SFC menunjukkan jumlah bahan bakar yang dikonsumsi untuk menghasilkan satu satuan daya per satuan waktu.

$$SFC = \frac{\dot{m}_{BBM} \times 3600}{N_e} \quad (7)$$

Keterangan:

SFC = Konsumsi bahan bakar spesifik (kg/kWh)

$\dot{m}_{BBM}$ = Laju massa bahan bakar (kg/s)

N_e = Daya efektif mesin genset (kW)

Pada Persamaan (7) konstanta 3600 digunakan untuk mengkonversi satuan dari (kg/s)/kW menjadi kg/kWh.

L. Efisiensi Sistem Genset Dengan Sumber PLN

Efisiensi sistem genset dihitung dari perbandingan antara daya output genset dari total daya input yang digunakan. Nilai efisiensi menunjukkan seberapa efektif sistem mengubah energi input menjadi output listrik yang bersamaan.

Pada pengujian dengan sumber listrik PLN, daya input mencakup energi bahan bakar dan dari PLN seperti pada Persamaan (8).

$$\eta_{\text{Sistem Genset}} = \frac{P_{\text{output genset}}}{P_{\text{BBM}} + P_{\text{PLN}}} \times 100\% \quad (8)$$

Keterangan:

$\eta_{\text{Sistem Genset}}$ = Efisiensi sistem genset (%)

$P_{\text{output genset}}$ = Daya keluaran genset (W)

P_{BBM} = Daya input bahan bakar (W)

P_{PLN} = Daya reaktor (95 W)

PPLN (daya reaktor) didapatkan dari pengukuran reaktor yang disambungkan ke listrik PLN menggunakan watt meter.

M. Efisiensi Sistem Genset Tanpa Sumber PLN

Pada pengujian dengan tidak menggunakan sumber listrik PLN, daya input hanya berasal dari bahan bakar seperti pada Persamaan (9).

$$\eta_{\text{Sistem Genset}} = \frac{P_{\text{out Genset}}}{P_{\text{BBM}}} \times 100\% \quad (9)$$

Keterangan:

$\eta_{\text{Sistem Genset}}$ = Efisiensi sistem genset (%)

$P_{\text{out Genset}}$ = Daya output genset (W)

P_{BBM} = Daya input bahan bakar (W)

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Tahap 1: Produksi Hidrogen

TABLE 1
Hasil Pengujian Tahap 1

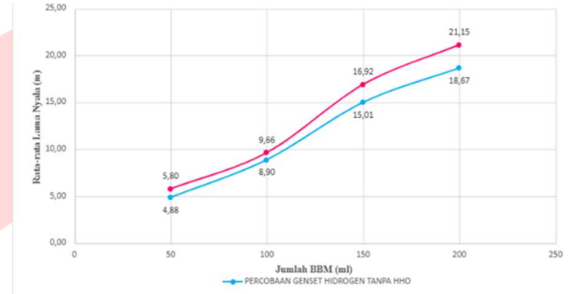
No	Peak Name	Retention Time (minutes)	Area (mV.min)	Amount (%)
1	Hydrogen	2.04	0.014	23.8800
2	Oxygen	2.78	1.179	13.2337
3	Nitrogen	4.71	0.068	n.a.
4	Carbon Dioxide	3.63	0.016	0.0465

Pada pengujian tahap 1, sampel gas hasil elektrolisis air dengan larutan NaOH dianalisis menggunakan Gas Chromatography-Thermal Conductivity Detector (GC-TCD) di FTSL ITB. Hasil back detector menunjukkan tiga gas utama, yaitu hidrogen (H_2), oksigen (O_2), dan nitrogen (N_2). Hidrogen terdeteksi dengan kontribusi terbesar sebesar 23,88% sehingga menjadi produk utama elektrolisis. Oksigen terdeteksi dengan komposisi 13,23% yang sesuai dengan rasio teoritis 2:1 antara H_2 dan O_2 dalam reaksi elektrolisis air, sementara nitrogen terdeteksi sebagai kontaminan minor dari udara sekitar.

