

Aplikasi Gas Hidrogen Hasil Elektrolisis Pada Motor Bakar (Genset)

1st Ananda Putri Indira Basundari
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia
indiranda27@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 pada sektor energi menghadapi tantangan serius akibat keterbatasan cadangan dan dampak lingkungan, sehingga pemanfaatan hidrogen sebagai bahan bakar tambahan menjadi alternatif yang menjanjikan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh penambahan gas HHO hasil elektrolisis air terhadap kinerja genset berbahan bakar bensin dan solar. Pengujian dilakukan dalam empat tahap, yaitu produksi gas HHO, pengujian tanpa beban, pengujian dengan beban lampu 1000 W, serta penerapan sistem siklus tertutup di mana reaktor elektrolisis memperoleh suplai daya langsung dari genset. Parameter yang dianalisis meliputi durasi operasi, specific fuel consumption (SFC), dan efisiensi sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan gas HHO mampu memperpanjang waktu operasi genset, menurunkan nilai SFC, dan meningkatkan efisiensi. Sistem siklus tertutup terbukti efektif karena meskipun sebagian daya digunakan untuk reaktor, pembakaran yang lebih sempurna tetap menghasilkan energi bersih lebih besar dibandingkan tanpa HHO. Di antara tiga jenis bahan bakar, solar memberikan performa terbaik, sedangkan pada mesin bensin, pertalite menunjukkan hasil lebih unggul dibandingkan pertamax sesuai rasio kompresi mesin yang digunakan. Temuan ini menegaskan potensi gas HHO sebagai bahan bakar tambahan yang efisien, mandiri, dan berkelanjutan untuk pembangkit listrik skala kecil.

Kata kunci— Bensin, Efisiensi Sistem Genset, Gas HHO, Genset, Siklus Tertutup, Solar

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. Berdasarkan jenis bahan bakarnya, genset dapat dibedakan menjadi genset bensin dan genset solar (diesel).

1. Genset Solar

Genset solar menggunakan mesin diesel yang bekerja berdasarkan prinsip *compression ignition*, yaitu penyalan 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.

2. Genset Bensin

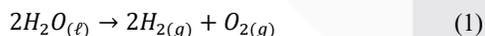
Genset bensin menggunakan mesin berbahan bakar bensin (*gasoline engine*). Mesin bensin biasanya menggunakan sistem pembakaran *spark ignition* (penyalan percikan api dari busi) dan memiliki karakteristik putaran mesin yang lebih halus serta suara yang realtif lebih senyap dibandingkan mesin diesel. 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 (H₂O) menjadi gas hidrogen (H₂) dan oksigen (O₂) 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.

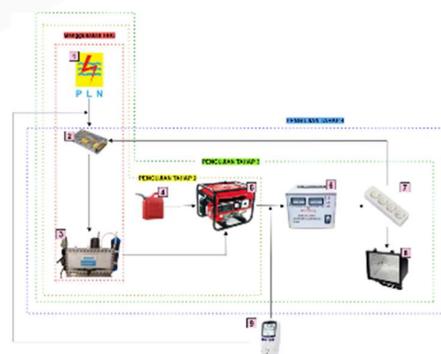
F. Efisiensi Sistem Genset dengan menggunakan gas HHO

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

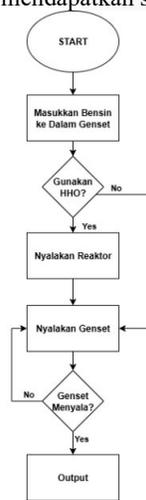
Tujuan pengujian produksi hidrogen ini untuk mengetahui komposisi gas hasil dari proses elektrolisis air, khususnya kandungan gas hidrogen (H_2) yang dihasilkan oleh reaktor elektrolisis untuk memastikan bahwa sistem dapat memproduksi hidrogen dengan kadar yang sesuai.

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

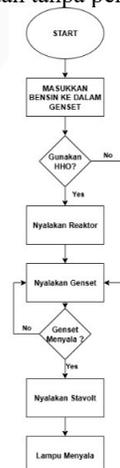
Pada tahap 2, dilakukan dua jenis pengujian, yaitu pengujian tanpa penambahan gas HHO dan pengujian dengan penambahan gas HHO. Rangkaian pengujian tanpa beban ini ditunjukkan pada Gambar 2.

