

APLIKASI GAS HIDROGEN HASIL ELEKTROLISIS PADA MOTOR BAKAR (GENSET)

Nendang Haura Tri Rana Ahadist^{1*}, Suwandi², Nurwulan Fitriyanti³

^{1, 2, 3}Universitas Telkom

rakhaadhidevara@student.telkomuniversity.ac.id^{1*}, suwandi@telkomuniversity.ac.id², nurwulanf@telkomuniversity.ac.id³

Abstrak

Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, khususnya solar, masih mendominasi sektor energi pada penggunaan genset skala kecil. Namun, keterbatasan sumber daya dan dampak lingkungan dari bahan bakar ini menuntut adanya solusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Salah satu pendekatan yang ditawarkan adalah pemanfaatan gas HHO (campuran hidrogen dan oksigen) sebagai bahan tambahan untuk meningkatkan proses pembakaran. Penelitian ini mengintegrasikan sistem produksi gas HHO berbasis elektrolisis air yang langsung disuplai dari daya genset tanpa melalui proses penyimpanan. Gas HHO kemudian dialirkkan ke ruang bakar untuk memperbaiki karakteristik pembakaran solar. Metode penelitian dilakukan melalui pengujian eksperimental pada genset diesel 5 KVA dengan membandingkan kinerja sebelum dan sesudah penambahan HHO. Hasil pengujian menunjukkan adanya peningkatan efisiensi sistem genset, yaitu dari 20,50% menjadi 23,40%. Peningkatan ini dipengaruhi oleh sifat mesin diesel yang memiliki rasio kompresi tinggi dan pembakaran lebih stabil sehingga mampu memanfaatkan karakteristik HHO secara optimal. Kesimpulannya, penambahan gas HHO terbukti dapat menurunkan nilai konsumsi bahan bakar spesifik dan meningkatkan efisiensi pembakaran pada genset berbahan bakar solar, serta berpotensi dikembangkan sebagai solusi alternatif untuk meningkatkan kinerja energi pada sistem pembangkit skala kecil.

Kata kunci: Genset, Solar, Gas Hidrogen, SFC, Efisiensi Genset

I. PENDAHULUAN

Penggunaan bahan bakar fosil seperti 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 dan solar. Di Indonesia, penggunaan 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 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.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan untuk mengevaluasi pemanfaatan hidrogen sebagai bahan bakar tambahan (*co-fuel*) pada genset berbahan bakar solar. Tujuan utama penelitian adalah menganalisis apakah penambahan hidrogen dapat memperpanjang durasi operasional genset dengan volume bahan solar 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 secara umum 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.

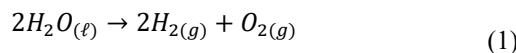
Genset solar menggunakan mesin diesel yang bekerja berdasarkan prinsip *compression ignition*, yaitu penyalakan bahan bakar terjadi akibat suhu tinggi hasil kompresi udara di dalam silinder. Mesin diesel memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan mesin bensin dan mampu menghasilkan torsi yang lebih besar, sehingga cocok digunakan untuk kebutuhan daya menengah hingga besar, seperti pada industri atau instansi. Genset diesel juga lebih tahan lama, tetapi cenderung menghasilkan suara yang lebih bising dan emisi gas buang yang lebih tinggi.

B. Hidrogen Sebagai Bahan Bakar Alternatif

Hidrogen merupakan salah satu sumber energi alternatif yang memiliki potensi besar karena bersifat ramah lingkunga. 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 (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)

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

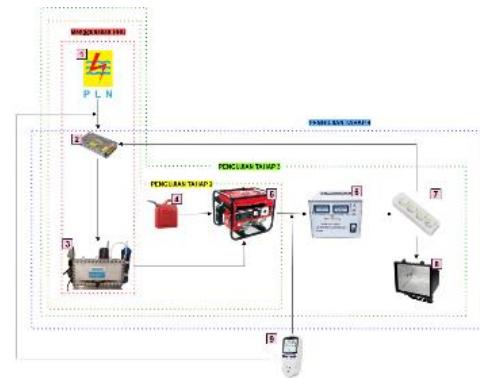
F. Efisiensi Sistem Genset dengan menggunakan gas HHO

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 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,

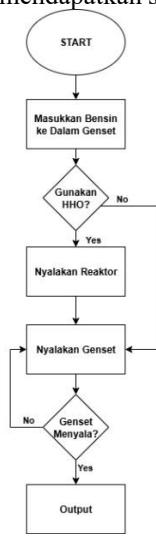
khususnya kandungan gas hidrogen (H_2) yang dihasilkan oleh reaktor elektrolisis untuk memastikan bahwa sistem dapat memproduksi hidrogen dengan kadar yang sesuai.

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 pengujian tanpa penambahan gas HHO dan pengujian dengan penambahan gas HHO. Rangkaian pengujian tanpa beban ini ditunjukkan pada Gambar 2.

