

## Perbandingan Kinerja Mesin Diesel MTU V12 Seri 4000 G61 Sebelum dan Sesudah Overhaul: Studi Kasus di PT. PLN PLTD Lasikin

Nuzul Baroqah<sup>1</sup>, Joli Supardi<sup>2</sup>, Nadya Yunisa Fahmi<sup>3</sup>, Andri Afrizal<sup>4</sup>, Teuku Ariessa Sukhairi<sup>5</sup>  
Al Munawir<sup>\*6</sup>,

<sup>1,2,3,6</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar, Meulaboh

<sup>4</sup>Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik Iskandar Thani, Banda Aceh

<sup>5</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala

e-mail: <sup>\*6</sup>almunawir@utu.ac.id

### Abstrak

Penelitian ini menganalisis perbandingan kinerja mesin diesel MTU V12 Seri 4000 G61 sebelum dan sesudah overhaul di PT. PLN PLTD Lasikin, Kabupaten Simeulue, Provinsi Aceh. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental melalui pembongkaran dan pengujian langsung pada mesin dengan mengukur parameter daya ideal, torsi, specific fuel consumption (SFC), efisiensi termal, dan distribusi temperatur pada delapan titik komponen. Proses overhaul meliputi penggantian cylinder liner, perbaikan crankshaft bearing melalui metode polishing, serta penggantian main bearing dan thrust bearing secara total. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan daya ideal pada beban 70% dari 399,7 kW menjadi 875,6 kW dengan capaian torsi sebesar 5,57 Nm. Nilai SFC mengalami penurunan dari 0,0551 kg/kWh menjadi 0,0251 kg/kWh pada beban 70%, dan mencapai titik efisiensi terbaik sebesar 0,0176 kg/kWh pada beban 100%. Analisis termal menunjukkan penurunan suhu rata-rata komponen mesin sebesar 25,2%, dengan perbaikan paling signifikan pada turbocharger (74%) dan saringan katup output (73%). Penelitian menyimpulkan bahwa overhaul berhasil memulihkan kinerja mesin secara signifikan, meskipun belum dapat menyamai performa mesin pada kondisi baru akibat faktor usia teknis dan degradasi komponen yang tidak termasuk dalam lingkup perbaikan.

**Kata kunci**—mesin diesel, overhaul, daya ideal, SFC, efisiensi termal, PLTD

### Abstract

This study analyzes the comparative performance of the MTU V12 Series 4000 G61 diesel engine before and after overhaul at PT. PLN PLTD Lasikin, Simeulue Regency, Aceh Province. The research was conducted experimentally through direct engine disassembly and testing, measuring parameters including indicated power, torque, specific fuel consumption (SFC), thermal efficiency, and temperature distribution across eight component measurement points. The overhaul process involved cylinder liner replacement, crankshaft bearing repair through polishing, and complete replacement of main bearings and thrust bearings. Results indicate that the indicated power at 70% load increased from 399.7 kW to 875.6 kW with a torque output of 5.57 Nm. SFC values decreased from 0.0551 kg/kWh to 0.0251 kg/kWh at 70% load, achieving peak efficiency of 0.0176 kg/kWh at 100% load. Thermal analysis revealed an average engine component temperature reduction of 25.2%, with the most significant cooling improvements observed in the turbocharger (74%) and output valve filter (73%). The study concludes that the overhaul successfully restored engine performance significantly, although it could not fully match brand-new engine performance due to technical aging and degradation of components outside the repair scope.

**Keywords**—diesel engine, overhaul, indicated power, SFC, thermal efficiency, PLTD

## 1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) merupakan salah satu sumber energi utama yang digunakan untuk menyuplai kebutuhan listrik di daerah terpencil dan kepulauan di Indonesia. Keandalan pasokan listrik pada wilayah-wilayah tersebut sangat bergantung pada performa optimal mesin diesel yang dioperasikan secara kontinu dalam kondisi pembebanan tinggi [1]. PT. PLN PLTD Lasikin yang berlokasi di Kabupaten Simeulue, Provinsi Aceh, merupakan salah satu pembangkit yang menjadi tulang punggung distribusi energi listrik bagi masyarakat setempat. Mesin diesel MTU V12 Seri 4000 G61 yang dioperasikan di PLTD Lasikin telah mengalami penurunan performa akibat penggunaan jangka panjang dalam kondisi beban tinggi dan lingkungan operasi yang menantang [2].