Pada pengujian tahap 2 tanpa gas HHO, persiapan bahan bakar dilakukan dengan menyiapkan bahan bakar sesuai jenis yang diuji, yaitu Pertalite, Pertamina, atau 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 solar 5 kVa dan genset bensin 2.2 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

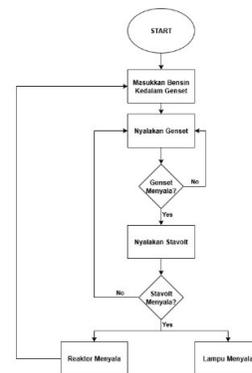
Pada tahap 3, dilakukan pengujian kinerja genset dengan beban, baik tanpa penambahan gas HHO maupun dengan penambahan gas HHO. Rangkaian pengujian tanpa beban ini ditunjukkan pada Gambar 3.

Pada pengujian tahap 3 tanpa gas HHO, sama seperti tahap 2, persiapan bahan bakar dilakukan dengan menyiapkan bahan bakar sesuai jenis yang diuji, yaitu Pertalite, Pertamax, atau 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 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)

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. Specific 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).

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

Keterangan:

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

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

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

P_{PLN} = Daya reaktor (95 W)

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).

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

Keterangan:

$\eta_{Sistem\ Genset}$ = 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

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 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 pada persamaan (1) dari elektrolisis air.

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. Perbandingan Jenis BBM

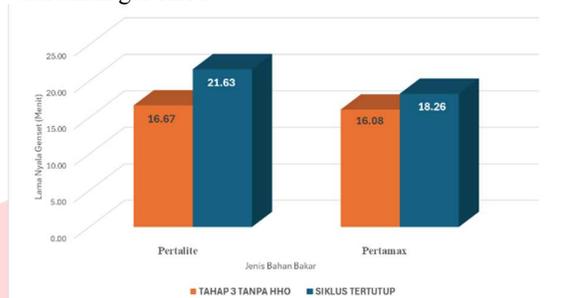
Analisis perbandingan ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh kombinasi jenis bahan bakar dan penambahan gas HHO terhadap kinerja sistem genset pada kondisi siklus tertutup. Parameter yang dianalisis meliputi lama waktu nyala, specific fuel consumption (SFC), dan efisiensi sistem. Seluruh pengujian menggunakan volume bahan bakar yang sama, yaitu 200 mL, dengan dua skenario utama: siklus tertutup (reaktor HHO memperoleh daya dari output genset) dibandingkan dengan kondisi tanpa HHO, serta kondisi dengan HHO yang dipasok dari sumber listrik PLN.

Pada pembahasan ini, fokus perbandingan diarahkan pada pertalite dan pertamax karena perbedaan kapasitas mesin antara pengujian bensin dan solar membuat hasilnya kurang relevan untuk dibandingkan secara langsung. Mesin bensin yang digunakan memiliki kapasitas lebih kecil sehingga harus bekerja lebih keras dibandingkan mesin diesel 5 kVA. Meskipun demikian, hasil pengujian pada bahan bakar solar menunjukkan bahwa sistem siklus tertutup mampu memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan tahap 3 tanpa HHO maupun tahap 3 dengan HHO dari PLN pada sebagian besar kondisi. Sistem ini menghasilkan waktu nyala yang lebih lama, nilai SFC yang lebih rendah, dan

efisiensi yang lebih tinggi, terutama pada beban besar, sehingga berpotensi digunakan untuk operasi berkelanjutan tanpa ketergantungan pada sumber listrik eksternal.

1. Perbandingan Siklus Tertutup dengan Tahap 3 Tanpa Gas HHO

Pengujian ini membandingkan kinerja genset pada sistem siklus tertutup dengan kondisi tahap 3 tanpa tambahan gas HHO.



GAMBAR 5
Perbandingan Jenis BBM terhadap Waktu Lama Nyala Pada Tahap 3 Tanpa HHO dan Siklus Tertutup

Grafik Gambar 5 menunjukkan adanya perbedaan yang cukup jelas, penerapan siklus tertutup meningkatkan waktu lama nyala genset untuk kedua jenis bensin. Pada bahan bakar pertalite, waktu lama nyala meningkat dari 16.67 menit menjadi 21.63 menit, atau bertambah hampir lima menit. Pertamax juga mengalami kenaikan dari 16.08 menit menjadi 18.26 menit, setara peningkatan 13.56%.