Selain itu, hasil front detector mendeteksi keberadaan karbon dioksida (CO_2) dengan kontribusi sangat kecil, hanya 0,0456%, sehingga dapat dianggap sebagai kontaminasi lingkungan. Secara keseluruhan, pengujian tahap 1 membuktikan bahwa reaktor elektrolisis bekerja dengan baik dan mampu menghasilkan gas HHO dengan efisiensi relatif tinggi. Deteksi dan pemisahan gas dengan GC-TCD juga menunjukkan akurasi dan sensitivitas yang baik, sehingga hasil ini menjadi dasar penting untuk tahap berikutnya dalam pemanfaatan gas hidrogen sebagai bahan bakar alternatif pada genset.

B. Tahap 2: Pengujian Genset Tanpa Beban

1. Bensin Jenis Pertamina

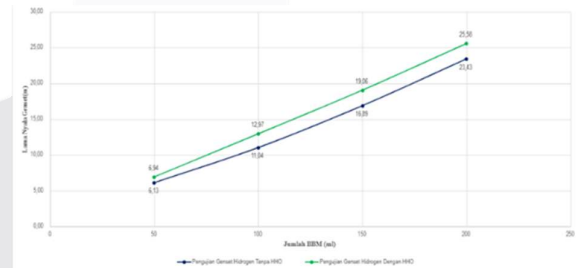


GAMBAR 5

Grafik Perbandingan Lama Nyala Genset Pertamina Tanpa dan Dengan HHO Tahap 2

Berdasarkan Gambar 5, penambahan gas HHO meningkatkan lama nyala genset pada semua volume bahan bakar, dengan selisih kecil pada 50 mL (0,92 menit) dan 100 mL (0,76 menit), serta lebih besar pada 150 mL (1,91 menit) dan 200 mL (2,48 menit). Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak bahan bakar yang digunakan, semakin besar pula kontribusi gas HHO dalam memperpanjang durasi nyala genset.

2. Bensin Jenis Pertalite



GAMBAR 6

Grafik Perbandingan Lama Nyala Genset Pertalite Tanpa dan Dengan HHO Tahap 2

Berdasarkan Gambar 6, penambahan gas HHO terbukti memperpanjang waktu nyala genset pada seluruh volume bahan bakar, dengan peningkatan dari 0,71 menit pada 50 mL hingga lebih dari 2 menit pada 150 mL dan 200 mL. Tren ini menunjukkan bahwa gas HHO membuat pembakaran lebih sempurna sehingga energi dari bahan bakar yang sama dapat dimanfaatkan lebih optimal.

C. Tahap 3: Pengujian Genset Dengan Beban

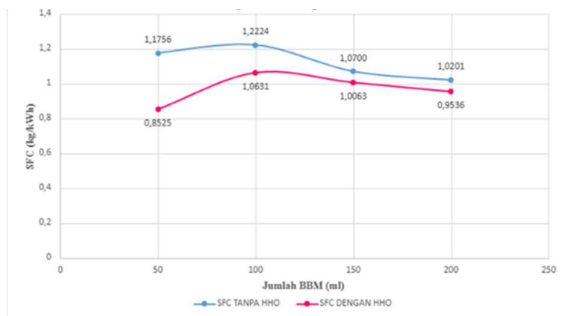
1. Bensin Jenis Pertamina



GAMBAR 7

Grafik Perbandingan Lama Nyala Genset Pertamax Tanpa dan Dengan HHO Tahap 3

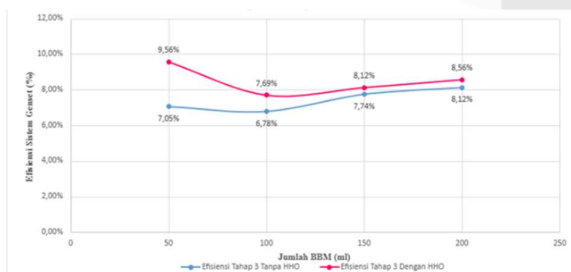
Hasil pengujian pada Gambar 7 memperlihatkan bahwa penambahan gas HHO secara konsisten memperpanjang lama nyala genset pada semua variasi volume BBM, dengan peningkatan durasi antara 0,73 hingga 1,32 menit. Peningkatan ini terjadi karena sifat hidrogen yang mudah terbakar dan memiliki kecepatan pembakaran tinggi, sehingga mampu meningkatkan efisiensi proses pembakaran di dalam ruang bakar..



