

## **Overhaul dan Uji Performansi Generator Firman FPG1510 RV1-C**

**Hanni Maksum Ardi<sup>1</sup>, Mokhamad Munir Fahmi<sup>1</sup>, Nor Fajri<sup>1</sup>, Yudistira Anugrahadi Wiraputra<sup>1</sup>,  
Diby Setiawan<sup>1\*</sup>, Toni Okviyanto<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung; Jl. Ciwaruga, Ciwaruga, Kec. Parongpong,  
Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat, (022) 2013789

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Sriwijaya, Jl. Sriwijaya Negara, Bukit Besar, Palembang,  
Sumatera Selatan, (0711) 353414

e-mail: <sup>1</sup>[hanni.maksum@polban.ac.id](mailto:hanni.maksum@polban.ac.id), <sup>1</sup>[fahmimunir@polban.ac.id](mailto:fahmimunir@polban.ac.id), <sup>1</sup>[nor.fajri@polban.ac.id](mailto:nor.fajri@polban.ac.id),  
[yudistira.wiraputra@polban.ac.id](mailto:yudistira.wiraputra@polban.ac.id), <sup>\*</sup>[diby.setiawan@polban.ac.id](mailto:diby.setiawan@polban.ac.id), <sup>2</sup>[toni.okviyanto@polsri.ac.id](mailto:toni.okviyanto@polsri.ac.id).

### **Abstrak**

*Ketersediaan energi listrik yang stabil merupakan kebutuhan penting bagi usaha konveksi dalam mendukung kelancaran proses produksi, khususnya di Kecamatan Cileungsi, Kabupaten Bogor, yang masih sering mengalami pemadaman listrik. Kondisi tersebut menyebabkan terganggunya aktivitas produksi sehingga diperlukan sumber energi listrik cadangan yang andal. Generator set (genset) Firman FPG1510 RV1-C digunakan sebagai alternatif penyedia energi listrik, namun unit mengalami penurunan performansi dan tidak dapat beroperasi secara optimal akibat degradasi komponen mesin. Penelitian ini bertujuan melakukan perawatan overhaul dan mengevaluasi performansi genset setelah dilakukan perawatan menyeluruh. Metode penelitian meliputi evaluasi awal, identifikasi kerusakan, penggantian dan pembersihan komponen, proses overhaul, serta pengujian performansi berupa pengukuran konsumsi bahan bakar, daya listrik, dan emisi gas buang dengan pembebanan listrik sebesar 570 Watt. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses overhaul berhasil meningkatkan performansi generator dan mengembalikan kestabilan operasional mesin. Peningkatan performansi ditunjukkan dengan kenaikan daya poros generator sekitar 21% dibanding spesifikasi standar. Selain itu, efisiensi operasional generator mengalami peningkatan pada rentang putaran kerja optimal, sedangkan hasil pengujian emisi menunjukkan kadar CO dan HC masih berada di bawah standar emisi mesin bensin Kota Bandung. Hasil tersebut menunjukkan bahwa overhaul efektif dalam memperbaiki sistem pembakaran, meningkatkan performansi generator, serta menjaga kualitas emisi gas buang tetap memenuhi standar lingkungan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi penerapan perawatan genset pada usaha kecil dan menengah di daerah dengan gangguan pasokan energi listrik.*

**Kata kunci**—perawatan, pengujian performa, generator, uji emisi.

### **Abstract**

*Stable electrical energy availability is essential for supporting garment production activities, particularly in Cileungsi District, Bogor Regency, where frequent power outages often disrupt production processes. These conditions increase the need for a reliable backup power source. The Firman FPG1510 RV1-C generator set (genset) is used as an alternative electrical power supply; however, the unit experienced performance degradation and could no longer operate properly due to deterioration of engine components. This study aimed to perform an overhaul maintenance procedure and evaluate the generator's performance after the maintenance process. The research method included initial evaluation, fault identification, component replacement and cleaning, engine overhaul, and performance testing consisting of fuel*

*consumption, electrical power output, and exhaust emission measurements under a 570-Watt electrical load. The results showed that the overhaul process successfully improved generator performance and restored stable engine operation. Performance improvement was indicated by an approximately 21% increase in shaft power compared to the standard specification. In addition, the generator demonstrated better operational efficiency within the optimal engine speed range. Exhaust emission testing also showed that CO and HC levels remained below the Bandung City gasoline-engine emission standards. These findings indicate that overhaul maintenance is effective in restoring combustion performance, improving generator efficiency, and maintaining exhaust emissions within acceptable environmental limits. This study is expected to serve as a reference for implementing generator maintenance in small and medium-scale industries operating in areas with unstable electrical power supply*

**Keywords**— *maintenance, performance testing, generator, emission testing.*

## 1. PENDAHULUAN

Unit Generator merupakan mesin konversi energi dengan luaran energi listrik yang dimanfaatkan untuk wilayah yang sering mengalami pemadaman listrik [1]. Ketersediaan energi listrik yang stabil merupakan kebutuhan penting dalam mendukung keberlangsungan usaha industri skala kecil dan menengah, khususnya usaha konveksi yang sangat bergantung pada peralatan listrik selama proses produksi. Di Kecamatan Cileungsi, Kabupaten Bogor, pemadaman listrik masih sering terjadi sehingga menghambat produktivitas dan kestabilan proses produksi masyarakat. Kondisi tersebut menyebabkan kebutuhan terhadap sumber energi listrik cadangan semakin meningkat, salah satunya melalui penggunaan *generator set* (genset) [2]. Generator Firman FPG1510 RV1-C merupakan salah satu unit genset yang digunakan sebagai sumber listrik alternatif pada usaha konveksi. Namun, unit generator yang digunakan mengalami degradasi performansi sehingga tidak dapat beroperasi secara optimal. Penurunan performansi mesin umumnya disebabkan oleh keausan komponen, penumpukan karbon, kerusakan sistem pembakaran, serta kurangnya perawatan berkala [3]. Perawatan yang dimaksud meliputi identifikasi awal (*visual inspection, troubleshooting*), pembongkaran mesin (*disassembly*), pemasangan (*assembly*) dan pengujian performansi (*performance test*). Pengujian performansi yang dilakukan adalah pengukuran konsumsi bahan bakar, daya yang dihasilkan dan uji emisi [4], [5], [6], [7].

Perawatan mesin merupakan aspek penting dalam menjaga efisiensi operasional, keandalan sistem, dan umur pakai peralatan industri [8]. Pada sektor manufaktur, biaya perawatan dapat mencapai 20–50% dari total biaya operasional sehingga pengelolaan perawatan yang baik menjadi faktor penting dalam meningkatkan daya saing perusahaan [9]. Oleh karena itu, diperlukan sistem evaluasi performansi perawatan yang terstruktur, seperti *Maintenance Scorecard* (MS), untuk menilai efektivitas perawatan dari aspek biaya, kualitas, waktu, dan pembelajaran [10]. Nurcahyo et al. melaporkan bahwa implementasi MS pada industri kimia masih berada pada kategori “need improvement”, sehingga diperlukan peningkatan strategi perawatan yang lebih efektif [11].