Peningkatan ini menunjukkan manfaat pembakaran yang lebih sempurna dari penambahan gas HHO mampu mengimbangi bahkan melampaui tambahan beban yang dibutuhkan untuk penggunaan reaktor yang mengambil daya dari genset itu sendiri. Jadi, walaupun sebagian energi dipakai untuk memproduksi gas HHO, proses pembakaran yang lebih efisien menghasilkan energi bersih lebih besar sehingga genset bisa beroperasi lebih lama dengan volume bahan bakar yang sama.

Kenaikan yang lebih besar ada pertalite dibandingkan dengan pertamax berkaitan dengan sifat bahan bakarnya. Nilai oktan pertalite yang lebih rendah membuatnya lebih responsif pada bantuan gas HHO, sehingga campuran udara-bahan bakar menjadi lebih merata dan pembakaran lanjutan berlangsung lebih efektif, memperpanjang waktu lama nyala.



GAMBAR 6
Perbandingan Jenis BBM terhadap SFC Pada Tahap 3 Tanpa HHO dan Siklus Tertutup

Perubahan juga terlihat pada nilai specific fuel consumption (SFC). Terlihat pada Gambar 6 pada pertalite nilai SFC turun dari 0.9841 kg/kWh menjadi 0.6527 kg/kWh, atau turun sekitar 33.7%. Sedangkan pada pertamax, nilainya berkurang dari 1.0201 kg/kWh menjadi 0.7733 kg/kWh, atau berkurang sekitar 24.2%.

Penurunan ini berarti volume bahan bakar yang sama mampu menghasilkan energi listrik lebih besar. Efek ini dikarenakan gas HHO mempercepat reaksi pembakaran dan memaksimalkan pemanfaatan energi kimia bahan bakar, sehingga energi yang hilang dalam bentuk panas dan gas buang menjadi lebih kecil. Presentase penurunan yang lebih besar pada pertalite selaras dengan hasil durasi lama nyala. Nilai oktan yang lebih rendah membuat pembakarannya lebih cepat dan merata saat dibantu gas HHO, sehingga daya yang dihasilkan dari bahan bakar yang sama menjadi lebih tinggi.



GAMBAR 7

Perbandingan Jenis BBM terhadap Efisiensi Sistem Genset Pada Tahap 3 Tanpa HHO dan Siklus Tertutup

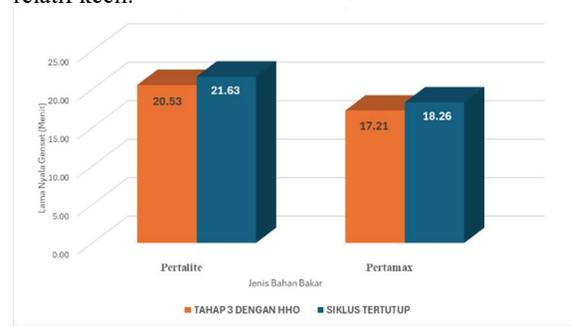
Untuk efisiensi sistem pada Gambar 7 meningkat secara konsisten. Bensin pertalite, efisiensi naik dari 8.42% menjadi 12.69%, naik 4.27 poin. Pada pertamax, peningkatan terjadi dari 8.12% menjadi 10.27%, bertambah 2.60 poin. Kenaikan ini sejalan dengan penurunan SFC dan bertambahnya waktu nyala, yang menunjukkan bahwa konversi energi kimia menjadi energi listrik berlangsung lebih efektif. Meskipun ada tambahan beban dari reaktor, pembakaran yang lebih sempurna tetap mampu meningkatkan energi bersih yang dihasilkan. Peningkatan relatif yang lebih besar pada pertalite menguatkan dugaan bahwa bahan bakar beroktan lebih rendah mendapat manfaat lebih besar dari penggunaan gas HHO, terutama pada mesin bensin kecil.

Kenaikan ini sejalan dengan penurunan SFC dan bertambahnya waktu nyala, yang menunjukkan bahwa konversi energi kimia menjadi energi listrik berlangsung lebih efektif. Meskipun ada tambahan beban dari reaktor, pembakaran yang lebih sempurna tetap mampu meningkatkan energi bersih yang dihasilkan. Peningkatan relatif yang lebih besar pada pertalite menguatkan dugaan bahwa bahan bakar beroktan lebih rendah mendapat manfaat lebih besar dari penggunaan gas HHO, terutama pada mesin bensin kecil.

2. Perbandingan Siklus Tertutup dengan Tahap 3 Dengan Gas HHO

Perbandingan berikutnya dilakukan dengan Tahap 3 yang menggunakan suplai HHO dari PLN. Karena kedua

kondisi sama-sama memakai HHO, selisih yang muncul relatif kecil.