GAMBAR 8

Grafik Perbandingan SFC Genset Pertamax Tanpa dan Dengan HHO Tahap 3

Grafik pada Gambar 8 menunjukkan bahwa penambahan gas HHO mampu menurunkan nilai Specific Fuel Consumption (SFC) genset Pertamax pada semua variasi volume BBM. Penurunan paling besar terjadi pada 50 mL mencapai 27,5%, sedangkan pada 100–200 mL selisihnya berkisar 6–13%. Hal ini membuktikan bahwa gas HHO efektif meningkatkan efisiensi pembakaran, terutama pada volume kecil ketika kontribusinya lebih dominan terhadap campuran bahan bakar.



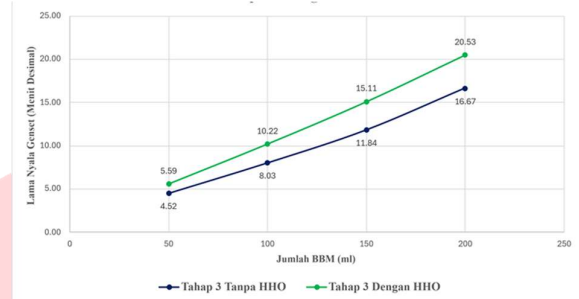
GAMBAR 9

Grafik Perbandingan Efisiensi Sistem Genset Pertamax Tanpa dan Dengan HHO Tahap 3

Pengujian tahap 3 menunjukkan bahwa penambahan gas HHO meningkatkan efisiensi genset berbahan bakar

Pertamax pada semua variasi volume BBM dengan beban 1000 watt. Efisiensi tertinggi terlihat pada volume 50 mL, di mana HHO memberikan selisih 2,51%, sedangkan pada volume 100–200 mL selisihnya lebih kecil, hanya 0,38–0,91%. Hal ini menunjukkan bahwa gas HHO membantu pembakaran menjadi lebih sempurna dan menghasilkan output listrik lebih besar, terutama pada volume kecil ketika rasio HHO terhadap BBM lebih dominan.

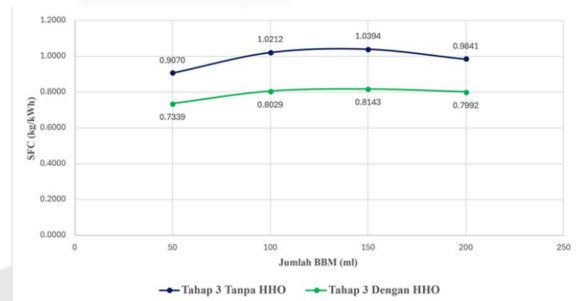
2. Bensin Jenis Peralite



GAMBAR 10

Grafik Perbandingan Lama Nyala Genset Peralite Tanpa dan Dengan HHO Tahap 3

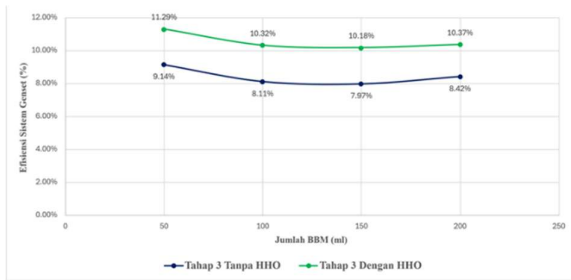
Berdasarkan Gambar 10, penambahan gas HHO terbukti memperpanjang waktu nyala genset pada seluruh variasi volume bahan bakar, dengan peningkatan bertahap dari 1,07 menit pada 50 mL hingga 3,86 menit pada 200 mL. Konsistensi kenaikan ini menunjukkan bahwa gas HHO mampu meningkatkan efisiensi pembakaran sehingga genset dapat beroperasi lebih lama dalam kondisi berbeban.