Pada pengujian tahap 2 tanpa gas HHO, persiapan bahan bakar dilakukan dengan menyiapkan bahan bakar Solar. Bahan bakar diukur menggunakan gelas ukur dengan volume 50 mL, 100 mL, 150 mL, dan 200 mL, kemudian dituangkan ke dalam tangki genset. Genset yang digunakan adalah genset diesel 5 KVA. Setelah bahan bakar terisi, genset

dinyalakan menggunakan starter, kemudian stopwatch digital diaktifkan. Genset dibiarkan menyala tanpa diberi beban hingga bahan bakar habis dan genset mati dengan sendirinya. Stopwatch dimatikan saat genset berhenti total, lalu waktu lama nyala genset dicatat. Pengujian diulangi sebanyak tiga kali untuk setiap volume bahan bakar.

Pada pengujian tahap 2 dengan gas HHO, langkah persiapan bahan bakar diulangi seperti pada pengujian tanpa gas HHO, namun dengan tambahan memastikan bahwa selang keluaran gas dari reaktor elektrolisis telah terpasang rapat pada saluran masuk udara (intake) ruang bakar genset. Reaktor elektrolisis kemudian dihubungkan ke sumber listrik PLN dan watt meter untuk memantau konsumsi daya listriknya. Reaktor dinyalakan, dan proses pembentukan gelembung gas HHO pada larutan elektrolit di *bubbler* diamati sebagai tanda reaksi elektrolisis berlangsung. Setelah itu, genset dinyalakan seperti sebelumnya dan stopwatch diaktifkan segera setelah mesin menyala. Genset dibiarkan menyala tanpa beban hingga kehabisan bahan bakar, kemudian waktu lama nyala dicatat. Pengujian diulangi sebanyak tiga kali untuk masing-masing 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

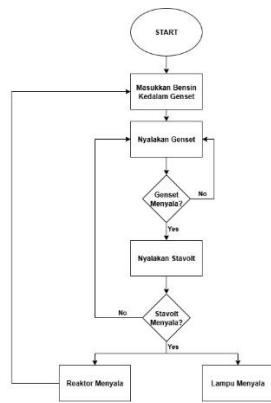
Pada tahap 3, dilakukan pengujian kinerja genset dengan beban, baik tanpa penambahan gas HHO maupun dengan penambahan gas HHO. Rangkaian pengujian tanpa beban ini ditunjukkan pada Gambar 3.

Pada pengujian tahap 3 tanpa gas HHO, sama seperti tahap 2, persiapan bahan bakar dilakukan dengan menyiapkan bahan bakar Solar. Bahan bakar diukur menggunakan gelas ukur dengan volume 50 mL, 100 mL, 150 mL, dan 200 mL, kemudian dituangkan ke dalam tangki genset. Output genset dihubungkan ke stavolt (stabilizer voltage) untuk menstabilkan tegangan keluaran lalu stavolt ditambahkan pemasangan watt meter pada stavolt untuk mengukur daya yang dihasilkan. Selanjutnya, stavolt dihubungkan ke kabel sambungan stopkontak (terminal ekstensi listrik) yang terhubung dengan beban berupa lampu halogen 1000 watt. Genset dan stopwatch diaktifkan secara bersamaan, kemudian kinerja beban diamati hingga genset mati akibat kehabisan bahan bakar. Waktu lama nyala genset dicatat, dan pengujian diulangi sebanyak tiga kali untuk setiap volume bahan bakar.

Pada pengujian tahap 3 dengan tambahan gas HHO, prosedur pengisian bahan bakar dilakukan sama seperti pada tahap sebelumnya, namun dilengkapi dengan pemasangan sistem suplai gas HHO. Selang keluaran gas dari reaktor elektrolisis dipastikan terhubung rapat ke saluran masuk udara (intake) mesin genset. Reaktor elektrolisis masih dihubungkan ke sumber listrik PLN melalui watt meter untuk memantau konsumsi dayanya. Selain itu, pada jalur keluaran listrik genset, watt meter juga ditempatkan sebelum stavolt untuk mengukur daya yang dihasilkan. Setelah reaktor dinyalakan, terbentuknya gelembung gas HHO pada larutan elektrolit di *bubbler* diamati sebagai indikasi proses elektrolisis berlangsung. Selanjutnya, genset dinyalakan dan stopwatch diaktifkan segera setelah mesin mulai beroperasi. Genset dioperasikan dengan beban seperti lampu halogen 1000 watt hingga bahan bakar habis, sambil mencatat semua parameter yang diperlukan. Waktu lama nyala genset dicatat, dan pengujian diulangi sebanyak 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 ini seperti yang terlihat pada Gambar 4 merupakan pengujian akhir yang bertujuan untuk mengetahui kinerja genset ketika sistem dijalankan dalam kondisi siklus tertutup, yaitu tanpa pasokan listrik eksternal (PLN) untuk reaktor elektrolisis. Bahan bakar yang digunakan pada pengujian ini masih memiliki volume yang sama seperti tahap sebelumnya, yaitu 50 mL, 100 mL, 150 mL, dan 200 mL. Output genset disalurkan terlebih dahulu ke stavolt (*stabilizer voltage*) untuk memastikan tegangan tetap stabil selama pengujian, dengan tambahan pemasangan watt meter pada stavolt untuk memantau konsumsi daya listrik reaktor selama pengujian. Dari stavolt, daya dialirkan ke kabel sambungan stopkontak (terminal ekstensi listrik) yang terhubung ke dua beban, yaitu lampu halogen 1000 watt dan reaktor elektrolisis. Selang keluaran reaktor kemudian dihubungkan ke intake ruang bakar genset agar gas HHO yang dihasilkan dapat langsung dimanfaatkan sebagai bahan bakar tambahan.