Mesin diesel sebagai mesin konversi energi bekerja dengan prinsip pembakaran dalam (*internal combustion engine*) dimana udara dikompresi hingga mencapai tekanan dan suhu tinggi di dalam ruang bakar, sehingga disebut *Compression Ignition Engine* (CIE). Bahan bakar kemudian diinjeksikan ke ruang pembakaran untuk menghasilkan tenaga mekanik sebagai penggerak poros engkol (*crankshaft*) [3]. Dalam operasi kontinu, mesin diesel rentan mengalami keausan pada komponen kritis seperti *cylinder liner*, *piston ring*, *bearing*, dan sistem injeksi yang secara langsung mempengaruhi efisiensi pembakaran dan *output* daya [4].

*Overhaul* merupakan kegiatan perawatan besar yang melibatkan pembongkaran dan pemeriksaan mesin secara menyeluruh, termasuk penggantian suku cadang yang aus sesuai spesifikasi pabrikan [5]. Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji efektivitas *overhaul* pada mesin diesel pembangkit. Ismail [8] menganalisis *predictive maintenance* dengan sistem *major overhaul* pada mesin diesel Mirrless Blackstone di PLTD Poasia. Safaruddin [9] menunjukkan peningkatan daya *generator* dari 8.620 kW menjadi 9.720 kW setelah *overhaul* pada mesin Wartsila 18V38. Nur Fauzi et al. [10] melaporkan pentingnya penggantian *gasket*, *ring piston*, dan kalibrasi pompa injektor dalam mengembalikan performa mesin diesel.

Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah memberikan kontribusi, masih terbatas kajian yang secara komprehensif menganalisis kinerja mesin MTU V12 Seri 4000 G61 mencakup aspek daya, torsi, SFC, efisiensi termal, dan distribusi temperatur secara simultan. Penelitian ini bertujuan mengisi kesenjangan tersebut dengan menyajikan analisis perbandingan kinerja mesin secara menyeluruh sebelum dan sesudah *overhaul*.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PLTD Lasikin, Kecamatan Teupah Tengah, Kabupaten Simeulue, Provinsi Aceh. Objek penelitian adalah mesin diesel *generator* MTU V12 Seri 4000 G61 dengan spesifikasi: konfigurasi 12 silinder V 90°, tipe 4 langkah, *bore* 170 mm, *stroke* 210 mm, rasio kompresi 16,5:1, daya maksimal 1.250 kW pada 1.800 rpm, sistem injeksi langsung (*direct injection*), sistem pendingin air bertekanan, kapasitas bahan bakar 332 liter, dan berat mesin 16.413 kg [7].



**Gambar. 1 MTU V12 SERI 4000 G61**

## 2.2 Metode Pengujian

Penelitian menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif komparatif sesuai *Standard Operating Procedure* (SOP) PT. PLN [12]. Pengujian dilakukan pada putaran 1.000–1.800 rpm (50 Hz) dengan variasi pembebanan 10%–110% daya maksimal. Setiap tahap pengujian dilaksanakan selama 60 menit per level beban untuk memastikan kondisi *steady-state*.

Proses *overhaul* meliputi: (a) penggantian *cylinder liner* baru, (b) perbaikan *crankshaft bearing* melalui *polishing*, (c) penggantian *main bearing* dan *thrust bearing*, serta (d) pembongkaran total untuk inspeksi, pembersihan kerak karbon, dan kalibrasi ulang sistem injeksi [13].

## 2.3 Parameter dan Rumus Perhitungan

Beberapa parameter kinerja mesin dianalisis menggunakan rumus-rumus perhitungan sebagai berikut:

### 1. Daya Ideal

$$P_{ef} = F \times n \times K \quad (1)$$

dimana F = beban (N), n = putaran (rpm), K = 0,0001 [14].

### 2. Torsi

$$T = (60 \times P_{ef}) / (2\pi \times n) \quad (2)$$

dimana T = torsi (Nm), P<sub>ef</sub> = daya ideal (kW), n = putaran mesin (rpm).

### 3. *Specific Fuel Consumption* (SFC)

$$SFC = \dot{m} / P_{ef} \quad (3)$$

dimana  $\dot{m}$  = laju aliran massa bahan bakar (kg/h), P<sub>ef</sub> = daya ideal (kW). Kapasitas tangki bahan bakar 332 liter solar dengan massa jenis ( $\rho$ ) = 860 kg/m<sup>3</sup> menghasilkan laju aliran massa sebesar 285,52 kg/h.