Degradasi performansi mesin yang disebabkan oleh keausan komponen, penumpukan karbon, dan kerusakan sistem pembakaran, dapat menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar serta penurunan efisiensi termal [12]. Lazzaretto dan Toffolo menjelaskan bahwa performansi termodinamika mesin sangat dipengaruhi oleh kondisi aktual komponen mesin dan kualitas proses pembakaran [13]. Dalam kasus mesin gas turbin, performansi dan emisi dapat berubah, karena sedikit variasi pada kondisi *ambient* maupun degradasi ringan di bagian kompresor atau ruang bakar [10].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kualitas pembakaran memiliki hubungan erat dengan efisiensi energi dan emisi gas buang. Qi et al. melaporkan bahwa pengaturan sistem

pembakaran dan penggunaan campuran bahan bakar tertentu mampu menurunkan emisi tanpa mengurangi performansi mesin [14]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa peningkatan performansi mesin setelah perawatan dapat dianalisis melalui parameter konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC), efisiensi daya listrik, dan efisiensi termal [15], [16], [17] Apabila dibandingkan dengan data performansi mesin pada kendaraan *hybrid* berbasis bensin dengan teknologi pembakaran *partially premixed combustion (PPC)* [18], efisiensi tinggi dapat dicapai tanpa mengandalkan bahan bakar solar, serta dengan emisi *NOx* dan *HC* yang lebih rendah [19]. Nyongesa et al. menjelaskan bahwa penurunan efisiensi mesin diesel dipengaruhi oleh kondisi *turbocharger* dan deposit karbon yang menyebabkan kualitas pembakaran menurun sehingga emisi CO, CO<sub>2</sub>, dan NO<sub>x</sub> meningkat [20]. Selain itu, Shakya et al. menyatakan bahwa generator diesel yang beroperasi pada kondisi tidak optimal dapat menjadi salah satu penyumbang utama pencemaran udara akibat tingginya emisi partikulat dan gas buang [21]. Selain meningkatkan efisiensi energi, perbaikan sistem pembakaran juga berkontribusi terhadap penurunan emisi gas buang dan pencemaran lingkungan [22], [23].

Perawatan *overhaul* dilakukan melalui proses pembongkaran, pemeriksaan, pembersihan, perbaikan, dan penggantian komponen yang mengalami kerusakan atau keausan agar kondisi mesin kembali mendekati spesifikasi standar. Kim et al. menjelaskan bahwa kualitas pembakaran yang buruk akibat gangguan sistem bahan bakar dan deposit karbon dapat meningkatkan emisi CO dan HC serta menurunkan efisiensi mesin [24]. Sementara itu, Park et al. menunjukkan bahwa parameter temperatur, tekanan, putaran mesin, dan emisi gas buang memiliki hubungan erat terhadap performansi generator sehingga dapat digunakan sebagai indikator evaluasi kondisi mesin setelah dilakukan perawatan [25]. Penelitian mengenai pengaruh *overhaul* terhadap peningkatan performansi genset bensin skala kecil masih terbatas, khususnya pada unit generator Firman FPG1510 RV1-C yang digunakan pada usaha konveksi masyarakat.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk melakukan perawatan *overhaul* dan mengevaluasi performansi generator Firman FPG1510 RV1-C melalui pengujian konsumsi bahan bakar, daya listrik, dan emisi gas buang. Kontribusi utama penelitian ini adalah menunjukkan bahwa proses *overhaul* mampu meningkatkan performansi generator serta mengembalikan kelayakan operasional mesin sebagai sumber listrik cadangan pada daerah dengan gangguan pasokan listrik. Gambar 1 merupakan konstruksi fisik Unit Generator Firman FPG1510 RV1-C yang perlu dilakukan perawatan



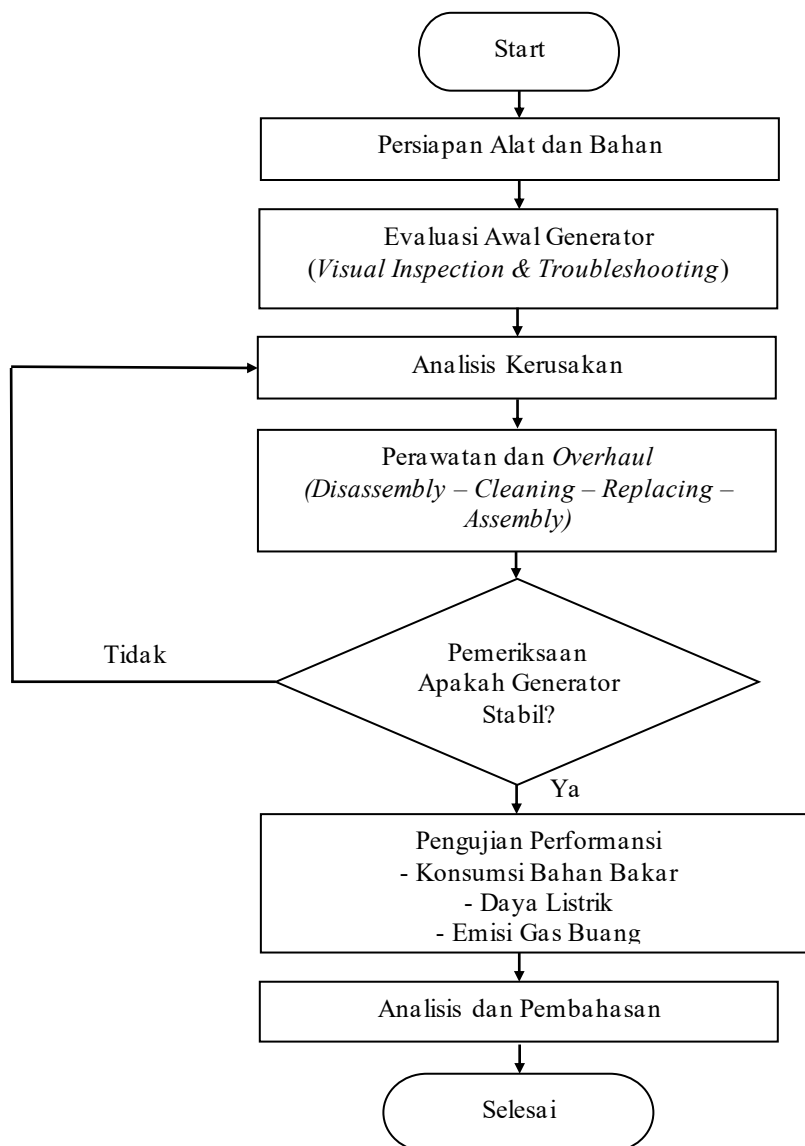
Gambar 1 Unit Generator Firman FPG1510 RV1-C

Perawatan generator dilakukan melalui tahapan identifikasi kerusakan, proses *overhaul*, dan pengujian performansi untuk memastikan unit dapat kembali beroperasi secara optimal. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada identifikasi penyebab gangguan operasional generator, pelaksanaan proses perawatan *overhaul*, serta evaluasi performansi generator setelah perawatan dilakukan. Tujuan penelitian ini adalah melakukan *overhaul* pada generator Firman FPG1510 RV1-C dan menganalisis performansinya melalui pengujian konsumsi bahan bakar, daya listrik, dan emisi gas buang. Penelitian ini diharapkan dapat

mengembalikan kondisi operasional generator mendekati spesifikasi standar sekaligus memenuhi standar efisiensi dan emisi yang berlaku.

## 2. METODE PENELITIAN

Metode pendekatan yang digunakan pada kegiatan perawatan dan pengujian performansi unit Generator sebagai berikut:



**Gambar 1.** Flowchart Penelitian

### 2.1 Tahapan Persiapan

Tahap persiapan berupa mempersiapkan alat, peralatan dan bahan untuk perawatan dan pengujian performansi unit generator. Tahap ini dilakukan pemeriksaan ketersediaan dan kelayakan alat ukur seperti *tachometer digital*, *multitester*, *clamp meter*, *gas analyzer*,

---

*stopwatch*, serta gelas ukur. Selain itu, dilakukan pemeriksaan suku cadang seperti busi, oli dengan spesifikasi *SAE 15W-40*, serta komponen suku cadang lain yang diperlukan.