Proses pengujian dimulai dengan menyalakan genset, yang secara otomatis menyuplai daya ke stavolt dan selanjutnya ke kedua beban. Ketika reaktor elektrolisis mulai beroperasi, gas HHO segera diproduksi dan masuk ke ruang bakar genset untuk mendukung proses pembakaran bersama bahan bakar utama. Stopwatch dinyalakan bersamaan dengan start genset, dan sistem dibiarkan bekerja sepenuhnya dalam kondisi siklus tertutup hingga genset mati kehabisan bahan bakar. Waktu nyala kemudian dicatat sebagai parameter pengujian. Proses ini diulang sebanyak tiga kali untuk setiap variasi volume bahan bakar guna memperoleh data yang lebih akurat dan dapat dianalisis secara statistik.

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)

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)

Ne 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.

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

Keterangan:

Ne = Daya efektif mesin (kW)

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

$\eta_{genset} = 1,0$ (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.

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

Keterangan:

SFC = Konsumsi bahan bakar spesifik (kg/kWh)

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

Ne = 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).

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

Keterangan:

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

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

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

P_{PLN} = Daya reaktor (95 W)

P_{PLN} (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).

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

Keterangan:

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

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

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

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Tahap 1: Produksi Hidrogen

TABEL 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 menggunakan larutan NaOH dianalisis menggunakan alat Gas Chromatography dengan Thermal Conductivity Detector (GC-TCD), yang terdiri dari front detector dan back detector di Laboratorium Instrumentasi, Fakultas Teknik

Sipil dan Lingkungan (FTSL), Institut Teknologi Bandung (ITB).

Dari hasil back detector pada Tabel 1 terdeteksi tiga jenis gas utama, yaitu hydrogen (H_2), oksigen (O_2), dan nitrogen (N_2). Gas hydrogen muncul pada waktu retensi 2.04 menit dengan area puncak sebesar 0.014 mV·menit dan memberikan kontribusi sebesar 23.8800% terhadap totalitas gas yang terdeteksi. Hal ini menegaskan bahwa hidrogen merupakan produk utama dari proses elektrolisis air.

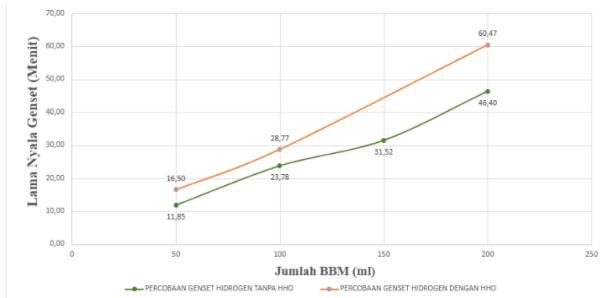
Sementara itu, gas oksigen terdeteksi pada waktu retensi 2.78 menit dengan area 1.179 mV·menit dan komposisi 13.2337%. Rasio volume teoritis antara H_2 dan O_2 dari elektrolisis air adalah 2:1, dan hasil pengujian ini menunjukkan kecocokan dengan teori reaksi kimia elektrolisis air sebelumnya yang ada di Persamaan (1).

Selain itu, gas nitrogen juga terdeteksi pada waktu retensi 4.71 menit dengan area 0.068 mV·menit, namun tidak disertai nilai persentase volumenya. Nitrogen ini kemungkinan besar berasal dari udara sekitar yang masuk saat proses pengambilan sampel atau pengisian kantong gas, sehingga dianggap sebagai kontaminan minor yang tidak berasal dari proses elektrolisis itu sendiri.

Sementara itu, hasil dari front detector pada Tabel 1 juga menunjukkan keberadaan satu jenis gas tambahan, yaitu karbon dioksida (CO_2). Gas ini terdeteksi pada waktu retensi 3.63 menit, dengan area puncak 0.016 mV·menit dan hanya menyumbang 0.0456% dari total campuran gas. Karbon dioksida tersebut kemungkinan berasal dari kontaminasi lingkungan saat pengambilan sampel gas. Nilai ini tergolong sangat kecil, sehingga dapat disimpulkan bahwa karbon dioksida bukanlah produk utama dari proses elektrolisis.

Pengujian tahap 1 ini menunjukkan bahwa reaktor elektrolisis yang digunakan berjalan dengan baik dan mampu menghasilkan gas HHO dengan efisiensi relatif tinggi. Keberhasilan deteksi dan pemisahan gas-gas ini dengan GC-TCD juga menunjukkan bahwa sistem analisis berjalan dengan akurasi dan sensitivitas yang baik. Data ini menjadi dasar penting untuk melanjutkan pengujian tahap berikutnya yang melibatkan aplikasi gas hidrogen sebagai bahan bakar alternatif untuk genset.