GAMBAR 11

Grafik Perbandingan SFC Genset Peralite Tanpa dan Dengan HHO Tahap 3

Berdasarkan grafik Gambar 11, penambahan gas HHO terbukti menurunkan nilai Specific Fuel Consumption (SFC) pada semua titik pengujian. Tanpa gas HHO, SFC berkisar 0,9070–1,0394 kg/kWh, sedangkan dengan gas HHO lebih rendah yaitu 0,7339–0,8143 kg/kWh. Selisih terbesar terjadi pada volume 50 mL dengan penghematan signifikan dari 0,9070 menjadi 0,7339 kg/kWh. Kedua kurva menunjukkan pola serupa, meningkat hingga 150 mL lalu menurun pada 200 mL. Hasil ini menegaskan bahwa gas HHO mampu memperbaiki proses pembakaran, meningkatkan efisiensi konversi energi, serta menghemat bahan bakar, terutama pada volume rendah hingga menengah.



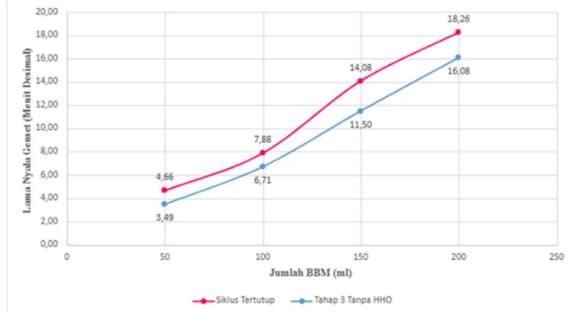
GAMBAR 12
Grafik Perbandingan Efisiensi Sistem Genset Peralite Tanpa dan Dengan HHO Tahap 3

Berdasarkan Gambar 12, penambahan gas HHO meningkatkan efisiensi genset pada seluruh volume bahan bakar, dengan kenaikan dari 9,14% menjadi 11,29% pada 50 mL hingga dari 8,42% menjadi 10,37% pada 200 mL. Peningkatan konsisten ini membuktikan bahwa gas HHO tidak hanya mengurangi konsumsi bahan bakar, tetapi juga memaksimalkan konversi energi sehingga kinerja genset lebih optimal di setiap kondisi pengujian.

D. Tahap 4: Pengujian Siklus Tertutup

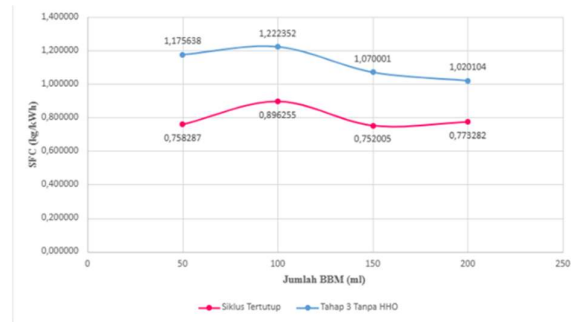
- Perbandingan Siklus Tertutup dengan Tahap 3 Tanpa Gas HHO

1. Bensin Jenis Pertamina



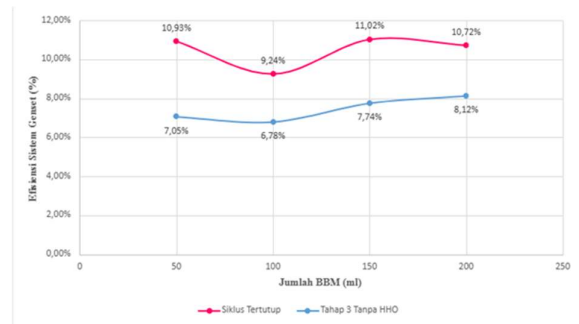
GAMBAR 13
Grafik Perbandingan Lama Nyala Genset Pertamina Tahap 3 Tanpa HHO dan Siklus Tertutup

Berdasarkan Gambar 13, siklus tertutup selalu menghasilkan lama nyala genset lebih tinggi dibanding tahap 3 tanpa gas HHO pada seluruh volume BBM, dengan selisih waktu antara 1,17 hingga 2,58 menit. Peningkatan paling besar terjadi pada volume 150 mL, menunjukkan efisiensi pembakaran yang lebih optimal, sementara pada volume tertinggi (200 mL) siklus tertutup tetap unggul sehingga terbukti mampu memaksimalkan pemanfaatan bahan bakar untuk menghasilkan waktu operasi lebih panjang.



