

Evaluasi Efisiensi Turbin Gas PLTGU Muara Tawar Pasca-Overhaul

Eri Prabowo¹, Trassanda Scudetto Widestomo Putra², Rahardianto Ramadhan³
Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Perusahaan Listrik Negara, Jakarta, Indonesia
Email: eriprabowo@itpln.ac.id, Trassanda2410505@ITPLN.AC.ID, rahardianto1@gmail.com

Abstract

Gas turbine performance in a combined-cycle power plant is strongly affected by compressor condition, combustion stability, turbine expansion efficiency, and fuel consumption. This study evaluates the effect of minor-inspection overhaul on the gas turbine efficiency of Block 4 Unit 1 at PLTGU Muara Tawar using performance-test data at 137 MW before and after overhaul. The method applies Brayton-cycle calculations by processing inlet and outlet temperature, pressure ratio, air and fuel mass flow, compressor work, turbine work, heat input, back work ratio, heat rate, and component efficiency. The results show that overhaul improved the main performance indicators. Thermal efficiency increased from 32.85% to 32.93%, compressor efficiency from 90.96% to 91.58%, combustion chamber efficiency from 96.94% to 97.08%, and turbine efficiency from 90.42% to 90.48%. Heat rate decreased from 10,957.89 kJ/kWh to 10,930.15 kJ/kWh. The improvement was associated with air-intake filter restoration, compressor inlet guide vane cleaning and recoating, combustion chamber repair, burner maintenance, and turbine blade replacement. Therefore, minor inspection contributed to restoring gas turbine performance, although periodic monitoring of heat rate, compressor fouling, exhaust temperature, and fuel-air ratio is still required.

Keywords: gas turbine; overhaul; thermal efficiency; Brayton cycle; heat rate

Abstrak

Kinerja turbin gas pada PLTGU dipengaruhi oleh kondisi kompresor, kestabilan pembakaran, efisiensi ekspansi turbin, dan konsumsi bahan bakar. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh overhaul minor inspection terhadap efisiensi turbin gas Blok 4 Unit 1 PLTGU Muara Tawar menggunakan data performance test pada beban 137 MW sebelum dan sesudah overhaul. Metode yang digunakan adalah perhitungan siklus Brayton dengan mengolah temperatur dan tekanan masuk-keluar, rasio tekanan, laju aliran udara dan bahan bakar, kerja kompresor, kerja turbin, kalor masuk, back work ratio, heat rate, serta efisiensi komponen. Hasil menunjukkan bahwa overhaul meningkatkan indikator performa utama. Efisiensi termal meningkat dari 32,85% menjadi 32,93%, efisiensi kompresor dari 90,96% menjadi 91,58%, efisiensi ruang bakar dari 96,94% menjadi 97,08%, dan efisiensi turbin dari 90,42% menjadi 90,48%. Heat rate menurun dari 10.957,89 kJ/kWh menjadi 10.930,15 kJ/kWh. Peningkatan ini berkaitan dengan pemulihan filter air intake, pembersihan dan recoating inlet guide vane, perbaikan combustion chamber, perbaikan burner, dan penggantian turbine blade. Dengan demikian, minor inspection berkontribusi terhadap pemulihan performa turbin gas, meskipun pemantauan heat rate, fouling kompresor, temperatur gas buang, dan rasio udara-bahan bakar tetap perlu dilakukan secara berkala.

Kata kunci: turbin gas; overhaul; efisiensi termal; siklus Brayton; heat rate

1. Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) memanfaatkan turbin gas sebagai salah satu komponen utama untuk mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik dan kemudian menjadi energi listrik melalui generator. Pada sistem turbin gas, udara dikompresi, dicampur dengan bahan bakar di ruang bakar, kemudian gas panas hasil pembakaran diekspansikan melalui sudu turbin sesuai prinsip siklus Brayton [1-6]. Karena proses ini berlangsung pada temperatur tinggi dan beban operasi yang berulang, performa turbin gas dapat menurun akibat fouling kompresor, degradasi ruang bakar, erosi sudu, perubahan karakteristik aliran, dan kenaikan konsumsi bahan bakar [6-8,12,18]. Efisiensi turbin gas menjadi parameter penting karena mempengaruhi daya keluaran, konsumsi bahan bakar, heat rate, dan keandalan operasi pembangkit [7,8,13,14]. Pada beban yang sama, efisiensi yang lebih rendah akan meningkatkan heat rate sehingga energi bahan bakar yang dibutuhkan per satuan listrik menjadi lebih besar. Oleh karena itu, kegiatan pemeliharaan seperti minor inspection dan overhaul diperlukan untuk menjaga kondisi kompresor, ruang bakar, turbin, sistem bahan bakar, sistem pelumasan, serta sistem udara masuk tetap berada pada batas operasi yang aman [10,15-18].