### 4. Efisiensi Termal

$$\eta_{th} = (P_{ef} / (\dot{m} \times LHV)) \times 100\% \quad (4)$$

dimana  $\eta_{th}$  = efisiensi termal (%), P<sub>ef</sub> = daya ideal (kW),  $\dot{m}$  = laju aliran massa bahan bakar (kg/h), LHV = nilai kalor bawah bahan bakar solar sebesar 42.900 kJ/kg [15].

### 5. Perubahan Temperatur

$$\Delta T = ((T1 - T2) / T2) \times 100\% \quad (5)$$

dimana  $\Delta T$  = persentase perubahan temperatur (%), T1 = temperatur sebelum *overhaul* (°C), T2 = temperatur sesudah *overhaul* (°C).

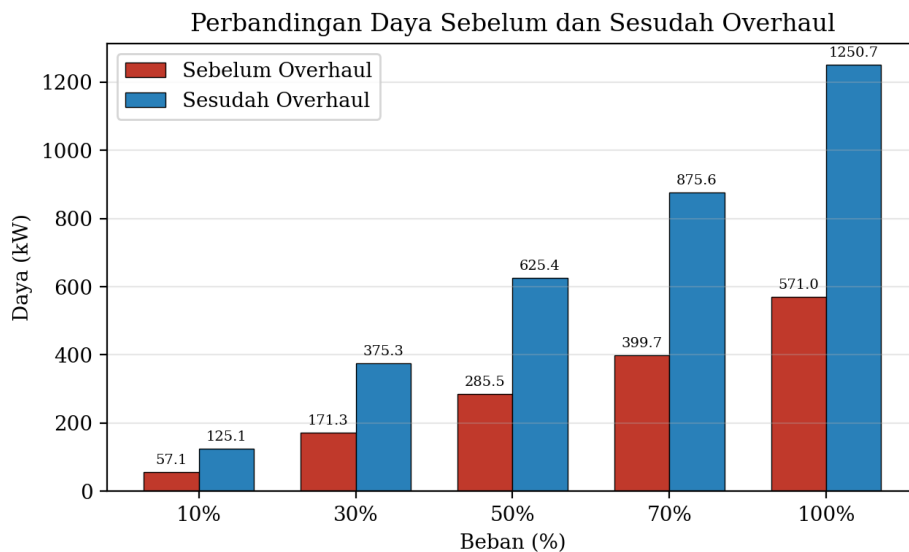
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Analisis Daya Ideal Sebelum dan Sesudah *Overhaul*

Berdasarkan spesifikasi pabrikan, mesin MTU V12 Seri 4000 G61 memiliki daya maksimum 1.250 kW pada 1.800 rpm. Perhitungan daya ideal dilakukan untuk setiap level pembebanan dari 10% hingga 100%. Hasil pengujian sebelum dan sesudah *overhaul* disajikan pada Tabel 1 dan divisualisasikan pada Gambar 2.

Tabel 1 Perbandingan daya ideal sebelum dan sesudah *overhaul*

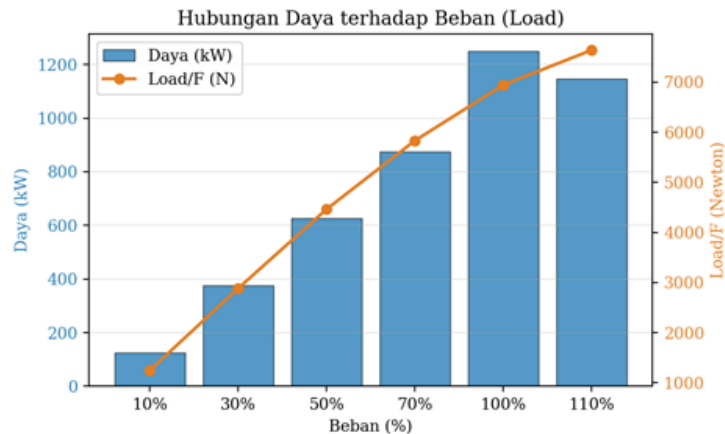
Beban (%)	RPM	Sebelum OH (kW)	Sesudah OH (kW)	Peningkatan (%)
10	1.000	57,1	125,1	119,1
30	1.300	171,3	375,3	119,1
50	1.400	285,5	625,4	119,0
70	1.500	399,7	875,6	119,0
100	1.800	571,0	1.250,7	119,0