## 2.2 Evaluasi Awal

Tahap Evaluasi Awal dengan mengidentifikasi masalah (*troubleshooting*). Identifikasi meliputi pemeriksaan visual (*visual inspection*) dan uji coba operasi. Pemeriksaan visual mencakup pemeriksaan kondisi fisik rangka unit generator, komponen baut dan rangka, kondisi dudukan mesin, kebersihan karburator, kondisi ulir tutup tangki bahan bakar, serta kabel kelistrikan. Percobaan operasional dilaksanakan dalam rangka pengamatan kondisi eksisting mesin, mendeteksi suara tidak normal, ketidakstabilan putaran, serta respon asap buangan berlebih yang dapat mengindikasikan pembakaran tidak sempurna.

## 2.3 Analisa Evaluasi Awal

Hasil evaluasi awal dianalisis untuk menentukan penyebab gangguan operasional generator. Analisis dilakukan berdasarkan hasil pemeriksaan visual dan uji operasional awal terhadap sistem kelistrikan, sistem bahan bakar, dan komponen mekanis mesin. Beberapa indikasi kerusakan yang ditemukan meliputi gangguan pada sistem starter, karburator yang kotor, korosi pada tutup tangki bahan bakar, serta indikasi penurunan kompresi mesin. Hasil analisis digunakan sebagai dasar penentuan tindakan perawatan, penggantian komponen, maupun pelaksanaan *overhaul*.

## 2.4 Penggantian Suku Cadang dan Pembuatan Suku Cadang

Komponen yang mengalami kerusakan ringan dilakukan perawatan berupa pembersihan, pelumasan, dan penyetelan ulang tanpa mempengaruhi keandalan generator. Sementara itu, komponen yang telah aus atau rusak dilakukan penggantian untuk menjaga performansi operasional mesin. Apabila suku cadang tidak tersedia di pasaran, dilakukan pembuatan komponen secara lokal berdasarkan dimensi dan spesifikasi komponen asli agar tetap sesuai dengan kebutuhan operasional generator.

## 2.5 Pelaksanaan *Overhaul*

Berdasarkan hasil pemeriksaan visual (*visual inspection*) pada generator Firman FPG1510 RV1-C, ditemukan beberapa kondisi yang mempengaruhi performansi operasional generator. Permukaan mesin dan beberapa komponen generator mengalami penumpukan debu yang berpotensi menurunkan efisiensi kerja mesin dan meningkatkan konsumsi bahan bakar. Selain itu, korosi ditemukan pada bagian rangka dan baut pengikat generator sehingga beberapa komponen memerlukan penggantian. Korosi juga ditemukan pada bagian ulir *fuel cap* yang dapat mempengaruhi sistem penyimpanan bahan bakar. Selama proses perawatan, ketersediaan suku cadang standar generator juga menjadi kendala karena beberapa komponen cukup sulit ditemukan di pasaran.

Sebelum proses *overhaul* dilakukan, perawatan awal dilaksanakan untuk mengembalikan kondisi operasional generator. Perawatan tersebut meliputi perbaikan sistem starter, penggantian *spark igniter* (busi), pembersihan karburator, dan penggantian oli *SAE 15W-40*. Penggantian busi dan pembersihan karburator dilakukan untuk memperbaiki kualitas pembakaran di ruang bakar, sedangkan penggantian oli bertujuan mengurangi beban kerja mesin selama operasi. Rincian perawatan awal sebelum *overhaul* ditunjukkan pada Tabel 1.

---

Tabel 1 Perawatan Sebelum *Overhaul*

| No | Komponen             | Keterangan  | Dokumentasi  |
|----|----------------------|---|--|
| 1  | Starter              | Komponen penyangga beban dan pegas pada starter mengalami kemacetan sehingga butuh dilubrikasi dan diganti.   |   |
| 2  | <i>Spark igniter</i> | Spesifikasi panjang elektroda pada <i>spark igniter</i> (busi eksisting) terlihat pendek, sehingga dilakukan penggantian <i>spark igniter</i> dengan elektroda lebih panjang untuk memastikan terjadinya proses pembakaran. |   |
| 3  | Karburator           | Pembersihan secara menyeluruh dengan bensin dilakukan untuk memastikan adanya pembakaran  |   |
| 4  | Penggantian Oli      | Oli berwarna hitam dengan volume terukur melebihi indikator <i>high</i> pada <i>oil cap</i> . Penggantian oli dilakukan dengan spesifikasi <i>SAE 15W-40</i> dengan produk <i>Shell</i> .                                   |  |

Perawatan komponen tambahan dilakukan setelah generator dapat beroperasi sebelum proses *overhaul* dilaksanakan. Perawatan tersebut meliputi peremajaan rangka generator, pembersihan dudukan mesin, penggantian baut dan mur yang mengalami korosi, serta penggantian *air inlet line*. Perawatan rangka dilakukan melalui pembersihan korosi, pengamplasan permukaan, dan pelapisan ulang menggunakan cat semprot sesuai kondisi awal. Selain itu, pembersihan korosi pada dudukan mesin dilakukan setelah pelepasan mesin dan komponen pendukung untuk mempermudah proses perawatan.

Proses *overhaul* pada generator Firman FPG 1510 RV1-C dilakukan karena perawatan awal belum mampu mengembalikan kestabilan operasional mesin. Indikasi utama yang menjadi dasar pelaksanaan *overhaul* adalah mesin masih sering mati dan putaran operasional belum stabil meskipun telah dilakukan penggantian beberapa komponen awal. *Overhaul* bertujuan untuk mengembalikan kondisi mesin mendekati spesifikasi standar melalui pemeriksaan menyeluruh, pembersihan deposit karbon, penggantian komponen yang aus atau rusak, serta pemeriksaan ulang parameter mekanis mesin.

Tahapan *overhaul* meliputi pembongkaran komponen (*disassembly*), pembersihan komponen (*cleaning*), penggantian komponen rusak (*replacing*), dan pemasangan kembali komponen (*assembly*). Proses *overhaul* diawali dengan pengosongan oli mesin untuk mencegah kontaminasi residu dan tumpahan oli selama pembongkaran. Selanjutnya dilakukan pelepasan dan pembersihan filter udara, karburator, starter, busi, dan *engine guard* untuk mempermudah pemeriksaan komponen internal mesin serta memastikan kualitas sistem pembakaran tetap optimal.

## 2.6 Pengujian Performansi dan Emisi

Pengujian performansi dilakukan untuk mengevaluasi keberhasilan proses perawatan dan *overhaul* generator. Parameter pengujian meliputi konsumsi bahan bakar, daya listrik keluaran, dan emisi gas buang. Pengujian dilakukan menggunakan pembebanan listrik sebesar 570 Watt dengan variasi putaran mesin untuk memperoleh karakteristik performansi generator setelah perawatan.

Pengukuran putaran mesin dilakukan menggunakan *tachometer* digital. Pengukuran dilakukan dengan metoda non-kontak. Sedangkan pengukuran tegangan dan arus listrik dilakukan menggunakan *multitester* dan *clamp meter*. Konsumsi bahan bakar diukur secara volumetrik menggunakan gelas ukur dan *stopwatch* dengan mengamati perubahan volume bahan bakar terhadap waktu pengoperasian mesin. Sementara itu, pengujian emisi gas buang dilakukan menggunakan *gas analyzer* untuk mengetahui kandungan Karbon Monoksida (CO) dan komponen Hidrokarbon (HC) pada buangan pembakaran.

Seluruh data hasil pengujian dicatat dan digunakan dalam proses pengolahan data untuk menghitung konsumsi bahan bakar, daya listrik, konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC), dan efisiensi termal generator setelah *overhaul* dilakukan.

## 2.7 Pengolahan Data Sampel

Didapatkan hasil ukur dari pengujian konsumsi bahan bakar dan daya listrik yang dihasilkan pada volume bahan bakar 10 ml dan pembebanan listrik menggunakan gerinda tangan 570 Watt. Pengujian performansi mencakup tiga parameter utama: konsumsi bahan bakar, daya listrik luaran, dan emisi gas buang.