Skripsi sumber membahas pengaruh overhaul terhadap efisiensi turbin gas Blok 4 Unit 1 PLTGU PT PJB UP Muara Tawar. Data utama berasal dari performance test sebelum minor inspection pada 18 Juni 2019 dan

sesudah minor inspection pada 29 Oktober 2019, keduanya pada beban 137 MW [9-11]. Parameter yang dievaluasi meliputi efisiensi kompresor, efisiensi ruang bakar, efisiensi turbin, efisiensi termal, back work ratio, kalor masuk, kerja netto, dan heat rate sebagai indikator performa siklus turbin gas [12-16].

Artikel ini menyajikan ulang hasil tersebut dalam format Jurnal Teknik Mesin (JTM). Judul dibuat berbeda dari judul skripsi, bagian metode diringkas dengan persamaan bernomor, dan pembahasan difokuskan pada keterkaitan multiparameter antara overhaul, perubahan efisiensi komponen, heat rate, serta implikasi pemeliharaan. Tujuan artikel adalah mengevaluasi seberapa besar pengaruh minor inspection terhadap pemulihan performa turbin gas dan menentukan indikator yang perlu dipantau setelah overhaul berdasarkan pendekatan performa dan degradasi turbin gas [13-19].

2. Metode Penelitian

2.1. Data dan Objek Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif berdasarkan data performance test turbin gas Siemens AG V94.2 Unit Simple Cycle pada PLTGU Muara Tawar. Objek yang dianalisis adalah turbin gas Blok 4 Unit 1. Data sebelum overhaul diambil pada 18 Juni 2019 dan data sesudah overhaul diambil pada 29 Oktober 2019. Kondisi pembanding menggunakan beban 137 MW agar pengaruh pemeliharaan dapat dinilai pada operasi yang relatif sebanding.

Tabel 1. Data input performance test turbin gas pada beban 137 MW

Parameter	Satuan	Sebelum	Sesudah
Temperatur udara masuk kompresor, T1	°C / K	32,51 / 305,66	33,86 / 307,01
Tekanan udara atmosfer, p1	bar	1,01	1,01
Tekanan udara keluar kompresor, p2	bar	10,93	11,02
Temperatur udara keluar kompresor, T2	°C / K	357,61 / 630,76	361,50 / 634,65
Temperatur gas buang, T4	°C / K	583,54 / 856,69	577,99 / 851,14
Daya output generator, Wg	MW	136,06	139,04
Laju kapasitas bahan bakar	kNm ³ /jam	40,14	40,93
Specific gravity bahan bakar	-	0,58	0,58
Panas spesifik udara	kJ/kg.K	1,01	1,01
Nilai kalor bahan bakar, LHV	kJ/kg	51.035	50.035

2.2. Parameter Perhitungan

Perhitungan dilakukan menggunakan pendekatan siklus Brayton. Tahapan dimulai dari rasio tekanan, penentuan temperatur dan entalpi pada titik masuk-keluar kompresor serta turbin, perhitungan kerja kompresor dan turbin, kalor masuk, kerja netto, back work ratio, heat rate, dan efisiensi komponen. Persamaan ditulis dalam bentuk ringkas agar mudah dirujuk dalam pembahasan.

$$r_p = p_2 / p_1 \quad (1)$$

$$W_c = m a (h_2 - h_1) \quad (2)$$

$$Q_{in} = m f \times LHV \quad (3)$$

$$W_t = (m a + m f)(h_3 - h_4) \quad (4)$$

$$W_{net} = W_t - W_c \quad (5)$$

$$BWR = W_c / W_t \quad (6)$$

$$HRGT = Q_{in} / W_{net} \quad (7)$$

$$\eta_c = [(h_2' - h_1) / (h_2 - h_1)] \times 100\% \quad (8)$$

$$\eta_t = [(h_3 - h_4) / (h_3 - h_4')] \times 100\% \quad (9)$$

$$\eta_{th} = (W_{net} / Q_{in}) \times 100\% \quad (10)$$

dengan r_p adalah rasio tekanan, W_c adalah kerja kompresor (kJ/s), W_t adalah kerja turbin (kJ/s), W_{net} adalah kerja netto (kJ/s), Q_{in} adalah kalor masuk (kJ/s), $m f$ adalah laju aliran bahan bakar (kg/s), $m a$ adalah laju aliran udara (kg/s), h adalah entalpi (kJ/kg), BWR adalah back work ratio, HRGT adalah heat rate turbin gas (kJ/kWh), η_c adalah efisiensi kompresor, η_t adalah efisiensi turbin, dan η_{th} adalah efisiensi termal.