GAMBAR 14
Grafik Perbandingan SFC Genset Pertamina Tahap 3 Tanpa HHO dan Siklus Tertutup

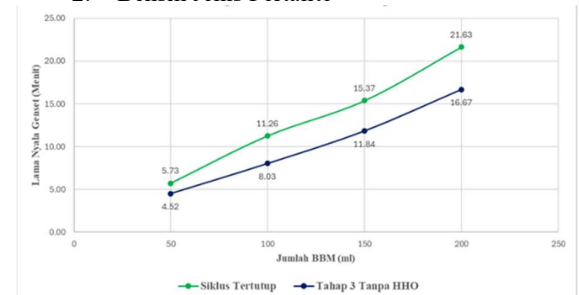
Berdasarkan Gambar 14, sistem siklus tertutup menunjukkan nilai Specific Fuel Consumption (SFC) yang lebih rendah dibandingkan tahap 3 tanpa gas HHO pada semua variasi volume BBM, dengan penurunan antara 0,246–0,417 kg/kWh. Hal ini membuktikan bahwa siklus tertutup mampu meningkatkan efisiensi pembakaran, karena menghasilkan energi listrik lebih besar per satuan massa bahan bakar yang digunakan.



GAMBAR 15
Grafik Perbandingan Efisiensi Sistem Genset Pertamina Tahap 3 Tanpa HHO dan Siklus Tertutup

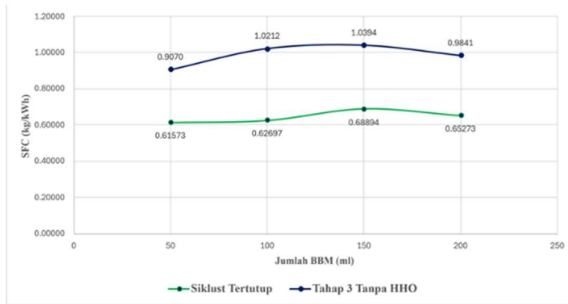
Grafik Gambar 15 menunjukkan bahwa sistem siklus tertutup selalu lebih efisien dibanding tahap 3 tanpa gas HHO pada semua volume BBM. Efisiensi tertinggi dicapai pada 150 mL sebesar 11,02% dibanding 7,74% pada tahap 3, sedangkan pada volume lain selisihnya tetap lebih dari 2–3%. Hal ini menegaskan bahwa siklus tertutup mampu menjaga efisiensi tinggi dan stabil melalui optimalisasi pembakaran serta pengurangan kehilangan energi, sehingga pemanfaatan bahan bakar menjadi lebih maksimal.

2. Bensin Jenis Peralite



GAMBAR 16
Grafik Perbandingan Lama Nyala Genset Peralite Tahap 3 Tanpa HHO dan Siklus Tertutup

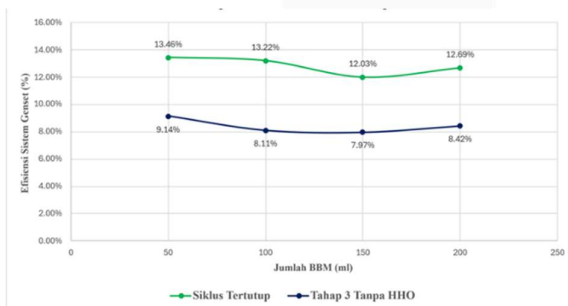
Berdasarkan Gambar 16, lama nyala genset dengan siklus tertutup lebih unggul dibanding tahap 3 tanpa gas HHO pada seluruh volume bahan bakar, dengan peningkatan waktu operasi antara 1,21 hingga 4,96 menit. Kenaikan ini menunjukkan bahwa siklus tertutup mampu memanfaatkan energi lebih optimal, sehingga genset dapat beroperasi lebih lama dengan jumlah BBM yang sama dan menghasilkan efisiensi pembakaran yang lebih baik, terutama pada volume bahan bakar yang lebih besar.