### 1. Pengujian Konsumsi Bahan Bakar

Konsumsi bahan bakar diukur secara volumetrik menggunakan gelas ukur. Laju aliran massa bahan bakar ( $m_f$ ) dihitung dengan:

$$m_f = \frac{\rho_f \cdot V}{t} \quad (1)$$

di mana  $\rho_f$  adalah massa jenis bahan bakar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $V$  merupakan volume bahan bakar yang terpakai ( $\text{m}^3$ ), dan  $t$  merupakan waktu (s).

### 2. Pengukuran Daya Listrik Keluaran

Daya listrik  $P$  (Watt) dihitung dari tegangan  $V$  (V) dan arus  $I$  (A), dengan hubungan sebagai berikut:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2)$$

Untuk beban resistif,  $\cos \varphi \approx 1$ .

### 3. Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)

BSFC dihitung dalam rangka evaluasi efisiensi penggunaan bahan bakar, satuan BSFC yaitu  $\text{kg/kWh}$ :

$$BSFC = \frac{m_f}{P} \quad (3)$$

### 4. Brake Thermal Efficiency (BTE)

Efisiensi termal dihitung dengan:

$$BTE = \frac{P}{m_f \times LHV} \times 100\% \quad (4)$$

Di mana LHV merupakan nilai kalor bawah bahan bakar ( $\text{MJ/kg}$ ). Nilai ini dapat diperoleh dari spesifikasi teknis bahan bakar yang dikeluarkan pemegang produk.

### 5. Pengujian Emisi Gas Buang

Emisi CO (%) dan HC (ppm) diukur menggunakan *gas analyzer*, dan dibandingkan dengan batas ambang sesuai standard emisi Nasional. Data yang diperoleh dari pengujian performansi kemudian dianalisis untuk mengetahui peningkatan kinerja setelah dilakukan

perawatan dan *overhaul*. Grafik hubungan antara beban, konsumsi bahan bakar, dan efisiensi termal digunakan memberikan gambaran visual kinerja unit generator.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilaksanakan pengujian performansi, dilakukan pengolahan lebih lanjut seperti pemeriksaan Konsumsi Bahan Bakar. Pencatatan data ukur dilakukan dengan variasi putaran mesin dan dihitung menggunakan *stopwatch* untuk mengetahui waktu konsumsi bahan bakar setiap 10 ml, pengukuran voltase dan arus pada pembebanan listrik 570 Watt dengan aplikasi gerinda tangan.

Tabel 2 menyajikan hasil pengukuran konsumsi bahan bakar unit generator Firman FPG1510 RV1-C berdasarkan hal tersebut data pengujian terlihat mengalami peningkatan putaran mesin berbanding terbalik dengan waktu konsumsi bahan bakar. Putaran terendah 2973 Rotasi per menit (*RPM*), waktu yang dibutuhkan untuk menghabiskan 10 ml bahan bakar tercatat selama 98.2 detik, sedangkan pada putaran tertinggi 3177 *RPM*, waktu tersebut menurun menjadi 80.17 detik. Fenomena ini menunjukkan bahwa semakin tinggi putaran mesin, semakin cepat bahan bakar dikonsumsi, sesuai prinsip dasar mesin pembakaran dalam yang memerlukan distribusi bahan bakar lebih besar untuk mempertahankan daya pada kecepatan putaran tinggi.

Tabel 2 Hasil Pengolahan Data Sampel Uji Konsumsi Bahan Bakar Setelah *Overhaul* Pertama

| Bukaan Gas | Putaran Mesin ( <i>RPM</i> ) | Beban ( <i>Watt</i> ) | Volume bahan bakar ( <i>ml</i> ) | Waktu konsumsi ( <i>s</i> ) | Tegangan ( <i>V</i> ) | Arus ( <i>A</i> ) | Daya Listrik ( <i>W</i> ) |
|------------|------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|
| 1          | 2973                         | 570                   | 10                               | 98.2                        | 210                   | 1.01              | 212.1                     |
| 2          | 2982                         | 570                   | 10                               | 97.33                       | 210                   | 1.13              | 237.3                     |
| 3          | 3006                         | 570                   | 10                               | 92.73                       | 210                   | 1.17              | 245.7                     |
| 4          | 3032                         | 570                   | 10                               | 87.51                       | 215                   | 1.15              | 247.25                    |
| 5          | 3075                         | 570                   | 10                               | 83.05                       | 210                   | 1.18              | 247.8                     |
| 6          | 3177                         | 570                   | 10                               | 80.17                       | 210                   | 1.19              | 249.9                     |

Tegangan keluaran generator berada pada rentang 210–215 V dengan arus sebesar 1.01–1.19 A. Daya listrik yang dihasilkan berkisar antara 212.1–249.9 Watt dan cenderung meningkat seiring kenaikan putaran mesin. Namun, peningkatan daya listrik tersebut tidak berlangsung secara proporsional terhadap peningkatan konsumsi bahan bakar. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian energi hasil pembakaran belum sepenuhnya dikonversi menjadi daya listrik efektif.

Pada putaran mesin yang lebih tinggi, rugi-rugi mekanis dan termal mulai meningkat akibat gesekan antar komponen bergerak, peningkatan temperatur kerja, serta getaran mesin yang lebih besar. Selain itu, waktu pembakaran yang semakin singkat pada *RPM* tinggi menyebabkan proses pembakaran campuran udara dan bahan bakar menjadi kurang optimal. Kondisi tersebut menyebabkan konsumsi bahan bakar meningkat lebih cepat dibandingkan peningkatan daya listrik yang dihasilkan. Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa karakteristik performansi generator dipengaruhi secara langsung oleh perubahan putaran mesin dan efisiensi proses konversi energi yang terjadi selama operasi.

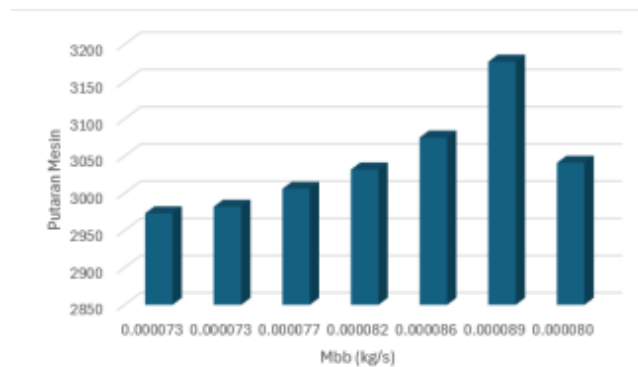
Tabel 3 Hasil Pengolahan Data Sampel Uji Konsumsi Bahan Bakar Setelah *Overhaul* Kedua

| Bukaan Gas | Putaran Mesin ( <i>RPM</i> ) | Mbb ( <i>kg/s</i> ) | Daya Bahan Bakar ( <i>kW</i> ) | Daya Poros Indikator ( <i>kW</i> ) | Torsi ( <i>Nm</i> ) | Konsumsi Bahan Bakar Spesifik ( <i>kg.kW.H</i> ) | Efisiensi Daya Listrik (%) | BTE (%) |
|------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------|--|----------------------------|---------|
| 1          | 2973                         | 0.000073            | 3.22                           | 1.40                               | 4.50                | 0.18719  | 15.15                      | 43.45   |
| 2          | 2982                         | 0.000073            | 3.25                           | 1.40                               | 4.50                | 0.18829  | 16.90                      | 43.20   |
| 3          | 3006                         | 0.000077            | 3.41                           | 1.42                               | 4.50                | 0.19606  | 17.35                      | 41.49   |
| 4          | 3032                         | 0.000082            | 3.62                           | 1.43                               | 4.50                | 0.20597  | 17.31                      | 39.49   |

|           |      |          |      |      |      |         |       |       |
|-----------|------|----------|------|------|------|---------|-------|-------|
| 5         | 3075 | 0.000086 | 3.81 | 1.45 | 4.50 | 0.21399 | 17.11 | 38.01 |
| 6         | 3177 | 0.000089 | 3.95 | 1.50 | 4.50 | 0.21456 | 16.70 | 37.91 |
| Rata-rata | 3041 | 0.000080 | 3.54 | 1.43 | 4.50 | 0.20101 | 16.75 | 40.59 |