B. Tahap 2: Pengujian Genset Tanpa Beban



GAMBAR 5.
GRAFIK PERBANDINGAN LAMA NYALA GENSET SOLAR TANPA DAN DENGAN HHO TAHAP 2

Pengujian pada tahap ini bertujuan untuk melihat dampak awal dari keberadaan gas HHO terhadap kestabilan genset berbahan bakar solar dalam kondisi tanpa beban. Grafik menunjukkan hubungan antara jumlah bahan bakar

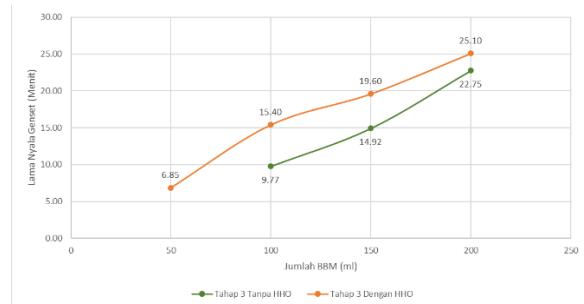
yang digunakan (mL) dengan lama nyala genset (menit) untuk dua kondisi, yaitu tanpa gas HHO dan dengan gas HHO.

Secara umum, hasil pengujian pada Gambar 5 memperlihatkan bahwa penambahan gas HHO mampu memperpanjang lama nyala genset pada semua volume bahan bakar yang diuji. Terlihat bahwa pada setiap jumlah BBM, garis pada kondisi dengan gas HHO berada di atas grafik tanpa gas HHO, yang berarti waktu operasional genset lebih lama. Pola grafik menunjukkan hubungan cenderung linier antara jumlah BBM dan lama nyala, namun kemiringan garis pada kondisi dengan HHO lebih besar, menunjukkan bahwa setiap penambahan bahan bakar memberikan tambahan durasi lama nyala yang lebih besar jika dibandingkan dengan kondisi tanpa gas HHO.

Selain memberikan tambahan waktu operasi, hasil pengujian juga menunjukkan bahwa keberadaan gas HHO tidak memberikan perubahan signifikan terhadap kestabilan kerja mesin. Selama pengoperasian tanpa beban, kestabilan putaran mesin tetap berada pada kondisi normal, tanpa fluktuasi besar maupun indikasi penurunan performa. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan gas HHO pada kondisi tanpa beban tidak menimbulkan efek negatif terhadap kestabilan performa mesin genset.

Dengan demikian, pada pengujian tahap 2 ini, penambahan gas HHO terbukti bisa memberikan perpanjangan durasi operasional pada seluruh variasi jumlah BBM yang diuji, dengan kestabilan mesin genset yang tetap normal.

C. Tahap 3: Pengujian Genset Dengan Beban

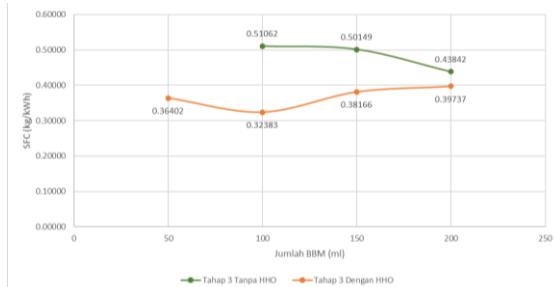


GAMBAR 6.
GRAFIK PERBANDINGAN LAMA NYALA GENSET SOLAR TANPA DAN DENGAN HHO TAHAP 3

Pengujian pada tahap 3 ini bertujuan untuk menilai perbedaan performa dan efisiensi antara sistem konvensional dan sistem *hybrid* berbasis gas HHO saat genset berbahan bakar solar bekerja dengan beban nyata. Beban yang digunakan dalam pengujian ini adalah lampu halogen 1000 Watt. Grafik pada Gambar 6 menunjukkan hubungan antara jumlah bahan bakar yang digunakan (mL) dengan lama nyala genset (menit) untuk dua kondisi, yaitu tanpa gas HHO dan dengan gas HHO.

Hasil pengujian ini memperlihatkan bahwa pada semua volume bahan bakar, penggunaan gas HHO menghasilkan durasi operasional yang lebih lama dibandingkan tanpa menggunakan gas HHO. Pada setiap titik pengujian, garis pada kondisi dengan gas HHO berada di atas garis tanpa gas

HHO, menandakan adanya kontribusi waktu tambahan dari penggunaan gas HHO. Meskipun jarak antara kedua garis tidak sebesar yang terlihat pada tahap 2 tanpa beban, perbedaan tetap konsisten, menunjukkan bahwa gas HHO masih bisa memberikan pengaruh positif ketika genset diberi beban.



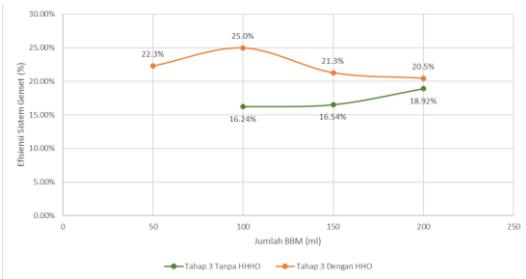
GAMBAR 7

GRAFIK PERBANDINGAN SFC GENSET SOLAR TANPA DAN DENGAN HHO TAHAP 3

Dari grafik Gambar 7 terlihat bahwa nilai SFC (*Spesific Fuel Consumption*) pada kondisi dengan gas HHO secara konsisten lebih rendah dibandingkan dengan tanpa gas HHO di semua variasi jumlah bahan bakar yang diuji. Nilai SFC yang lebih rendah menunjukkan bahwa untuk menghasilkan daya keluaran yang sama, sistem dengan gas HHO membutuhkan bahan bakar yang lebih sedikit.