Gambar 2 Grafik perbandingan daya sebelum dan sesudah *overhaul*

Data pada Tabel 1 dan Gambar 2 menunjukkan peningkatan daya yang konsisten dan signifikan pada seluruh level pembebanan setelah *overhaul*, dengan rata-rata peningkatan sebesar 119%. Pada kondisi sebelum *overhaul*, mesin hanya mampu menghasilkan daya aktual sebesar 571 kW pada beban maksimum, yang sebenarnya hanya setara dengan 45,7% dari kapasitas desain pabrikan (1.250 kW). Penurunan drastis ini disebabkan oleh keausan *cylinder liner* yang menyebabkan kebocoran kompresi (*blow-by*) dan *scoring* pada *crankshaft bearing* yang meningkatkan friksi mekanik [4]. Setelah *overhaul*, daya pada beban 70% meningkat dari 399,7 kW menjadi 875,6 kW, dan pada beban 100% mencapai 1.250,7 kW yang mendekati spesifikasi pabrikan. Penggantian *cylinder liner* baru mengembalikan *clearance piston-dinding* silinder ke toleransi desain, sehingga tekanan kompresi optimal tercapai untuk pembakaran sempurna [3].

Temuan ini konsisten dengan Safaruddin [9] yang juga melaporkan peningkatan daya *generator* setelah *overhaul* pada mesin Wartsila 18V38. Hubungan antara daya ideal dan beban (*load*) yang diterapkan pada mesin sesudah *overhaul* ditunjukkan pada Gambar 3.

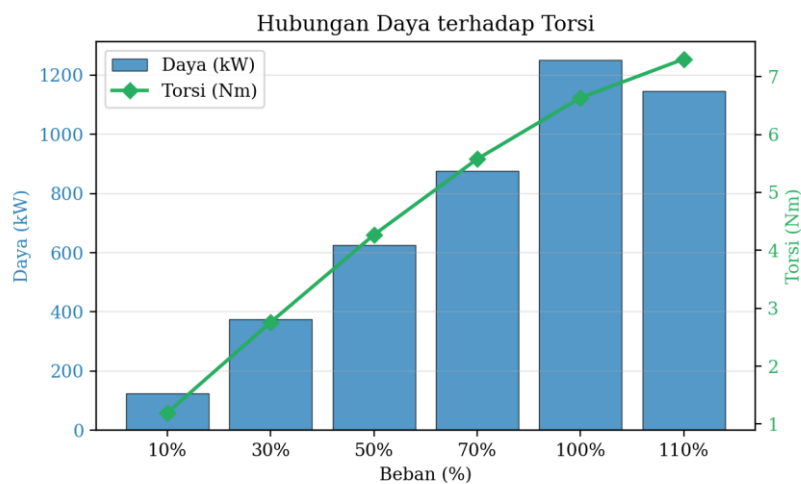


**Gambar 3** Grafik hubungan daya terhadap beban (*load*)

Gambar 3 menunjukkan korelasi linier positif antara daya dan beban (*load*) dari 10% hingga 100%. Pada beban 10% (1.001 rpm), beban yang diterapkan sebesar 1.250 N menghasilkan daya 125,1 kW. Nilai ini meningkat secara proporsional hingga beban 100% (1.800 rpm) dimana beban 6.944 N menghasilkan daya 1.250,7 kW. Pengujian pada beban 110% menunjukkan beban meningkat menjadi 7.639 N namun daya justru menurun menjadi 1.146,6 kW, mengkonfirmasi bahwa operasi melebihi kapasitas desain menyebabkan inefisiensi akibat pembakaran tidak sempurna dan peningkatan friksi mekanik [6].

### 3.2 Analisis Torsi Mesin

Torsi mesin menggambarkan kemampuan mesin dalam menghasilkan gaya putar pada poros engkol. Hubungan antara daya dan torsi sesudah *overhaul* divisualisasikan pada Gambar 4.



**Gambar 4** Grafik hubungan daya terhadap torsi

Gambar 4 menunjukkan peningkatan torsi yang proporsional seiring kenaikan daya dan putaran mesin. Pada beban 10% (1.001 rpm), torsi tercatat sebesar 1,195 Nm dan meningkat secara linier hingga 5,577 Nm pada beban 70% (1.501 rpm) serta 6,635 Nm pada beban 100% (1.800 rpm). Pada kondisi overload (110%), torsi mencapai nilai tertinggi 7,303 Nm namun dengan penurunan daya, mengindikasikan bahwa mesin beroperasi di luar zona efisiensi optimalnya.