Tabel 3 menunjukkan hasil performansi generator setelah *overhaul* pada rentang putaran 2973–3177 RPM. Laju aliran massa bahan bakar (mbb) meningkat dari 0.000073 kg/s menjadi 0.000089 kg/s seiring kenaikan putaran mesin, yang menunjukkan bahwa kebutuhan bahan bakar semakin besar untuk mempertahankan proses pembakaran dan daya keluaran generator. Daya bahan bakar yang dihasilkan berada pada rentang 3.22–3.95 kW, sedangkan daya poros indikator berkisar 1.40–1.50 kW dengan nilai torsi relatif stabil sebesar 4.50 Nm karena pembebanan listrik dijaga konstan selama pengujian. Nilai *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC) meningkat dari 0.18719 kg/kWh pada 2973 RPM menjadi 0.21456 kg/kWh pada 3177 RPM, yang mengindikasikan bahwa pada putaran tinggi mesin membutuhkan konsumsi bahan bakar lebih besar untuk menghasilkan daya yang relatif sama. Kondisi ini menunjukkan adanya penurunan efisiensi penggunaan bahan bakar akibat meningkatnya rugi mekanis dan termal pada mesin.

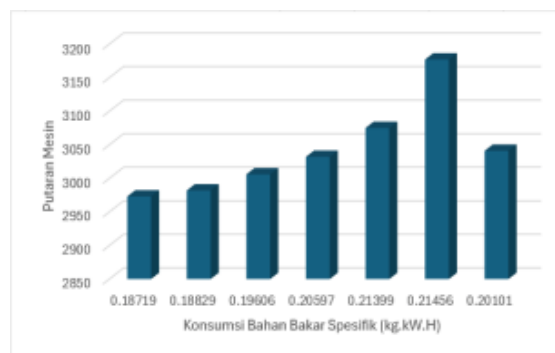
Efisiensi daya listrik tertinggi diperoleh pada putaran 3006 RPM sebesar 17.35%, kemudian mengalami penurunan pada putaran yang lebih tinggi. Fenomena ini menunjukkan adanya titik operasi optimal generator pada putaran menengah, di mana konversi energi mekanik menjadi energi listrik berlangsung paling efektif. Penurunan efisiensi pada RPM tinggi dipengaruhi oleh meningkatnya gesekan antar komponen bergerak, temperatur kerja, getaran mesin, dan waktu pembakaran yang semakin singkat sehingga proses pembakaran menjadi kurang optimal. Selain itu, *Brake Thermal Efficiency* (BTE) tertinggi diperoleh pada putaran 2973 RPM sebesar 43.45% dan menurun hingga 37.91% pada 3177 RPM. Penurunan BTE menunjukkan bahwa kemampuan mesin dalam mengubah energi panas hasil pembakaran menjadi energi mekanik semakin berkurang pada putaran tinggi akibat meningkatnya rugi panas ke dinding silinder dan gas buang. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, putaran optimal generator untuk memperoleh efisiensi operasional terbaik berada pada rentang putaran menengah sekitar 3000 RPM.



Gambar 2 Grafik Hubungan Laju Pemakaian Bahan Bakar Terhadap Putaran Mesin Setelah *Overhaul*

Peningkatan putaran mesin menyebabkan laju pemakaian bahan bakar generator semakin besar setelah proses *overhaul*. Gambar 2 menunjukkan bahwa laju pemakaian bahan bakar tertinggi diperoleh pada putaran 3177 RPM sebesar 0.000089 kg/s, sedangkan nilai terendah terjadi pada putaran 2973 RPM sebesar 0.000073 kg/s. Kondisi ini menunjukkan bahwa semakin tinggi putaran mesin, semakin besar suplai bahan bakar yang diperlukan untuk mempertahankan proses pembakaran, daya, dan torsi generator. Karakteristik tersebut sesuai dengan prinsip kerja mesin pembakaran dalam, di mana peningkatan RPM akan meningkatkan frekuensi pembakaran sehingga konsumsi bahan bakar turut meningkat. Namun, peningkatan

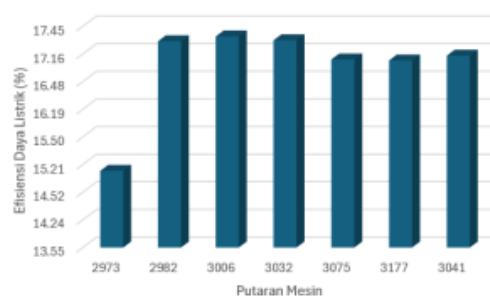
konsumsi bahan bakar tidak sepenuhnya diikuti peningkatan daya keluaran dan efisiensi listrik secara proporsional. Pada putaran tinggi, rugi mekanis akibat gesekan antar komponen bergerak, getaran mesin, dan rugi panas semakin meningkat sehingga sebagian energi hasil pembakaran tidak dapat dikonversi menjadi daya listrik secara efektif. Selain itu, waktu pembakaran yang semakin singkat pada RPM tinggi menyebabkan proses pembakaran campuran udara dan bahan bakar menjadi kurang sempurna. Kondisi tersebut mengakibatkan efisiensi generator menurun pada putaran tinggi meskipun konsumsi bahan bakar terus meningkat, sehingga putaran menengah menjadi kondisi operasi yang lebih optimal bagi generator.



Gambar 3 Grafik konsumsi bahan bakar spesifik terhadap putaran mesin setelah *overhaul*

Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai BSFC terendah diperoleh pada putaran 2973 RPM sebesar 0.18719 kg/kWh, sedangkan nilai tertinggi terjadi pada putaran 3177 RPM sebesar 0.21456 kg/kWh. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada putaran rendah mesin membutuhkan bahan bakar lebih sedikit untuk menghasilkan energi listrik, sehingga efisiensi operasional generator menjadi lebih baik. Nilai Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) cenderung meningkat seiring bertambahnya putaran mesin, yang menunjukkan terjadinya penurunan efisiensi penggunaan bahan bakar pada RPM tinggi. Sebaliknya, peningkatan nilai BSFC pada putaran tinggi menandakan bahwa konsumsi bahan bakar per satuan energi yang dihasilkan semakin besar.

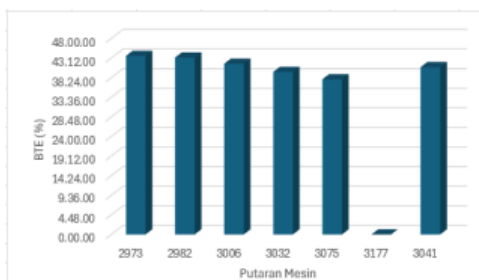
Peningkatan BSFC pada RPM tinggi dipengaruhi oleh semakin singkatnya waktu pembakaran sehingga proses pencampuran udara dan bahan bakar menjadi kurang sempurna. Selain itu, meningkatnya gesekan antar komponen bergerak seperti piston, katup, crankshaft, dan bearing menyebabkan rugi mekanis semakin besar sehingga sebagian energi hasil pembakaran hilang dalam bentuk panas dan getaran. Kondisi tersebut menyebabkan tambahan konsumsi bahan bakar tidak sepenuhnya dikonversi menjadi daya efektif. Dengan demikian, generator cenderung memiliki efisiensi penggunaan bahan bakar yang lebih baik pada putaran rendah hingga menengah dibandingkan pada putaran maksimum.