GAMBAR 17

Grafik Perbandingan SFC Genset Pertalite Tahap 3 Tanpa HHO dan Siklus Tertutup

Berdasarkan Gambar 17, sistem siklus tertutup dengan gas HHO secara konsisten menghasilkan nilai Specific Fuel Consumption (SFC) yang lebih rendah dibandingkan tahap 3 tanpa gas HHO pada semua variasi volume bensin Pertalite, dengan selisih terbesar terjadi pada volume 150 mL. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan gas HHO dalam siklus tertutup mampu menekan konsumsi bahan bakar spesifik secara signifikan, sehingga meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi genset pada setiap variasi beban.

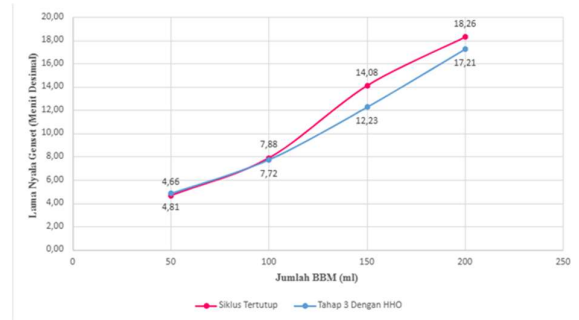


GAMBAR 18

Grafik Perbandingan Efisiensi Sistem Genset Pertalite Tahap 3 Tanpa HHO dan Siklus Tertutup

Grafik Gambar 18 menunjukkan bahwa sistem siklus tertutup pada genset Pertalite selalu menghasilkan efisiensi lebih tinggi dibanding tahap 3 tanpa gas HHO di semua volume BBM. Efisiensi meningkat signifikan, misalnya dari 9,14% menjadi 13,46% pada 50 mL dan dari 8,11% menjadi 13,22% pada 100 mL, sementara pada 150–200 mL tetap jauh lebih unggul dengan selisih 3–4%. Hal ini membuktikan bahwa siklus tertutup mampu memanfaatkan energi pembakaran lebih optimal sehingga daya keluaran per jumlah bahan bakar lebih besar, sekaligus menegaskan keunggulannya dalam meningkatkan kinerja genset pada semua kondisi pengujian.

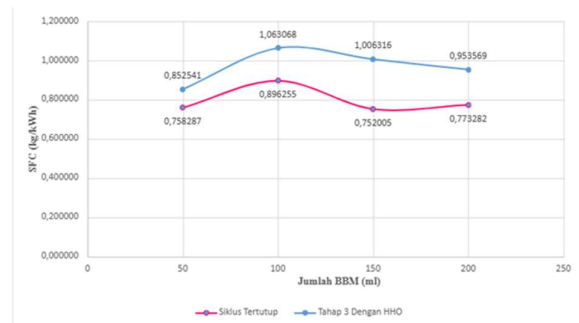
- Perbandingan Siklus Tertutup dengan Tahap 3 Menggunakan Gas HHO
 1. Bensin Jenis Pertamax



GAMBAR 19

Grafik Perbandingan Lama Nyala Genset Pertamax Tahap 3 Dengan HHO dan Tahap 4

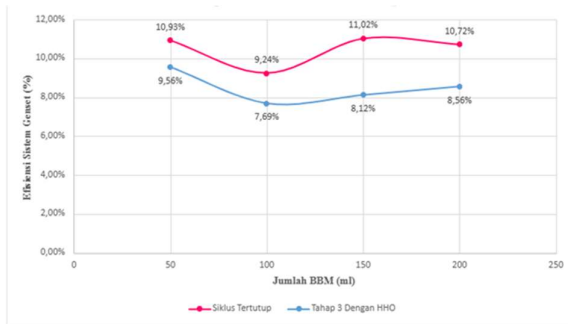
Grafik Gambar 19 menunjukkan bahwa secara umum lama nyala genset pada tahap 4 lebih panjang dibandingkan tahap 3 dengan gas HHO pada volume BBM yang sama. Selisih paling besar terjadi pada 150 mL, yaitu 1,85 menit (14,08 menit di tahap 4 vs 12,23 menit di tahap 3), dan pada 200 mL perbedaan masih cukup signifikan sebesar 1,05 menit. Sementara itu, pada 100 mL selisihnya kecil yaitu 0,16 menit, dan pengecualian hanya terjadi pada 50 mL, di mana tahap 3 sedikit lebih unggul. Secara keseluruhan, tren ini menunjukkan bahwa sistem pada tahap 4 lebih efektif dalam memperpanjang durasi nyala genset dibandingkan tahap 3.