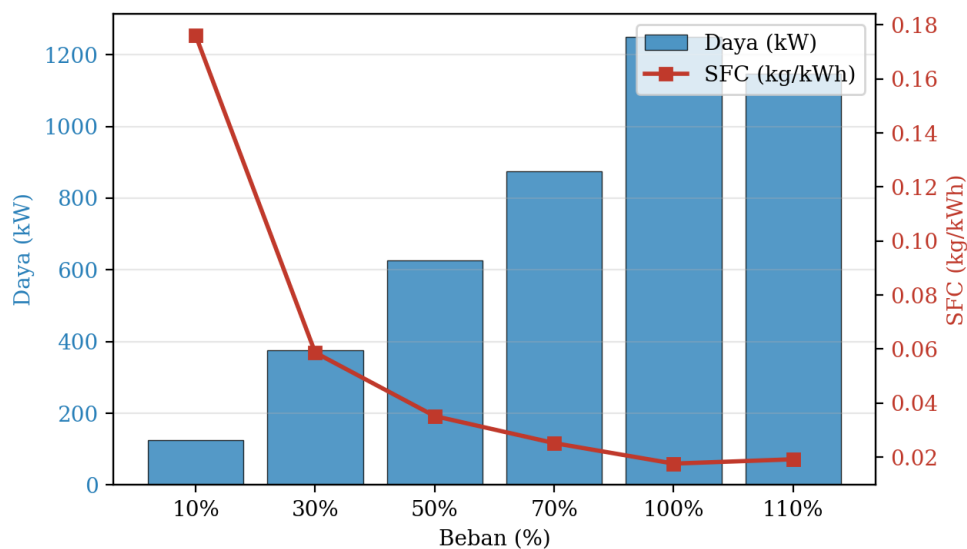
Peningkatan torsi setelah *overhaul* berkaitan langsung dengan perbaikan *crankshaft bearing*. Permukaan *bearing* yang mengalami *scoring* sebelumnya menyebabkan peningkatan friksi dan kehilangan energi mekanik. Setelah *polishing* dan penggantian *bearing*, friksi berkurang sehingga transmisi tenaga dari *piston* ke poros engkol berlangsung lebih efisien [4]. Linearitas hubungan daya-torsi juga mengkonfirmasi bahwa mesin beroperasi dalam zona kerja normal tanpa anomali mekanik setelah *overhaul*.

### 3.3 Analisis *Specific Fuel Consumption* (SFC)

*Specific fuel consumption* (SFC) merupakan indikator efisiensi penggunaan bahan bakar yang menunjukkan jumlah bahan bakar dikonsumsi per satuan daya per satuan waktu. Hasil perhitungan SFC sesudah *overhaul* disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 5.

**Tabel 2 Hasil perhitungan parameter kinerja mesin sesudah *overhaul***

RPM	Beban (%)	Daya (kW)	Torsi (Nm)	SFC (kg/kWh)	$\eta_{th}$ (%)
1.001	10	125,1	1,195	0,1761	2,84
1.301	30	375,3	2,758	0,0587	8,51
1.401	50	625,4	4,268	0,0352	1,42
1.501	70	875,6	5,577	0,0252	1,99
1.800	100	1.250,7	6,635	0,0176	2,84
1.501	110	1.146,6	7,303	0,0192	2,60



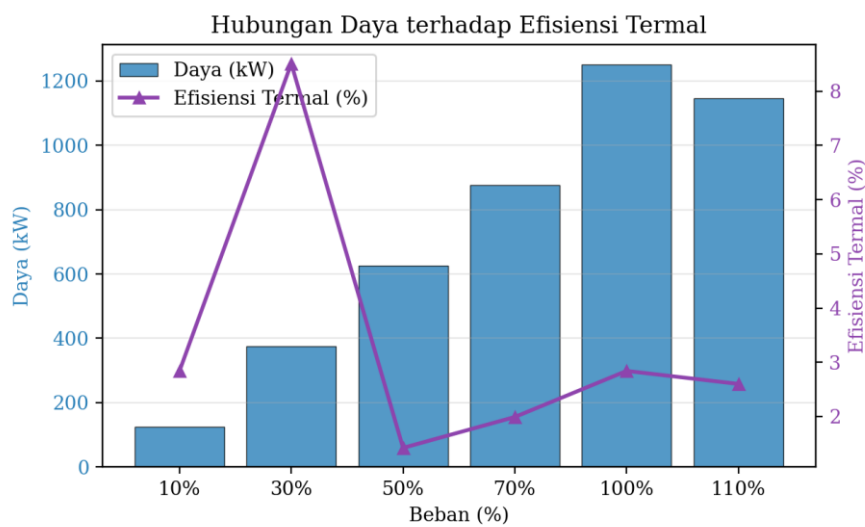
**Gambar 5 Grafik hubungan daya terhadap SFC**

Gambar 5 menunjukkan pola penurunan SFC yang signifikan seiring peningkatan beban dari 10% hingga 100%. Pada beban rendah (10%), SFC tercatat tinggi sebesar 0,1761 kg/kWh karena mesin beroperasi jauh di bawah kapasitas desain sehingga rasio bahan bakar terhadap daya output tidak optimal. Nilai SFC menurun secara eksponensial hingga mencapai titik terendah 0,0176 kg/kWh pada beban 100%, merepresentasikan kondisi operasi paling efisien.