Gambar 4 Grafik efisiensi daya listrik terhadap putaran mesin setelah *overhaul*

Gambar 4 menunjukkan bahwa efisiensi daya listrik meningkat hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 17.35% pada putaran 3006 RPM, kemudian mengalami penurunan seiring bertambahnya putaran mesin. Sementara itu, nilai efisiensi terendah diperoleh pada putaran 2973 RPM sebesar 15.15%. Efisiensi daya listrik generator menunjukkan adanya titik operasi optimal pada putaran menengah mesin. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada rentang putaran sekitar 3000 RPM, proses konversi energi mekanik menjadi energi listrik berlangsung paling efektif sehingga generator mampu menghasilkan daya listrik dengan efisiensi yang lebih baik.

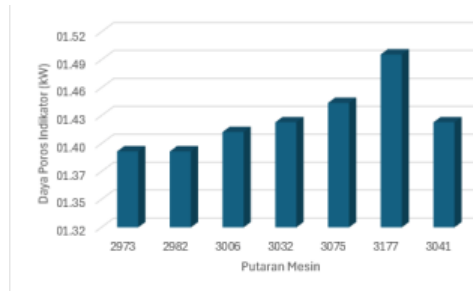
Penurunan efisiensi setelah melewati titik optimal dipengaruhi oleh meningkatnya rugi-rugi mekanis dan termal pada sistem generator. Pada putaran tinggi, gesekan antar komponen bergerak, vibrasi mesin, dan rugi panas akibat temperatur operasional yang lebih tinggi menyebabkan sebagian energi hasil pembakaran hilang sebelum dikonversi menjadi energi listrik. Selain itu, peningkatan putaran rotor generator dapat menyebabkan slip dan ketidakstabilan sistem pembangkitan sehingga efisiensi konversi energi menurun. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa generator bensin skala kecil cenderung memiliki efisiensi terbaik pada putaran menengah sebelum mengalami penurunan performansi akibat beban mekanis dan termal yang semakin besar pada RPM tinggi.



Gambar 5 Grafik efisiensi *thermal brake* (BTE) terhadap putaran mesin setelah *overhaul*

Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai BTE tertinggi diperoleh pada putaran 2973 RPM sebesar 43.45%, sedangkan nilai terendah terjadi pada putaran 3177 RPM sebesar 37.91%. Efisiensi *thermal brake* (BTE) cenderung menurun seiring bertambahnya putaran mesin, yang menunjukkan berkurangnya kemampuan mesin dalam mengubah energi panas hasil pembakaran menjadi energi mekanik secara efektif. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada putaran rendah hingga menengah proses pembakaran berlangsung lebih optimal sehingga energi panas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara lebih efektif untuk menghasilkan daya mekanik generator.

Penurunan BTE pada putaran tinggi dipengaruhi oleh semakin singkatnya waktu pembakaran sehingga campuran udara dan bahan bakar tidak terbakar secara sempurna di dalam ruang bakar. Selain itu, peningkatan temperatur kerja mesin menyebabkan rugi panas ke dinding silinder dan gas buang semakin besar sehingga sebagian energi hasil pembakaran hilang ke lingkungan. Gesekan antar komponen bergerak seperti piston, crankshaft, dan bearing juga meningkat pada RPM tinggi sehingga menambah rugi mekanis mesin. Kondisi tersebut menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar tidak diikuti peningkatan daya efektif secara proporsional. Fenomena ini sekaligus menjelaskan mengapa efisiensi daya listrik generator juga cenderung menurun pada putaran tinggi, karena energi mekanik yang diteruskan ke generator telah mengalami kehilangan energi akibat rugi termal dan mekanis. Dengan demikian, operasi generator pada putaran rendah hingga menengah lebih direkomendasikan untuk memperoleh efisiensi termal dan efisiensi listrik yang lebih optimal.



Gambar 6 Grafik perbandingan hasil daya poros setelah *overhaul* dengan spesifikasi standar

Hasil perbandingan daya poros setelah *overhaul* terhadap spesifikasi standar menunjukkan bahwa performansi generator mengalami peningkatan setelah dilakukan perawatan menyeluruh. Gambar 6 memperlihatkan bahwa nilai daya poros hasil pengujian berada di atas spesifikasi standar pada seluruh rentang putaran mesin. Pada putaran 3000 RPM, daya poros setelah *overhaul* mencapai 1.42 kW, sedangkan spesifikasi standar sebesar 1.17 kW sehingga terjadi peningkatan sebesar 0.25 kW atau 21.37%. Kondisi serupa juga terlihat pada putaran 3177 RPM, di mana daya poros mencapai 1.50 kW dibandingkan nilai standar 1.32 kW atau meningkat sebesar 13.64%.

Peningkatan daya poros tersebut menunjukkan bahwa proses *overhaul* berhasil memperbaiki kondisi mekanis dan sistem pembakaran generator. Pembersihan deposit karbon, penggantian komponen yang aus, serta perbaikan sistem pembakaran menyebabkan proses kompresi dan pembakaran berlangsung lebih optimal sehingga energi hasil pembakaran dapat dikonversi menjadi daya mekanis dengan lebih efektif. Selain itu, penurunan gesekan internal mesin setelah *overhaul* turut mengurangi kehilangan energi mekanis selama operasi. Meskipun daya poros meningkat pada putaran tinggi, peningkatan tersebut tidak selalu diikuti efisiensi yang lebih baik karena rugi panas dan rugi mekanis juga meningkat seiring kenaikan RPM. Oleh sebab itu, rentang putaran 3000–3177 RPM dapat dikategorikan sebagai daerah operasi optimal untuk menghasilkan daya poros yang tinggi dengan performansi generator yang relatif stabil setelah *overhaul*.

### 3.1 Pemeriksaan Emisi Gas Buang

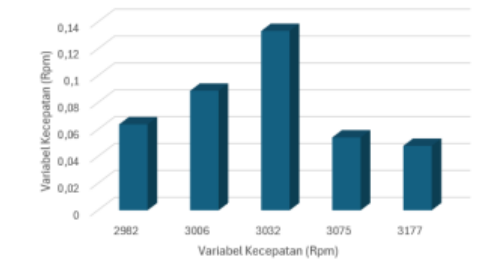
Salah satu pengujian operasional yang dilakukan adalah pengujian gas emisi. Pengambilan sampel data dilakukan dengan variasi putaran mesin dan dihitung menggunakan *tachometer* untuk mengetahui putaran poros mesin. Kondisi ini mensimulasikan kondisi operasional.

Tabel 4 Hasil emisi gas buang setelah *overhaul*

| Putaran Mesin (RPM) | Kadar CO (%) | Kadar HC (ppm) | Keterangan |
|---------------------|--------------|----------------|------------|
| 2982                | 0.92         | 80             | Baik       |
| 3006                | 1.68         | 87             | Baik       |
| 3032                | 2.72         | 111            | Baik       |
| 3075                | 1.18         | 153            | Baik       |
| 3177                | 1.9          | 139            | Baik       |

Tabel 4 menunjukkan bahwa hasil uji emisi gas buang setelah *overhaul* pada generator Firman FPG1510 RV1-C masih berada dalam kategori baik karena seluruh nilai emisi karbon dioksida (CO) dan gas hidrokarbon (HC) berada di bawah batas standar emisi mesin bensin. Nilai emisi CO terendah diperoleh pada putaran 2982 RPM sebesar 0.92%, sedangkan nilai tertinggi terjadi pada putaran 3032 RPM sebesar 2.72%. Sementara itu, emisi HC terendah tercatat sebesar 80 ppm pada putaran 2982 RPM dan tertinggi sebesar 153 ppm pada putaran

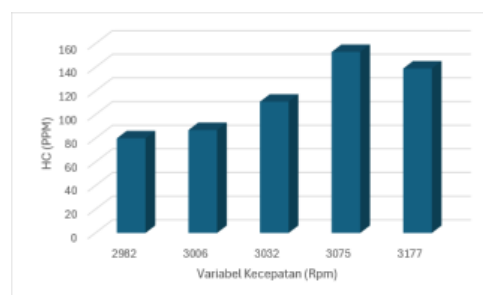
3075 RPM. Nilai emisi yang dihasilkan masih berada jauh di bawah ambang batas standar, menunjukkan bahwa proses pembakaran pada generator masih berlangsung dalam kondisi yang relatif baik setelah dilakukan *overhaul*. sehingga dapat disimpulkan bahwa proses *overhaul* berhasil memperbaiki performansi sistem pembakaran sekaligus menjaga tingkat emisi gas buang tetap aman dan layak operasional.