Pada kondisi tanpa gas HHO, nilai SFC berada dikisaran 0.43-0.51 kg/kWh, sedangkan pada kondisi dengan gas HHO berkisar antara 0.32-0.39 kg/kWh. perbedaan ini mengindikasikan bahwa penggunaan gas HHO mampu menurunkan kebutuhan bahan bakar spesifik tergantung pada volume bahan bakar yang digunakan.

Pola grafik menunjukkan bahwa penurunan SFC terbesar terjadi pada titik beban dengan volume bahan bakar rendah hingga menengah, yang menandakan bahwa efek efisiensi penggunaan gas HHO lebih optimal pada kondisi konsumsi bahan bakar tidak terlalu tinggi. Pada volume bahan bakar yang lebih besar, perbedaan SFC antara kedua sistem sedikit mengecil dikarenakan pembakaran sudah mendekati batas optimal pada beban penuh.



GAMBAR 8.

GRAFIK PERBANDINGAN EFISIENSI SISTEM GENSET SOLAR TANPA DAN DENGAN HHO TAHAP 3

Selanjutnya, pada grafik Gambar 8 di atas menunjukkan bahwa pada seluruh variasi jumlah bahan bakar yang diuji, efisiensi sistem dengan menggunakan gas HHO selalu berada di atas efisiensi sistem saat tanpa menggunakan gas HHO. Artinya, pada daya keluaran yang sama, sistem dengan

gas HHO mampu memanfaatkan energi dari bahan bakar secara optimal.

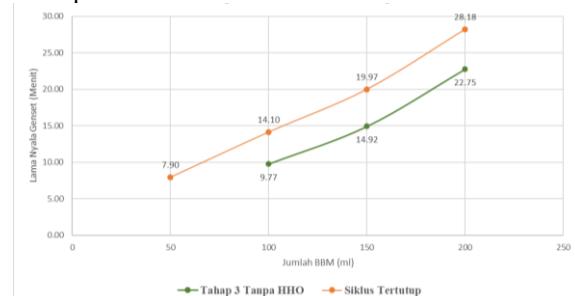
Pada kondisi tanpa gas HHO, efisiensi berkisar antara $\pm 16\%$ hingga 18% , sedangkan pada kondisi dengan gas HHO efisiensi berada pada rentang $\pm 20\%$ hingga 25% . Selisih efisiensi terbesar terlihat pada volume bahan bakar rendah hingga menengah, menunjukkan bahwa keberadaan gas HHO memberikan pengaruh paling signifikan ketika konsumsi bahan bakar tidak terlalu tinggi.

Meskipun terdapat sedikit penurunan efisiensi pada titik beban tertentu pada sistem dengan gas HHO, secara keseluruhan nilai efisiensi tinggi dibandingkan sistem konvensional menunjukkan bahwa campuran udara dan bahan bakar diperkaya gas HHO mampu menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna. Hal ini sejalan dengan hasil pengujian *Spesific Fuel Consumption* (SFC) sebelumnya, di mana penggunaan gas HHO membutuhkan lebih sedikit bahan bakar untuk menghasilkan daya yang sama.

Secara keseluruhan, hasil pengujian tahap 3 ini menunjukkan bahwa penambahan gas HHO pada genset berbahan bakar solar dengan beban nyata mampu memperpanjang waktu operasi, menurunkan konsumsi bahan bakar spesifik (SFC), dan meningkatkan efisiensi sistem dibandingkan dengan sistem konvensional. Walaupun diberi beban kerja yang signifikan, kestabilan putaran mesin genset juga tetap terjaga dengan baik pada kondisi dengan maupun tanpa gas HHO, menandakan bahwa sistem mampu mempertahankan kinerja tanpa menimbulkan gangguan operasional.

D. Tahap 4: Pengujian Siklus Tertutup

1. Perbandingan Siklus Tertutup dengan Tahap 3 Tanpa Gas HHO



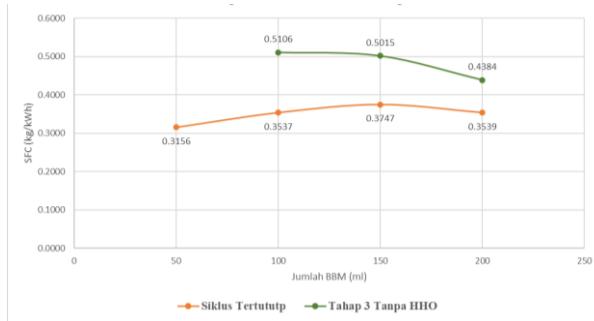
GAMBAR 9.