GAMBAR 20

Grafik Perbandingan SFC Genset Pertamax Tahap 3 Dengan HHO dan Tahap 4

Berdasarkan Gambar 20, sistem siklus tertutup menunjukkan nilai SFC yang lebih rendah dibanding tahap 3 dengan gas HHO pada semua volume BBM, dengan selisih yang bervariasi antara 0,094254 hingga 0,254311 kg/kWh. Hal ini menegaskan bahwa siklus tertutup lebih efisien dalam konsumsi bahan bakar spesifik, karena mampu menghasilkan energi dengan penggunaan BBM yang lebih sedikit pada setiap kondisi pengujian.

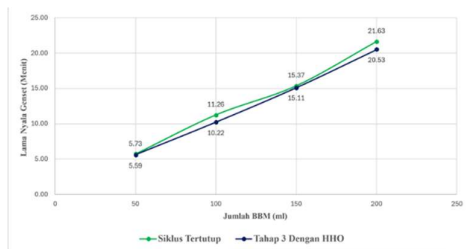


GAMBAR 21

Grafik Perbandingan Efisiensi Sistem Genset Pertamax Tahap 3 Dengan HHO dan Tahap 4

Grafik Gambar 21 menunjukkan bahwa sistem siklus tertutup selalu lebih efisien dibanding tahap 3 dengan gas HHO pada semua volume BBM. Efisiensi tertinggi dicapai pada 150 mL sebesar 11,02% dibanding 8,12% pada tahap 3, sementara pada volume lain selisihnya tetap signifikan. Hal ini membuktikan bahwa siklus tertutup mampu memanfaatkan panas buangan untuk meningkatkan konversi energi, menjaga kestabilan kinerja pada berbagai beban, serta lebih andal dalam mendukung pemanfaatan energi yang efisien dan berkelanjutan.

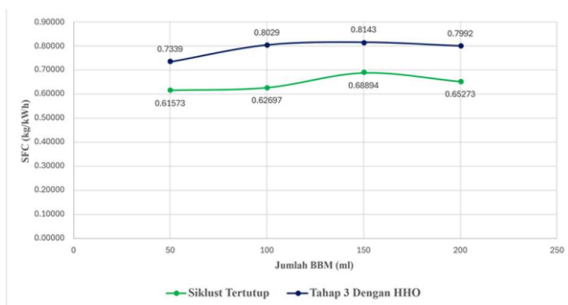
2. Bensin Jenis Peralite



GAMBAR 22

Grafik Perbandingan Lama Nyala Genset Peralite Tahap 3 Dengan HHO dan Tahap 4

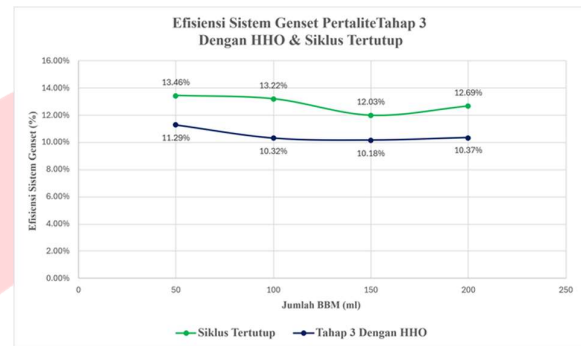
Berdasarkan Gambar 22, genset dengan sistem siklus tertutup (tahap 4) memiliki durasi nyala lebih lama dibanding tahap 3 dengan gas HHO pada semua volume BBM, dengan selisih waktu terbesar 1.10 menit pada 200 mL. Hal ini menunjukkan bahwa siklus tertutup mampu memanfaatkan energi lebih optimal dengan mengalirkan kembali listrik yang dihasilkan untuk menyalakan sistem HHO dan beban sekaligus, sehingga penggunaan bahan bakar lebih efisien dan kinerja genset lebih tahan lama, terutama pada durasi operasi yang lebih panjang.