Gambar 7 Grafik perbandingan hasil uji emisi gas CO setelah *overhaul* – Standard emisi

Gambar 7 menunjukkan bahwa hasil uji emisi gas CO setelah *overhaul* masih berada di bawah batas standar emisi yang berlaku untuk mesin bensin. Nilai emisi CO mengalami peningkatan dari 0.92% pada putaran 2973 RPM hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 2.72% pada 3032 RPM. Setelah itu, kadar CO menurun menjadi 1.09% pada 3075 RPM dan kembali meningkat menjadi 1.90% pada 3177 RPM. Fluktuasi nilai tersebut menunjukkan bahwa perubahan putaran mesin mempengaruhi kualitas proses pembakaran dan komposisi campuran udara–bahan bakar di dalam ruang bakar.

Peningkatan emisi CO pada putaran menengah menunjukkan terjadinya kondisi campuran bahan bakar yang relatif kaya, sehingga suplai oksigen tidak mencukupi untuk menghasilkan pembakaran sempurna. Akibatnya, sebagian karbon hanya teroksidasi menjadi karbon monoksida (CO). Penurunan kadar CO pada putaran lebih tinggi mengindikasikan bahwa peningkatan turbulensi aliran udara dan suhu ruang bakar membantu memperbaiki proses pencampuran dan pembakaran bahan bakar. Namun, kenaikan kembali kadar CO pada RPM tertinggi menunjukkan bahwa pada putaran tinggi mesin mulai mengalami penurunan efisiensi pembakaran akibat waktu pembakaran yang semakin singkat dan meningkatnya rugi panas. Meskipun demikian, seluruh nilai emisi CO masih berada di bawah standar emisi Kota Bandung untuk mesin bensin, sehingga generator dapat dinyatakan layak operasional setelah dilakukan *overhaul*.



Gambar 8. Grafik perbandingan hasil uji emisi gas HC setelah *overhaul* – Standard emisi

Gambar 8 menunjukkan bahwa emisi gas HC setelah *overhaul* mengalami perubahan seiring peningkatan putaran mesin, namun seluruh nilainya masih berada di bawah standar emisi

mesin bensin yang berlaku. Nilai HC terendah diperoleh pada putaran 2973 RPM sebesar 80 ppm, kemudian meningkat hingga mencapai puncak sebesar 153 ppm pada 3075 RPM, dan kembali menurun menjadi 139 ppm pada 3177 RPM. Rendahnya emisi HC pada putaran rendah menunjukkan bahwa proses pembakaran berlangsung lebih sempurna sehingga sebagian besar bahan bakar dapat terbakar secara optimal di dalam ruang bakar.

Peningkatan emisi HC pada putaran menengah hingga tinggi dipengaruhi oleh semakin singkatnya waktu pembakaran sehingga sebagian bahan bakar tidak terbakar sempurna dan terbuang bersama gas buang dalam bentuk hidrokarbon. Selain itu, peningkatan temperatur kerja dan kecepatan aliran gas pada RPM tinggi menyebabkan proses oksidasi bahan bakar menjadi kurang optimal. Penurunan nilai HC pada putaran tertinggi menunjukkan bahwa peningkatan turbulensi campuran udara dan bahan bakar membantu memperbaiki kualitas pembakaran meskipun efisiensi termal mesin mulai menurun. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses *overhaul* berhasil memperbaiki sistem pembakaran generator dan menjaga emisi HC tetap berada pada tingkat aman. Seluruh nilai HC yang diperoleh masih berada di bawah standar emisi gas HC Kota Bandung untuk mesin bensin sehingga generator dinyatakan layak digunakan setelah dilakukan *overhaul*.

#### 4. KESIMPULAN

Proses perawatan *overhaul* pada generator Firman FPG1510 RV1-C berhasil mengembalikan kondisi operasional unit yang sebelumnya mengalami ketidakstabilan dan tidak dapat beroperasi secara optimal. Perawatan dilakukan melalui penggantian komponen yang mengalami kerusakan atau keausan seperti spark plug, paking, oli, mur-baut, serta pembersihan menyeluruh pada sistem pembakaran dan komponen pendukung lainnya. Hasil pengujian performansi menunjukkan bahwa laju pemakaian bahan bakar tertinggi diperoleh sebesar 0.000089 kg/s pada putaran 3177 RPM, sedangkan nilai *brake specific fuel consumption* (BSFC) tertinggi sebesar 0.21456 kg/kWh terjadi pada putaran yang sama. Efisiensi daya listrik tertinggi diperoleh pada putaran 3006 RPM sebesar 17.35%, sementara *brake thermal efficiency* (BTE) tertinggi sebesar 43.45% diperoleh pada putaran 2973 RPM. Hasil pengujian emisi menunjukkan kadar karbon dioksida (CO) sebesar 0.92–2.72% dan kadar hidrokarbon (HC) sebesar 80–153 ppm, sehingga masih berada di bawah batas standar emisi mesin bensin Kota Bandung. Selain itu, daya poros indikator setelah *overhaul* mencapai 1.42 kW pada 3006 RPM, lebih tinggi dibanding spesifikasi standar sebesar 1.17 kW pada 3000 RPM, sehingga terjadi peningkatan performa sebesar 21%. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perawatan *overhaul* efektif dalam meningkatkan performansi, efisiensi operasional, dan kualitas pembakaran generator set skala kecil. Peningkatan performa tersebut membuktikan bahwa genset yang mengalami degradasi masih dapat dipulihkan melalui perawatan yang tepat tanpa harus melakukan penggantian unit baru. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi solusi alternatif bagi usaha konveksi dan industri skala kecil di daerah yang sering mengalami pemadaman listrik untuk menjaga kontinuitas produksi dengan biaya yang lebih ekonomis. Oleh karena itu, penerapan perawatan terjadwal dan pemeriksaan berkala sangat direkomendasikan untuk mempertahankan keandalan serta umur pakai generator. Selain itu, pengembangan panel dan rangka khusus pengujian performansi disarankan untuk mempermudah proses evaluasi kinerja generator pada penelitian selanjutnya maupun kebutuhan maintenance di lapangan.