GRAFIK PERBANDINGAN LAMA NYALA GENSET SOLAR TAHAP 3 TANPA HHO DAN SIKLUS TERTUTUP

Pengujian tahap 4 ini bertujuan untuk menilai kelayakan sistem dalam skema berkelanjutan dan independent dari sumber listrik eksternal. Sistem ini dirancang bekerja dalam siklus energi tertutup di mana output listrik dari genset digunakan untuk menopang beban nyata berupa lampu halogen 1000 watt sekaligus menyuplai daya ke reaktor elektrolisis. Reaktor ini menghasilkan gas HHO yang kemudian dimasukkan kembali ke ruang bakar genset sebagai campuran bahan bakar tambahan.

Dari hasil pengujian Gambar 9 terlihat bahwa durasi nyala genset pada sistem siklus tertutup secara

konsisten lebih lama dibandingkan dengan sistem tahap 3 tanpa gas HHO di semua variasi volume bahan bakar. Perbedaan waktu lama nyala berkisar antara ± 1.2 hingga ± 5.43 menit lebih lama pada siklus tertutup. Hal ini menandakan bahwa meskipun sebagian daya genset digunakan untuk mengoperasikan reaktor elektrolisis, keuntungan yang diperoleh dari pembakaran yang lebih baik akibat penambahan gas HHO masih mampu menambah lama nyala mesin secara signifikan.

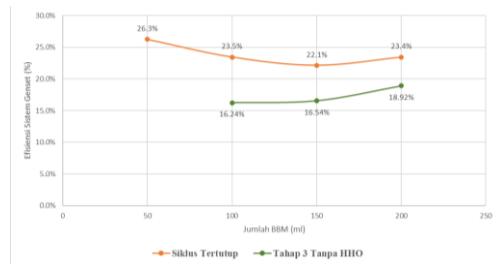


GAMBAR 10.

GRAFIK PERBANDINGAN SFC GENSET SOLAR TAHAP 3 TANPA HHO DAN SIKLUS TERTUTUP

Dari grafik SFC Gambar 10 di atas, dapat dilihat bahwa nilai SFC pada kondisi siklus tertutup secara konsisten lebih rendah dibandingkan dengan tahap 3 tanpa gas HHO di semua titik pengujian. Kisaran nilai SFC untuk siklus tertutup berada pada rentang ± 0.31 - 0.37 kg/kWh, sedangkan pada kondisi tanpa gas HHO berkisar antara ± 0.43 - 0.51 kg/kWh. Nilai SFC yang lebih rendah menunjukkan bahwa untuk menghasilkan daya keluaran yang sama, sistem siklus tertutup memerlukan bahan bakar yang lebih sedikit.

Pola grafik juga menunjukkan bahwa keunggulan nilai SFC pada siklus tertutup tetap terlihat di semua variasi pengujian, dengan selisih yang cenderung lebih besar pada volume bahan bakar rendah hingga menengah. Hal ini mengindikasikan bahwa suplai gas HHO yang dihasilkan secara internal dari output genset mampu mengurangi kebutuhan bahan bakar fosil secara lebih signifikan pada berbagai tingkat penggunaan bahan bakar.



GAMBAR 11.

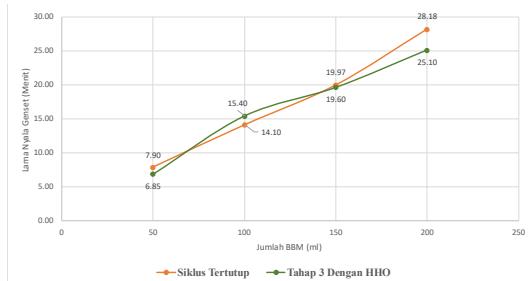
GRAFIK PERBANDINGAN EFISIENSI SISTEM GENSET SOLAR TAHAP 3 TANPA HHO DAN SIKLUS TERTUTUP

Grafik efisiensi pada Gambar 11 menunjukkan bahwa sistem tertutup memiliki nilai efisiensi yang secara konsisten lebih tinggi dibandingkan sistem tahap

3 tanpa gas HHO di semua titik pengujian. Saat pengujian siklus tertutup pada kondisi awal (bahan bakar rendah), efisiensi mencapai 26.3% karena rasio suplai gas HHO terhadap total bahan bakar lebih besar, sehingga pengaruh gas HHO terhadap total bahan bakar lebih besar, sehingga pengaruh gas HHO dalam memperbaiki proses pembakaran menjadi lebih signifikan. Seiring bertambahnya volume bahan bakar, kontribusi relative gas HHO menurun, membuat kenaikan energi yang dihasilkan tidak sebanding dengan penambahan konsumsi bahan bakar, sehingga efisiensi menurun hingga titik terendah 22.1%. Pada titik beban tertinggi, efisiensi kembali meningkat menjadi 23.4% karena pembakaran mendekati kondisi kerja mesin yang lebih stabil sehingga efek sinergi antara solar dan gas HHO kembali terasa.

Sementara itu, sistem tanpa gas HHO hanya berada pada kisaran ± 16 - 18 %. Artinya, meskipun dalam skema siklus tertutup di mana daya reaktor elektrolisis diambil dari output geset itu sendiri, performa efisiensi sistem tetap lebih baik. Hal ini menunjukkan bahwa walaupun diberi beban, sistem mampu mempertahankan keunggulan efisiensinya dan layak untuk digunakan dalam operasi berkelanjutan tanpa sumber listrik eksternal.