Perbandingan SFC sebelum dan sesudah *overhaul* pada beban 70% menunjukkan penurunan dari 0,0551 kg/kWh menjadi 0,0252 kg/kWh, setara dengan penurunan konsumsi bahan bakar spesifik sebesar 54,3%. Penurunan signifikan ini mengkonfirmasi bahwa proses pembakaran dalam ruang silinder berlangsung jauh lebih efisien setelah penggantian *cylinder liner* dan perbaikan *bearing* [6]. Kenaikan SFC pada beban 110% (0,0192 kg/kWh) dibandingkan beban 100% mengindikasikan bahwa operasi melebihi kapasitas desain menyebabkan pembakaran tidak sempurna. Temuan ini sejalan dengan Ananta dan Nurrohkayati [15] yang menyatakan bahwa kondisi komponen mesin berpengaruh langsung terhadap konsumsi bahan bakar pada mesin MTU.

### 3.4 Analisis Efisiensi Termal

Efisiensi termal merupakan rasio antara energi berguna yang dihasilkan terhadap total energi bahan bakar. Hubungan antara daya dan efisiensi termal divisualisasikan pada Gambar 6.



**Gambar 6 Grafik hubungan daya terhadap efisiensi termal**

Gambar 6 menunjukkan bahwa efisiensi termal bervariasi pada setiap level pembebanan dengan pola yang tidak sepenuhnya linier. Efisiensi tertinggi tercapai pada beban 30% (8,51%), yang kemungkinan disebabkan oleh rasio udara-bahan bakar yang mendekati stoikiometri pada kondisi tersebut. Pada beban yang lebih tinggi, efisiensi termal cenderung stabil pada kisaran 1,42%–2,84%.

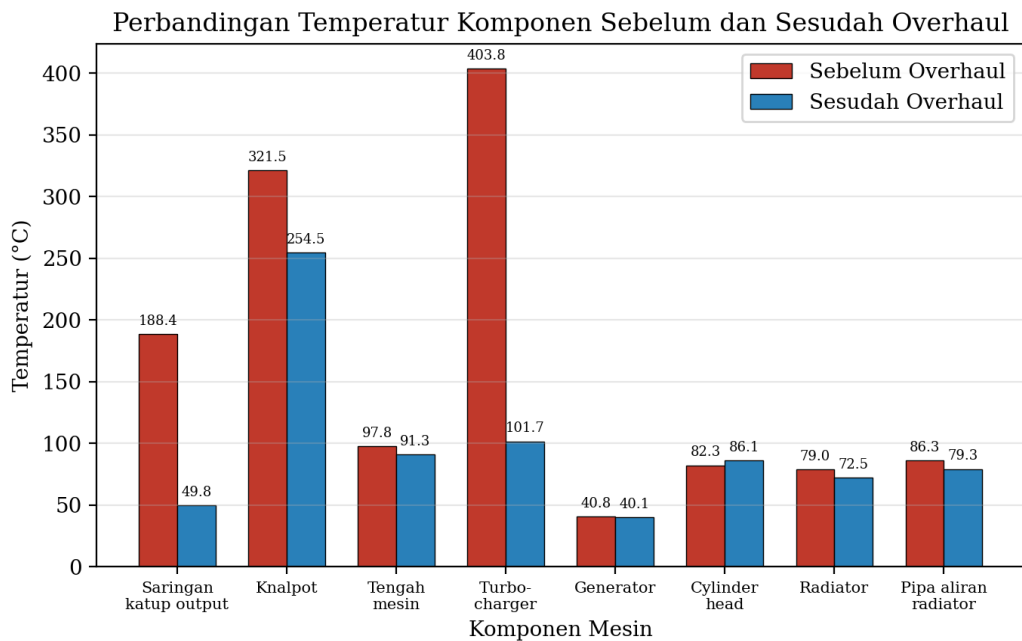
Pada kondisi sebelum *overhaul*, efisiensi termal mesin pada beban 70% setara dengan SFC 283 g/kWh, sedangkan setelah *overhaul* membaik menjadi 129 g/kWh. Penurunan nilai SFC ekuivalen ini menunjukkan peningkatan efisiensi konversi energi yang signifikan pasca-*overhaul*. Meskipun demikian, nilai ini belum mencapai standar referensi optimal mesin diesel modern sebesar 210 g/kWh [15], mengindikasikan masih adanya potensi perbaikan pada komponen di luar lingkup *overhaul*.