#### 5. SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dimana genset menunjukkan peningkatan performa setelah dilakukan perawatan *overhaul* dengan penggantian komponen seperti *spark plug*, paking, oli, mur-baut, serta pembersihan menyeluruh, maka disarankan beberapa hal seperti penerapan Program Perawatan Terjadwal (*Scheduled Maintenance*,

pengembangan sistem Pengujian Genset, standarisasi Prosedur Perawatan (*Maintenance Manual*), optimasi Operasi Genset Berdasarkan Hasil Uji, monitoring Performa dan Emisi Secara Berkala dan pengembangan Penelitian Lanjutan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. R. Pamungkas, W. . Bhirawa, and B. Arianto, “Analisa Performansi Pemeliharaan Generator Set (Genset) dengan Metode TPM (Total Productive Maintenance) untuk Meningkatkan Kerja di PT. Lativi Media Karya,” *J. Teknol. dan Manaj. Ind. Ter. Ind.*, vol. 8, no. 1, p. 5, 2019, [Online]. Available: <https://journal.universitassuryadarma.ac.id/index.php/jtin/article/view/803>
- [2] R. L. S. Ira Destiana Pasaribu, “Analisis Pengaruh Pemadaman Listrik Secara Berkala Serta Penggunaan Genset Terhadap Kegiatan Usaha Mikro Di Kecamatan Medan Baru,” *J. Ekon. dan Keuang.*, pp. 500–512, 2014.
- [3] D. W. Syahputra and S. Wahyuningsih, “Analisis Gangguan dan Perawatan pada Mesin Diesel generator di KM. Egon,” *J. Bus. Technol. Econ.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2023.
- [4] Y. Huang *et al.*, “Impact of drivers on real-driving fuel consumption and emissions performance,” *Sci. Total Environ.*, vol. 798, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149297.
- [5] S. B. Nugroho, A. Fujiwara, and J. Zhang, “Analysis of Inspection and Maintenance Program in JABODETABEK Indonesia Nugroho, S.B., A. FUJIWARA, Junyi ZHANG Transportation Engineering Laboratory, Graduate School for International Development and Cooperation, Hiroshima University Japan,” *12th World Conf. Transp. Res.*, pp. 1–14, 2010.
- [6] D. Aldyansyah *et al.*, “Perawatan Mesin Alat Berat Wheel Loader PT. XYZ,” *J. Tek. Mesin*, vol. 20, no. 1, pp. 18–23, 2023, doi: 10.9744/jtm.20.1.18-23.
- [7] R. Antema, S. Samsuddin, and I. Zein, “Analisa Perawatan Mesin Genset pada Perusahaan Penyedia Layanan Telekomunikasi dengan Menggunakan Metode RCM,” *Juni*, vol. 2, no. 2, pp. 1–7, 2022.
- [8] Didik Wahjudi and Amelia Amelia, “Analisa Penjadwalan Dan Biaya Perawatan Mesin Press Untuk Pembentukan Kampas Rem,” *J. Tek. Mesin*, vol. 2, no. 1, pp. 50–61, 2000, [Online]. Available: <http://puslit2.petra.ac.id/ejournal/index.php/mes/article/view/15919>
- [9] I. D. Pranowo, *Sistem dan Manajemen Pemeliharaan Maintenance: (System and Management)*. Yogyakarta: DEEPUBLISH (CV BUDI UTAMA), 2019.
- [10] R. A. Trianbowo, “Analisis Jadwal Perawatan Mesin Genset Di Cv. Sejati Teknik Semarang Dengan Metode Reliability Centered Maintenance (Rcm),” *J. Tek. Ind.*, pp. 1–120, 2023, [Online]. Available: [http://repository.unissula.ac.id/29791/1/Teknik Industri\\_31601800077\\_fullpdf.pdf](http://repository.unissula.ac.id/29791/1/Teknik Industri_31601800077_fullpdf.pdf)
- [11] R. Nurcahyo, D. W. Maulida, D. A. Susanto, and E. Kristiningrum, “Assessment of Maintenance Performance Using the Maintenance Scorecard Method and Prioritization of Problem Control Strategies with the USG Method,” *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 13, no. 6, pp. 2267–2273, 2023, doi: 10.18517/ijaseit.13.6.18563.
- [12] Y. Effendi, A. Rosyidin, and B. Setiawan, “Peningkatan Performa Termal Dengan Menggunakan Vortex Generators Didalam Saluran Persegi Panjang Vortex generators ( VGs ) are an effective method for improving the thermal performance of heat exchangers . This study aims to optimize the heat transfer rat,” vol. 13, no. 1, pp. 117–126, 2024.
- [13] A. Lazzaretto and A. Toffolo, “Prediction of performance and emissions of a two-shaft gas turbine from experimental data,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, no. 17–18, pp. 2405–2415, 2008, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.01.021.
- [14] D. H. Qi, H. Chen, R. D. Matthews, and Y. Z. Bian, “Combustion and emission characteristics of ethanol-biodiesel-water micro-emulsions used in a direct injection compression ignition engine,” *Fuel*, vol. 89, no. 5, pp. 958–964, 2010, doi:

- 10.1016/j.fuel.2009.06.029.
- [15] A. E. Saputra and I. W. Susila, "Uji Performa Mesin Sepeda Motor Honda Beat 108CC Berbahan Bakar Campuran Premium Dan Bioetanol Dari Batang Rumput Gajah," *J. Pendidik. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 01, pp. 80–86, 2020.
- [16] I. Prasetyo, S. Sarjito, and M. Effendy, "Analisa Performa Mesin Dan Kadar Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor Dengan Memanfaatkan Bioetanol Dari Bahan Baku Singkong Sebagai Bahan Bakar Alternatif Campuran Pertalite," *Media Mesin Maj. Tek. Mesin*, vol. 19, no. 2, pp. 43–54, 2019, doi: 10.23917/mesin.v19i2.5698.
- [17] A. M. Cahya Negara, I. Sigit Atmanto, J. Mrihardjono, S. V. Rekayasa, and P. Mekanik, "Uji Performa Mesin Menggunakan Bahan Bakar Pertamina Dan Pertamina Turbo Pada Mesin 4 Langkah," *J. Mekanova Mek. Inov. dan Teknol.*, vol. 9, no. 1, 2023.
- [18] B. A. Syahar, "Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Gas HHO Pada Pertamina dan E85 Terhadap Unjuk Kerja dan Emisi Gas Buang Motor Honda All New Megapro 150 Cc," 2018, [Online]. Available: [https://repository.its.ac.id/57376/0Ahttps://repository.its.ac.id/57376/1/02111545000044-Undergraduate thesis.pdf](https://repository.its.ac.id/57376/0Ahttps://repository.its.ac.id/57376/1/02111545000044-Undergraduate%20thesis.pdf)
- [19] Y. Jiang *et al.*, "Understanding elevated real-world NOx emissions: 'Heavy-duty diesel' engine certification testing versus in-use vehicle testing," *Fuel*, vol. 307, no. August 2021, p. 121771, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121771.
- [20] A. John *et al.*, "Experimental evaluation of the significance of scheduled turbocharger reconditioning on marine diesel engine efficiency and exhaust gas emissions," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 15, no. 8, p. 102845, 2024, doi: 10.1016/j.asej.2024.102845.
- [21] S. Raj, I. Bajracharya, R. Ananda, and P. Bhawe, "Estimation of air pollutant emissions from captive diesel generators and its mitigation potential through microgrid and solar energy," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 3251–3262, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.02.084.
- [22] E. Tumembow, M. N., & Dosoputranto, "Teknik Perawatan Perbaikan Mesin," *Angew. Chemie Int. Ed.* 6(11), 951–952., p. 297, 1967.
- [23] D. Teguh Santoso, Tabah Priangkoso, "Pengujian Performance Mesin Motor Bensin 4 Tak 113 Cc Untuk Penggerak Generator Ac 2 , 5 Kw," pp. 9–12, 2009.
- [24] T. Y. Kim, S. Lee, and K. Kang, "Performance and emission characteristics of a high-compression-ratio diesel engine fueled with wood pyrolysis oil-butanol blended fuels," *Energy*, vol. 93, pp. 2241–2250, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.10.119.
- [25] M. Park, J. Hur, and W. Lee, "Prediction of diesel generator performance and emissions using minimal sensor data and analysis of advanced machine learning techniques," *J. Ocean Eng. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 150–168, 2025, doi: 10.1016/j.joes.2023.10.004.
-