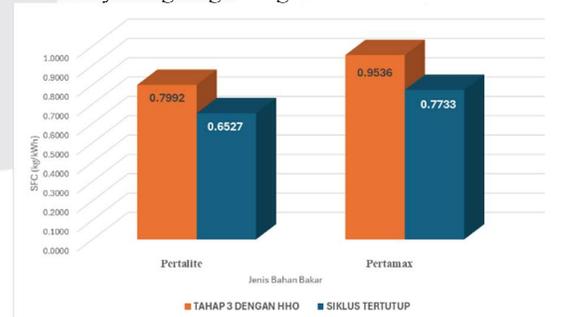


GAMBAR 8

Perbandingan Jenis BBM terhadap Waktu Lama Nyala Pada Tahap 3 Dengan HHO dan Siklus Tertutup

Grafik pada Gambar 8 menunjukkan siklus tertutup tetap menghasilkan waktu nyala sedikit lebih lama dibandingkan tahap 3 dengan gas HHO. Untuk pertalite, waktu nyala naik dari 20.53 menit menjadi 21.63 menit, sedangkan pertamax dari 17.21 menit menjadi 18.26 menit. Perbedaan kecil ini tergolong wajar karena kedua kondisi sama-sama menggunakan gas HHO. Pada Tahap 3 dengan gas HHO, proses pembakaran sudah terbantu cukup banyak, sehingga tambahan keuntungan dari integrasi HHO ke siklus tertutup hanya memberikan peningkatan kecil. Namun, fakta bahwa waktu nyala tetap bertambah menunjukkan bahwa sistem siklus tertutup ini dapat mempertahankan, bahkan meningkatkan efisiensi bahan bakar meskipun reaktor diberi daya langsung oleh genset.

Perbedaan kecil ini tergolong wajar karena kedua kondisi sama-sama menggunakan gas HHO. Pada Tahap 3 dengan gas HHO, proses pembakaran sudah terbantu cukup banyak, sehingga tambahan keuntungan dari integrasi HHO ke siklus tertutup hanya memberikan peningkatan kecil. Namun, fakta bahwa waktu nyala tetap bertambah menunjukkan bahwa sistem siklus tertutup ini dapat mempertahankan, bahkan meningkatkan efisiensi bahan bakar meskipun reaktor diberi daya langsung oleh genset.



GAMBAR 9

Perbandingan Jenis BBM terhadap SFC Pada Tahap 3 Dengan HHO dan Siklus Tertutup

Nilai SFC pada siklus tertutup juga lebih rendah dibandingkan Tahap 3 dengan HHO dari PLN seperti yang terlihat pada Gambar 9. Pada pertalite, SFC turun dari 0.7992 kg/kWh menjadi 0.6527 kg/kWh, berkurang sekitar 18.3%. Pada pertamax, SFC turun dari 0.9536 kg/kWh menjadi 0.7733 kg/kWh, berkurang sekitar 18.8%.

kg/kWh menjadi 0.7733 kg/kWh, berkurang sekitar 18.9%. Penurunan ini mengindikasikan bahwa meskipun reaktor mengambil daya dari genset, produksi gas HHO yang langsung mengikuti kebutuhan pembakaran mesin membuat penggunaan bahan bakar lebih efisien dibandingkan jika HHO disuplai dari sumber eksternal. Gas HHO yang konsisten dengan ritme kerja mesin membantu mengoptimalkan pembakaran, sehingga penggunaan bahan bakar menjadi lebih hemat.

Penurunan ini mengindikasikan bahwa meskipun reaktor mengambil daya dari genset, produksi gas HHO yang langsung mengikuti kebutuhan pembakaran mesin membuat penggunaan bahan bakar lebih efisien dibandingkan jika HHO disuplai dari sumber eksternal. Gas HHO yang konsisten dengan ritme kerja mesin membantu mengoptimalkan pembakaran, sehingga penggunaan bahan bakar menjadi lebih hemat.



GAMBAR 10

Perbandingan Jenis BBM terhadap Efisiensi Sistem Genset Pada Tahap 3 Dengan HHO dan Siklus Tertutup

Efisiensi sistem pada siklus tertutup pun lebih tinggi yang terlihat pada Gambar 10. Pada peralite, efisiensi meningkat dari 10.37 menjadi 12.69%, bertambah 2.32 poin. Pada pertamax, naik dari 8.56% menjadi 10.72%, bertambah 2.16 poin. Kenaikan ini konsisten dengan penurunan SFC dan bertambahnya waktu lama nyala., menunjukkan bahwa meskipun beban reaktor ditanggung oleh genset, keuntungannya tetap lebih besar daripada kerugiannya.