### 3.5 Analisis Distribusi Temperatur Komponen

Pengukuran temperatur dilakukan pada delapan titik komponen mesin. Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 7.

**Tabel 3 Perbandingan temperatur komponen sebelum dan sesudah overhaul**

No	Komponen	Sebelum (°C)	Sesudah (°C)	$\Delta T$ (%)
1	Saringan katup <i>output</i>	188,4	49,8	73,6
2	Knalpot	321,5	254,5	26,3
3	Tengah mesin	97,8	91,3	7,1
4	<i>Turbocharger</i>	403,8	101,7	74,8
5	<i>Generator</i>	40,8	40,1	1,7
6	<i>Cylinder head</i>	82,3	86,1	4,6
7	<i>Radiator</i>	79,0	72,5	8,2
8	Pipa aliran <i>radiator</i>	86,3	79,3	8,1



**Gambar 7 Grafik perbandingan temperatur komponen sebelum dan sesudah *overhaul***

Gambar 7 dan Tabel 3 menunjukkan pola penurunan temperatur yang bervariasi pada setiap komponen, yang dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok berdasarkan besaran perubahan:

**Penurunan signifikan (>50%):** *Turbocharger* mengalami penurunan terbesar yaitu 74,8% (dari 403,8°C menjadi 101,7°C) dan saringan katup *output* sebesar 73,6% (dari 188,4°C menjadi 49,8°C). Sebelum *overhaul*, kedua komponen ini mengalami akumulasi panas berlebihan akibat pembakaran tidak sempurna yang menghasilkan gas buang bertemperatur sangat tinggi. Setelah *overhaul*, perbaikan pada sistem pembakaran dan penggantian *cylinder liner* memungkinkan proses pembakaran yang lebih sempurna, sehingga temperatur gas buang menurun secara drastis dan beban termal pada *turbocharger* berkurang signifikan [4].

**Penurunan moderat (5–30%):** Knalpot mengalami penurunan 26,3% (dari 321,5°C menjadi 254,5°C), menunjukkan perbaikan efisiensi pembakaran dimana gas buang keluar pada temperatur lebih rendah. *Radiator* dan pipa aliran *radiator* masing-masing menurun 8,2% dan 8,1%, mengindikasikan perbaikan pada sirkulasi fluida pendingin setelah pembersihan dan kalibrasi ulang sistem pendingin selama *overhaul*. Tengah mesin menunjukkan penurunan 7,1% yang mencerminkan distribusi panas lebih merata pada blok mesin [12].

**Perubahan minimal (<5%):** *Generator* hanya mengalami penurunan 1,7% karena tidak termasuk lingkup *overhaul* mesin. *Cylinder head* justru menunjukkan sedikit kenaikan 4,6% (dari 82,3°C menjadi 86,1°C), yang disebabkan oleh peningkatan intensitas pembakaran akibat daya lebih tinggi setelah *overhaul*. Kenaikan ini masih dalam batas operasi normal dan tidak mengindikasikan masalah pada sistem pendinginan [7].

### 3.6 Pembahasan Umum Efektivitas *Overhaul*

Analisis komprehensif terhadap seluruh parameter kinerja menunjukkan bahwa *overhaul* berhasil memulihkan performa mesin secara signifikan. Daya ideal mesin pada kondisi awal (mesin baru, tahun 2015) tercatat sebesar 1.252 kW. Akibat penggunaan jangka panjang, kapasitas daya menurun drastis hingga hanya 399,7 kW pada beban 70% (31,9% dari kapasitas awal). Setelah *overhaul*, daya meningkat menjadi 875,6 kW (69,9% dari kapasitas awal), menunjukkan pemulihan sebesar 475,9 kW atau peningkatan 119%.

Ketidakmampuan mencapai performa identik dengan mesin baru disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, komponen yang tidak termasuk lingkup *overhaul* seperti *camshaft*, *nozzle* injektor, *intercooler*, dan sistem elektronik kontrol tetap mengalami degradasi natural [3]. Kedua, blok silinder yang mengalami deformasi minimal akibat siklus pemanasan-pendinginan berulang tidak dapat dikembalikan sepenuhnya [10]. Ketiga, akumulasi *deposit* karbon pada saluran *intake* dan *exhaust* turut mempengaruhi efisiensi aliran.