2.3. Lingkup Minor Inspection

Kegiatan minor inspection yang digunakan sebagai dasar evaluasi mencakup inspeksi visual sistem turbin gas, pemeriksaan kebocoran pada bearing, oil lines, dan flanges, inspeksi isolasi, pengecekan sistem fuel oil dan fuel gas, serta pemeriksaan sistem pelumasan dan hidrolik. Pada area utama, kegiatan pemeliharaan meliputi penggantian material refraktori pada combustion chamber, pembersihan combustor basket, perbaikan burner fuel oil, pembersihan dan recoating compressor inlet guide vane, perbaikan filter air intake, serta penggantian turbine blade. Tindakan ini relevan terhadap peningkatan efisiensi karena menyasar sumber kerugian pada udara masuk, pembakaran, dan ekspansi gas panas.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Perbandingan Hasil Perhitungan

Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa minor inspection memberikan perbaikan pada hampir seluruh indikator kinerja. Kerja aktual kompresor meningkat dari 93.546,51 kJ/s menjadi 97.193,11 kJ/s, sedangkan kerja aktual turbin meningkat dari 230.968,23 kJ/s menjadi 237.600,41 kJ/s. Kenaikan kerja turbin yang lebih besar daripada kenaikan kerja kompresor membuat kerja netto meningkat dari 137.421,7 kJ/s menjadi 140.407,3 kJ/s.

Tabel 2. Ringkasan kinerja turbin gas sebelum dan sesudah minor inspection

Parameter	Satuan	Sebelum	Sesudah	Perubahan
Laju aliran bahan bakar, mf	kg/s	8,36	8,52	+0,16
Kalor masuk turbin, Q_{in}	kJ/s	418.292,6	426.398,2	+8.105,6
Laju aliran udara, ma	kg/s	280,39	288,99	+8,60
Laju aliran gas pembakaran, mg	kg/s	288,75	297,51	+8,76
Kerja aktual kompresor, W_c	kJ/s	93.546,51	97.193,11	+3.646,60
Kerja aktual turbin, W_t	kJ/s	230.968,23	237.600,41	+6.632,18
Kerja netto aktual, W_{net}	kJ/s	137.421,7	140.407,3	+2.985,6
Back work ratio	-	0,4050	0,4090	+0,0040
Heat rate	kJ/kWh	10.957,89	10.930,15	-27,74
Efisiensi kompresor	%	90,96	91,58	+0,62
Efisiensi ruang bakar	%	96,94	97,08	+0,14
Efisiensi turbin	%	90,42	90,48	+0,06
Efisiensi termal	%	32,85	32,93	+0,08

3.2. Efisiensi Termal dan Heat Rate

Efisiensi termal meningkat dari 32,85% menjadi 32,93%. Kenaikan ini terlihat kecil secara persentase, namun tetap penting karena turbin gas merupakan peralatan yang bekerja terus-menerus dan konsumsi bahan bakarnya besar. Pada sistem pembangkit, perubahan efisiensi termal sebesar 0,08 poin dapat menunjukkan perbaikan kondisi komponen setelah pemeliharaan, terutama ketika kenaikan tersebut diikuti penurunan heat rate. Heat rate menurun dari 10.957,89 kJ/kWh menjadi 10.930,15 kJ/kWh. Penurunan heat rate menunjukkan bahwa energi bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan setiap satuan energi listrik menjadi lebih rendah. Meskipun kalor masuk meningkat karena laju bahan bakar naik dari 8,36 kg/s menjadi 8,52 kg/s, kerja netto juga meningkat sehingga rasio pemanfaatan energi menjadi lebih baik. Dengan kata lain, setelah minor inspection, turbin gas menghasilkan kerja bersih yang lebih tinggi pada kondisi operasi 137 MW.