2. Perbandingan Siklus Tertutup dengan Tahap 3 Dengan Gas HHO



GAMBAR 12.

GRAFIK PERBANDINGAN LAMA NYALA GENSET SOLAR TAHAP 3 TANPA HHO DAN SIKLUS TERTUTUP

Pengujian siklus tertutup berikutnya dibandingkan dengan pengujian tahap 3 dengan gas HHO yang di mana suplai listrik untuk reaktor pada pengujian tahap 3 berasal dari sumber listrik PLN. Grafik pada Gambar 12 menunjukkan bahwa durasi nyala genset terlihat lebih lama pada saat pengujian siklus tertutup di hampir semua variasi volume bahan bakar yang diuji. Pengujian siklus tertutup memberikan peningkatan durasi nyala genset antara ± 7 menit hingga 28 menit, sedangkan pada pengujian tahap 3 menggunakan gas HHO memiliki rentang durasi nyala antara 6 menit hingga 25 menit. Rentang ini menunjukkan bahwa pada setiap variasi volume bahan bakar yang diuji, sistem tertutup secara konsisten menghasilkan waktu lama nyala lebih panjang dibandingkan pengujian tahap 3 saat menggunakan gas HHO dari sumber listrik PLN.

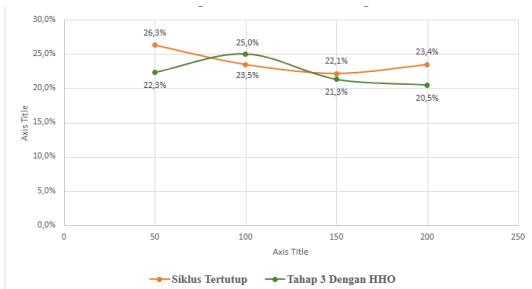


GAMBAR 13.

GRAFIK PERBANDINGAN SFC GENSET SOLARE TAHAP 3 TANPA HHO DAN SIKLUS TERTUTUP

Dari grafik Gambar 13 di atas, terlihat juga bahwa nilai SFC (Spesific Fuel Consumption) pada pengujian siklus tertutup secara umum masih menunjukkan tren yang lebih rendah dibandingkan dengan pengujian tahap 3 saat menggunakan gas HHO dari sumber listrik PLN. Nilai SFC lebih rendah ini menunjukkan bahwa sistem tersebut tetap mampu menghasilkan daya keluaran dengan konsumsi bahan bakar yang lebih efisien.

Nilai SFC pada pengujian tahap 3 dengan gas HHO berada dalam rentang ± 0.32 - 0.38 kg/kWh, sedangkan pada pengujian siklus tertutup berkisar antara ± 0.31 - 0.29 kg/kWh. Meskipun pada titik volume bahan bakar 200 mL siklus tertutup menunjukkan nilai SFC sedikit lebih tinggi (0.3974 kg/kWh) dibandingkan dengan pengujian tahap 3 dengan gas HHO (0.3539 kg/kWh), pada sebagian besar titik lainnya siklus tertutup tetap menunjukkan nilai SFC yang lebih baik.



GAMBAR 14.

GRAFIK PERBANDINGAN EFISIENSI SISTEM GENSET SOLAR TAHAP 3 DENGAN HHO DAN SIKLUS TERTUTUP

Grafik efisiensi pada Gambar 14 menunjukkan bahwa pengujian siklus tertutup memiliki nilai efisiensi yang secara umum lebih tinggi dibandingkan pengujian tahap 3 menggunakan gas HHO dari sumber listrik PLN. Pada kondisi awal, yaitu saat volume bahan bakar masih rendah (50 mL), pengujian siklus tertutup mencatat efisiensi tinggi sebesar 26.3%. Hal ini terjadi karena rasio suplai gas HHO terhadap total bahan bakar berada pada titik potimal, sehingga kontribusi gas HHO dalam memperbaiki proses pembakaran menjadi sangat signifikan. Dengan jumlah bahan bakar solar yang relatif kecil, efek tambahan dari gas HHO menjadi dominan, menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna dan konversi energi yang lebih efisien.

Namun, pada volume 100 mL, pengujian tahap 3 dengan gas HHO justru mencatat efisiensi lebih tinggi

sebesar 25%, dibandingkan pengujian siklus tertutup yang turun ke 23.5%. Ini terjadi karena pengujian tahap 3 dengan gas HHO tidak dibebani oleh konsumsi daya reaktor elektrolisis, sehingga pada titik tertentu, efisiensinya bisa lebih tinggi meskipun tidak mandiri secara energi.

Pada titik 150 mL, kedua sistem mengalami penurunan efisiensi. Pengujian tahap 3 dengan gas HHO, efisiensi kembali ke 22.3%, sementara pada pengujian siklus tertutup turun ke 22.1%. Penurunan ini menunjukkan bahwa kontribusi relatif gas HHO terhadap total bahan bakar mulai berkurang, dan pembakaran mendekati batas optimal mesin.