GAMBAR 23

Grafik Perbandingan SFC Genset Peralite Tahap 3 Dengan HHO dan Tahap 4

Grafik Gambar 23 menunjukkan bahwa siklus tertutup selalu memiliki nilai SFC lebih rendah dibanding tahap 3 dengan gas HHO pada seluruh variasi volume BBM, menandakan efisiensi konversi bahan bakar yang lebih baik. Nilai SFC terendah tercatat pada 50 mL sebesar 0,61573 kg/kWh dibanding 0,7339 kg/kWh pada tahap 3, dan meskipun sempat meningkat di 100–150 mL, siklus tertutup tetap lebih unggul dengan selisih yang konsisten. Secara keseluruhan, pola ini menegaskan bahwa penggunaan gas HHO pada tahap 3 justru menghasilkan konsumsi bahan bakar spesifik lebih tinggi, sehingga belum mampu menyaingi efisiensi metode siklus tertutup.



GAMBAR 24

Grafik Perbandingan Efisiensi Sistem Genset Peralite Tahap 3 Dengan HHO dan Tahap 4

Berdasarkan Gambar 24, sistem siklus tertutup terbukti lebih efisien dibanding tahap 3 dengan gas HHO pada seluruh variasi volume bahan bakar, dengan peningkatan efisiensi paling tinggi terlihat pada volume 100 mL dan tetap konsisten hingga 200 mL. Hal ini menunjukkan bahwa selain menekan konsumsi bahan bakar, mekanisme sirkulasi energi pada siklus tertutup juga mampu meningkatkan daya keluaran bersih, sehingga kinerja genset menjadi lebih optimal, hemat, dan ramah energi, sekaligus memperkuat hasil SFC sebelumnya.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan kajian teori, pemanfaatan gas hidrogen hasil elektrolisis sebagai bahan bakar tambahan pada genset bensin maupun solar berpotensi meningkatkan efisiensi sistem, menurunkan konsumsi bahan bakar utama, serta mengurangi emisi berbahaya karena sifat hidrogen yang mudah terbakar dan mampu memperbaiki kualitas pembakaran. Penggabungan bahan bakar konvensional dengan hidrogen juga memungkinkan evaluasi performa genset secara lebih menyeluruh, sehingga teknologi ini dinilai mampu memberikan manfaat nyata dalam penghematan energi, peningkatan kinerja, dan mendukung transisi menuju energi yang lebih bersih serta berkelanjutan.

REFERENSI

- [1] BP, Statistical Review of World Energy 2023. BP Global, 2023. [Online]. Available: <https://www.bp.com>
- [2] International Energy Agency (IEA), Global Energy Review 2023: Fossil Fuel Consumption. IEA Publications, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org>

- [3] U.S. Department of Energy, "Hydrogen Storage," Energy.gov, 2023. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- [4] International Renewable Energy Agency (IRENA), World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5 °C Scenario, vol. 1. Abu Dhabi: IRENA, 2023.
- [5] Z. Fu, Y. Li, H. Chen, J. Du, Y. Li, and W. Gao, "Effect of hydrogen blending on the combustion performance of a gasoline direct injection engine," ACS Omega, vol. 7, no. 15, pp. 13022–13030, 2022. doi: 10.1021/acsomega.2c00343.
- [6] A. Akbar, I. Wardana, and L. Yulianti, "Pengaruh penambahan HHO terhadap kinerja dan ionisasi pembakaran motor bensin," Jurnal Rekayasa Mesin, vol. 5, no. 1, 2014.
- [7] F. A. Cosina, "Pengaruh penggunaan hidrogen hasil elektrolisis terhadap performa mesin pada sepeda motor," n.d.
- [8] O. Ridho and H. Ardiansyah, "Analisis penggunaan variasi bahan bakar minyak pertalite RON 90, pertamax RON 92, dan pertamax turbo RON 98 terhadap kinerja mesin genset," Skripsi, 2025.
- [9] S. P. Siregar and Joni, "Efek penambahan gas oksihidrogen pada proses pembakaran motor bensin silinder tunggal," G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan, vol. 7, no. 2, pp. 456–463, 2023. doi: 10.33379/gtech.v7i2.2272.
- [10] R. Chang, Kimia dasar: Konsep-konsep inti, 3rd ed. Jakarta: Erlangga, 2004.