3.3. Efisiensi Kompresor

Efisiensi kompresor naik dari 90,96% menjadi 91,58%. Kenaikan 0,62 poin merupakan peningkatan paling besar dibanding efisiensi ruang bakar dan efisiensi turbin. Perbaikan ini berkaitan dengan kegiatan pemeliharaan pada air intake dan compressor inlet guide vane, yaitu perbaikan filter yang terlepas, penggantian filter yang rusak, pembersihan filter kotor, pembersihan IGV, recoating blade, dan penyesuaian jarak ujung blade. Kompresor yang lebih bersih dan aliran udara masuk yang lebih stabil akan mengurangi rugi-rugi aerodinamik serta mendukung kenaikan laju aliran udara dari 280,39 kg/s menjadi 288,99 kg/s. Pada turbin gas, kompresor mengonsumsi sebagian besar kerja turbin. Oleh karena itu, perbaikan kecil pada efisiensi kompresor dapat berdampak langsung terhadap efisiensi termal. Nilai back work ratio memang sedikit naik dari 0,4050 menjadi 0,4090 karena kerja kompresor meningkat. Namun peningkatan kerja turbin lebih besar,

sehingga kerja netto tetap naik. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemulihan sisi udara masuk tidak hanya menambah beban kompresi, tetapi juga memperbaiki suplai massa udara untuk proses pembakaran dan ekspansi.

3.4. Efisiensi Ruang Bakar dan Turbin

Efisiensi ruang bakar meningkat dari 96,94% menjadi 97,08%. Peningkatan 0,14 poin mengindikasikan proses pembakaran menjadi lebih efektif setelah minor inspection. Kegiatan yang berkontribusi adalah penggantian material refraktori pada dinding ruang bakar, pembersihan combustor basket, perbaikan perubahan warna atau kerusakan pada ruang bakar, serta perbaikan burner fuel oil. Perbaikan ini membantu menjaga distribusi panas, kestabilan nyala, dan aliran gas hasil pembakaran menuju turbin.

Efisiensi turbin meningkat dari 90,42% menjadi 90,48%. Kenaikan 0,06 poin relatif kecil, tetapi tetap konsisten dengan kecenderungan perbaikan performa setelah overhaul. Penggantian turbine blade merupakan tindakan yang berhubungan langsung dengan pemulihan geometri sudu dan pengurangan rugi-rugi ekspansi. Temperatur gas buang turun dari 583,54 °C menjadi 577,99 °C, sedangkan kerja aktual turbin meningkat. Kombinasi ini menunjukkan bahwa energi gas panas dapat dimanfaatkan lebih efektif untuk menghasilkan kerja mekanik.

Tabel 3. Interpretasi teknis perubahan parameter pasca-overhaul

Indikator	Perubahan	Makna teknis
Efisiensi kompresor	Naik 0,62 poin	Fouling dan hambatan sisi udara masuk berkurang setelah filter, IGV, dan blade dibersihkan atau diperbaiki.
Efisiensi ruang bakar	Naik 0,14 poin	Pembakaran lebih stabil setelah burner dan combustion chamber diperbaiki.
Efisiensi turbin	Naik 0,06 poin	Ekspansi gas panas lebih baik setelah perbaikan/penggantian turbine blade.
Efisiensi termal	Naik 0,08 poin	Kerja netto meningkat lebih kuat dibanding kebutuhan kalor masuk.
Heat rate	Turun 27,74 kJ/kWh	Energi bahan bakar per satuan listrik menurun sehingga performa unit membaik.

3.5. Hubungan Overhaul dengan Keandalan Operasi

Dari sudut pandang pemeliharaan, hasil ini menunjukkan bahwa minor inspection tidak hanya menghasilkan perubahan angka efisiensi, tetapi juga memulihkan kondisi fisik komponen yang berpengaruh pada performa. Air intake yang kotor atau filter yang rusak dapat mengganggu kualitas udara masuk. IGV yang kotor atau tidak sesuai celahnya dapat menurunkan kualitas aliran menuju kompresor. Combustion chamber dan burner yang mengalami degradasi dapat menyebabkan pembakaran tidak seragam. Sementara itu, turbine blade yang rusak dapat meningkatkan kerugian ekspansi dan mengurangi kerja turbin. Peningkatan kerja aktual turbin dari 230.968,23 kJ/s menjadi 237.600,41 kJ/s menjadi indikator bahwa komponen setelah minor inspection mampu mengubah energi gas panas menjadi kerja mekanik secara lebih efektif. Namun, kerja kompresor juga meningkat dari 93.546,51 kJ/s menjadi 97.193,11 kJ/s. Oleh karena itu, pembacaan performa tidak boleh hanya menggunakan satu parameter. Penilaian harus menggabungkan kerja kompresor, kerja turbin, kerja netto, heat rate, dan efisiensi termal agar keputusan pemeliharaan lebih objektif.

Pada kondisi pasca-overhaul, efisiensi termal sebesar 32,93% dan heat rate sebesar 10.930,15 kJ/kWh dapat dijadikan baseline awal untuk pemantauan berikutnya. Jika setelah beberapa periode operasi heat rate kembali meningkat atau efisiensi kompresor menurun, indikasi awal dapat diarahkan pada fouling air intake, penurunan kualitas filter, perubahan bukaan IGV, atau degradasi sudu. Bila efisiensi ruang bakar menurun, pemeriksaan burner, kualitas bahan bakar, flame stability, dan kondisi refraktori perlu diprioritaskan.