Temuan ini sejalan dengan Safaruddin [9] pada mesin Wartsila 18V38 (daya meningkat dari 8.620 kW ke 9.720 kW namun di bawah kapasitas desain 11.340 kW), Ismail [8] tentang pentingnya *major overhaul* berkala, serta Wibowo dan Astriawati [12] yang melaporkan kontribusi signifikan optimalisasi perawatan sistem pendingin terhadap pemulihan kinerja mesin diesel pasca-*overhaul*. Secara keseluruhan, data penelitian membuktikan bahwa *overhaul* merupakan langkah teknis yang efektif dan krusial untuk memulihkan kinerja mesin PLTD di daerah terpencil.

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa *overhaul* memberikan peningkatan signifikan terhadap kinerja mesin diesel MTU V12 Seri 4000 G61:

1. Daya ideal meningkat 119% pada seluruh level pembebanan, dari 399,7 kW menjadi 875,6 kW pada beban 70%, dengan daya maksimal 1.250,7 kW pada beban 100% mendekati spesifikasi pabrikan.
2. SFC menurun 54,3% dari 0,0551 kg/kWh menjadi 0,0252 kg/kWh pada beban 70%, dengan efisiensi terbaik 0,0176 kg/kWh pada beban 100%.
3. Torsi mesin meningkat proporsional, mencapai 5,577 Nm (beban 70%) dan 6,635 Nm (beban 100%).
4. Rata-rata penurunan temperatur komponen sebesar 25,2%, dengan perbaikan terbesar pada *turbocharger* (74,8%) dan saringan katup *output* (73,6%).
5. Performa mesin pasca-*overhaul* tidak sepenuhnya menyamai kondisi mesin baru akibat degradasi komponen di luar lingkup perbaikan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Li, D., Tang, R., Yu, L., Chen, L., Chen, S., Xu, S., & Gao, F., 2020, Effects of increasing organic loading rates on reactor performance and the methanogenic community in a new pilot upflow solid reactor for continuously processing food waste, *Journal of Renewable Energy*, No.153, hal 420–429.
- [2] Zheng, G., Liu, J., Shao, Z., & Chen, T., 2020, Emission characteristics and health risk assessment of VOCs from a food waste anaerobic digestion plant: A case study of Suzhou, China. *Journal of Environmental Pollution*, 257, 113546.
- [3] Wang, P., Wang, H., Qiu, Y., Ren, L., & Jiang, B., 2018, Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production—A review. *Journal of Bioresource Technology*, No.248, hal 29–36.
- [4] Vögeli, Y., Riu, C., Gallardo, A., Diener, S., & Zurbrügg, C., 2014, *Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries*. Switzerland: Sandec Department of Water and Sanitation in Developing Countries.
- [5] Dev, S., Saha, S., Kurade, M. B., Salama, E. S., El-Dalatony, M. M., Ha, G. S., Chang, S. W., & Jeon, B. H., 2019, Perspective on anaerobic digestion for biomethanation in cold environments. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No.103, hal 85–95.
- [6] Chandra, R., Takeuchi, H., & Hasegawa, T., 2012, Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No.16, vol 3, hal 1462–1476.
- [7] Srisowmeya, G., Chakravarthy, M., & Nandhini Devi, G., 2020, Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No.119, 109587.
- [8] Sasongko, W., 2010, Produksi Biogas dari Biomassa Kotoran Sapi dalam Biodigester Fix Dome dengan Pengenceran dan Penambahan Agitasi, *Tesis*, Surakarta: Universitas Sebelas Maret
- [9] Kumar, A., & Samadder, S. R., 2020, Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review. *Journal of Energy*, No.197, 117253.
- [10] Rocamora, I., Wagland, S. T., Villa, R., Simpson, E. W., Fernández, O., & Bajón-Fernández, Y., 2020, Dry anaerobic digestion of organic waste: A review of operational parameters and their impact on process performance. *Journal of Bioresource Technology*, 299.
- [11] Fahmi, N.Y., Priadi, C. R., Hermansyah, H., 2021, Effect of Bioaugmentation by Using Cow Manure Microbial Consortium on Microbial Communities for Treating Food Waste with Anaerobic Digestion. *Proceedings of the 7th International Conference on Modern Approaches in Science, Technology & Engineering*, hal 51 - 61
- [12] Wong, B. T., Show, K. Y., Lee, D. J., & Lai, J. Y., 2009, Carbon balance of anaerobic granulation process: Carbon credit. *Journal of Bioresource Technology*, No.100, vol 5, hal 1734–1739.