Secara keseluruhan, sistem siklus tertutup memberikan peningkatan kinerja pada semua parameter dibandingkan tahap 3, baik tanpa HHO maupun dengan HHO dari PLN. Peningkatan terbesar terlihat saat dibandingkan dengan kondisi tanpa gas HHO, di mana durasi nyala, efisiensi, dan SFC membaik secara signifikan terutama pada Peralite.

Dibandingkan dengan gas HHO dari PLN, peningkatannya memang lebih kecil, tetapi tetap positif. Salah satu penyebabnya adalah pasokan HHO pada siklus tertutup yang dihasilkan langsung oleh genset, sehingga lebih selaras dengan kebutuhan mesin. Sinkronisasi ini membuat pembakaran berlangsung lebih stabil dan lengkap, serta mengurangi potensi ketidaksesuaian suplai yang mungkin terjadi saat HHO berasal dari sumber eksternal.

Peralite menunjukkan peningkatan lebih besar di hampir semua parameter, dapat dijelaskan oleh spesifikasi mesin bensin yang digunakan yaitu mesin dengan rasio kompresi 8.5:1 yang lebih cocok untuk bahan bakar beroktan menengah seperti Peralite (RON

90). Sementara itu, Pertamina dengan nilai oktan lebih tinggi memerlukan rasio kompresi lebih besar untuk pembakaran optimal, sehingga efek tambahan dari HHO menjadi lebih kecil.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa penambahan gas HHO yang diperoleh melalui proses elektrolisis air mampu meningkatkan performa genset, baik pada mesin diesel maupun bensin. Secara teoritis, elektrolisis menghasilkan gas hidrogen dan oksigen dengan perbandingan molar 2:1, dan hasil pengujian juga menunjukkan kecenderungan komposisi yang serupa. Kehadiran hidrogen yang mudah terbakar mempercepat proses penyalaan, sementara oksigen mendukung reaksi oksidasi yang lebih sempurna. Kombinasi tersebut membuat pembakaran menjadi lebih stabil dan efisien, yang terlihat dari peningkatan waktu nyala, penurunan Specific Fuel Consumption (SFC), serta kenaikan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Pada sistem siklus tertutup, reaktor elektrolisis memperoleh suplai daya langsung dari genset. Meskipun sebagian energi listrik dialokasikan untuk menggerakkan reaktor, peningkatan kualitas pembakaran tetap menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi lebih mandiri tanpa ketergantungan pada sumber listrik eksternal. Dengan demikian, pemanfaatan HHO tidak hanya memberi keuntungan dari sisi efisiensi energi, tetapi juga membuka peluang penerapan pada sistem pembangkit skala kecil yang hemat energi dan berkelanjutan.

Hasil perbandingan bahan bakar menunjukkan bahwa genset diesel berbahan bakar solar memberikan performa paling unggul karena efisiensi termalnya yang lebih tinggi. Sementara itu, pada mesin bensin, peralite memberikan kinerja lebih optimal dibandingkan pertamax karena rasio kompresi mesin (8.5:1) lebih sesuai dengan bahan bakar beroktan sedang. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa pemanfaatan gas HHO hasil elektrolisis berpotensi besar sebagai bahan bakar tambahan untuk meningkatkan efisiensi, memperpanjang durasi operasi, serta mendukung pengembangan sistem energi yang lebih mandiri dan 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] 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.

- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA), *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5 °C Scenario*, vol. 1. Abu Dhabi: IRENA, 2023.
- [6] P. Atkins and J. de Paula, *Physical Chemistry*, 11th ed. Oxford: Oxford University Press, 2018.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] A. Akbar, I. Wardana, and L. Yuliati, "Pengaruh penambahan HHO terhadap kinerja dan ionisasi pembakaran motor bensin," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 5, no. 1, 2014.
- [11] F. A. Cosina, "Pengaruh penggunaan hidrogen hasil elektrolisis terhadap performa mesin pada sepeda motor," n.d.
- [12] A. Haris and D. J. Winarno, "Pengaruh variasi beban dan bahan bakar terhadap performansi genset Honda Wolf 2,5 kW," n.d.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] R. Chang, *Kimia dasar: Konsep-konsep inti*, 3rd ed. Jakarta: Erlangga, 2004.