Pada volume 200 mL, pengujian siklus tertutup kembali meningkat ke 23.4%, sedangkan pengujian tahap 3 dengan gas HHO justru turun ke titik terendah 20.5%. Ini mengindikasikan bahwa pada beban tinggi, sistem siklus tertutup mampu memanfaatkan sinergi antara solar dan gas HHO secara lebih stabil, sementara pengujian tahap 3 dengan gas HHO mengalami penurunan performa pembakaran.

Secara keseluruhan, pengujian siklus tertutup menunjukkan keunggulan yang lebih menonjol dibandingkan pengujian tahap 3 baik tanpa atau dengan gas HHO dalam berbagai aspek kinerja genset. Dari segi durasi nyala, sistem mampu mempertahankan operasional mesin lebih lama, bahkan ketika sebagian daya digunakan untuk mengaktifkan reaktor elektrolisis, yang menandakan efisiensi pembakaran yang lebih baik berkat kontribusi gas HHO. Konsumsi bahan bakar juga lebih rendah, tercermin dari nilai SFC yang lebih kecil pada berbagai variasi volume bahan bakar, sehingga sistem ini lebih hemat dalam menghasilkan daya. Efisiensi sistem pada pengujian siklus tertutup pun lebih tinggi dibandingkan pengujian tahap 3 baik tanpa atau dengan gas HHO, yang mana menunjukkan bahwa sistem mampu memanfaatkan bahan bakar secara optimal untuk menghasilkan output listrik yang stabil dan konsisten. Keunggulan lainnya adalah kemampuannya beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada sumber listrik eksternal, menjadikannya solusi yang lebih praktis, berkelanjutan, dan layak untuk dikembangkan dalam aplikasi energi berbasis hidrogen.

I. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penambahan gas HHO memberikan pengaruh positif terhadap kinerja sistem genset pada jenis bahan bakar solar. Penambahan gas HHO terbukti dapat memperpanjang waktu lama nyala genset, menurunkan nilai *Specific Fuel Consumption* (SFC), serta meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Gas HHO yang dihasilkan dari proses elektrolisis air, terdiri dari gas hidrogen dan oksigen dengan rasio teoritis 2:1 sesuai dengan persamaan reaksi $2H_2O_{(l)} \rightarrow 2H_{2(g)} + O_{2(g)}$. Komposisi ini ideal karena hidrogen berperan sebagai bahan bakar dengan kecepatan pembakaran tinggi, sementara oksigen membantu

proses oksidasi menjadi lebih sempurna. Sistem siklus tertutup yang dirancang dalam penelitian ini juga terbukti efektif, di mana reaktor elektrolisis memperoleh daya langsung dari output genset tanpa memerlukan sumber daya eksternal tambahan, sehingga sistem menjadi lebih mandiri dan hemat energi.

Dari jenis bahan bakar yang digunakan, yaitu solar menunjukkan performa baik dari segi efisiensi, durasi nyala, maupun konsumsi bahan bakarnya. Hal ini didukung oleh karakteristik mesin diesel yang bekerja lebih efisien, terutama pada beban parsial. Hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan gas HHO cukup menjanjikan sebagai bahan bakar tambahan dalam meningkatkan efisiensi dan performa sistem pembakaran yang baik pada mesin diesel. Dengan karakteristik pembakaran yang stabil dan harga bahan bakar yang relatif lebih terjangkau, solar dengan penambahan gas HHO dapat menjadi alternatif yang layak untuk dikembangkan lebih lanjut, khususnya dalam upaya meningkatkan efisiensi energi pada sistem pembangkit listrik berskala kecil.

REFERENSI

- [1] R. Chang, Kimia dasar: Konsep-konsep inti, 3rd ed. Jakarta: Erlangga, 2004.
- [2] BP, *Statistical Review of World Energy* 2023. BP Global, 2023. [Online]. Available: <https://www.bp.com> [Accessed: Aug. 19, 2025].
- [3] International Energy Agency (IEA), *Global Energy Review 2023: Fossil Fuel Consumption*. IEA Publications, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org>
- [4] U.S. Department of Energy, "Hydrogen Storage," Energy.gov, 2023. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- [5] S. Satyapal, J. Petrovic, C. Read, G. Thomas, and G. Ordaz, "The U.S. Department of Energy's National Hydrogen Storage Project: Progress towards meeting hydrogen-powered vehicle requirements," *Catalysis Today*, vol. 120, no. 3–4, pp. 246–256, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.cattod.2006.09.022.
- [6] International Renewable Energy Agency (IRENA), *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5 °C Scenario*, vol. 1. Abu Dhabi: IRENA, 2023.
- [7] A. H. Kazim, M. B. Khan, R. Nazir, A. Shabbir, M. S. Abbasi, H. Abdul Rab, and N. Shahid Qureishi, "Effects of oxyhydrogen gas induction on the performance of a small-capacity diesel engine," *Science Progress*, vol. 103, no. 2, 2020. doi: 10.1177/0036850420921685.
- [8] U. Kultsum, A. I. Soumi, A. Baharudin, and P. D. Manunggal, "Performance assessment of spark-ignition engine combined with an HHO generator," *Engineering Proceedings*, vol. 63, no. 1, 2024. doi: 10.3390/engproc2024063003.