3.6. Rekomendasi Pemantauan Pasca-Overhaul

Tabel 4. Rekomendasi pemantauan turbin gas setelah minor inspection

Parameter	Tujuan pemantauan	Indikasi gangguan	Tindakan awal
Heat rate	Menilai konsumsi energi bahan bakar per kWh	Nilai naik pada beban sebanding	Cek kompresor, pembakaran, dan output generator
Efisiensi kompresor	Mendeteksi fouling dan rugi aliran udara	Efisiensi turun, tekanan kompresor berubah	Cek filter, IGV, dan washing kompresor
Temperatur gas buang	Melihat efektivitas ekspansi dan pembakaran	Temperatur naik/tidak seragam	Cek burner, combustor, dan turbine blade
Air fuel ratio	Menilai kesesuaian udara-bahan bakar	AFR berubah tanpa perubahan beban	Cek sistem bahan bakar dan sensor aliran
Vibrasi dan suara	Mendeteksi potensi kerusakan mekanik	Vibrasi naik atau suara abnormal	Pemeriksaan bearing, alignment, dan sudu

Rekomendasi pemantauan pada Tabel 4 perlu diterapkan secara berkala karena minor inspection hanya memulihkan kondisi pada satu periode pemeliharaan. Kinerja turbin gas tetap dapat menurun kembali akibat fouling, degradasi material, perubahan kualitas bahan bakar, dan kondisi lingkungan. Pemantauan harus dilakukan pada kondisi beban yang sebanding agar pembacaan efisiensi dan heat rate tidak bias akibat variasi operasi. Secara praktis, data sebelum dan sesudah minor inspection dapat digunakan sebagai baseline pembandingan untuk menentukan batas kewaspadaan. Apabila heat rate meningkat melebihi tren normal, pemeliharaan tidak perlu menunggu jadwal overhaul berikutnya. Pemeriksaan lebih awal pada filter udara, IGV, burner, dan temperatur gas buang dapat mencegah penurunan performa yang lebih besar. Pendekatan ini mendukung perawatan berbasis kondisi dan membantu menjaga keandalan PLTGU.

3.7. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada jumlah titik data karena perbandingan dilakukan pada satu kondisi beban, yaitu 137 MW. Meskipun kondisi ini cukup untuk menunjukkan kecenderungan sebelum dan sesudah overhaul, kurva performa lengkap turbin gas memerlukan data pada beberapa tingkat beban. Selain itu, artikel ini menggunakan data performance test dan hasil perhitungan siklus Brayton, sehingga data lain seperti vibrasi, clearances, kondisi detail blade, emisi gas buang, dan kualitas bahan bakar tidak dibahas secara mendalam. Untuk penelitian lanjutan, evaluasi dapat diperluas dengan menghubungkan efisiensi komponen terhadap data vibrasi, temperatur bearing, exhaust temperature spread, NOx/CO, dan riwayat compressor washing. Data tersebut akan memperkuat diagnosis apakah penurunan efisiensi lebih dominan berasal dari fouling kompresor, penurunan kualitas pembakaran, atau kerusakan pada area hot gas path. Dengan demikian, keputusan pemeliharaan dapat dibuat lebih presisi.

3.8. Analisis Rasio Tekanan dan Laju Massa

Rasio tekanan kompresor meningkat dari 10,82 menjadi 10,91 setelah minor inspection. Kenaikan rasio tekanan menunjukkan bahwa sistem kompresi mampu menghasilkan tekanan keluar yang sedikit lebih tinggi pada tekanan atmosfer yang sama. Dalam siklus Brayton, rasio tekanan berpengaruh terhadap temperatur keluar kompresor, kerja kompresor, dan potensi kerja turbin. Kenaikan ini harus dibaca bersama laju aliran udara dan temperatur gas buang agar tidak menimbulkan interpretasi yang keliru. Laju aliran udara meningkat dari 280,39 kg/s menjadi 288,99 kg/s. Peningkatan ini berkaitan dengan pemulihan kondisi jalur udara masuk dan kompresor, terutama pada air intake dan inlet guide vane. Ketika jalur udara bersih dan sudu kompresor bekerja dengan profil yang lebih baik, massa udara yang masuk ke sistem dapat meningkat. Peningkatan laju udara membantu proses pembakaran karena campuran udara dan bahan bakar menjadi lebih memadai untuk menghasilkan gas panas yang dibutuhkan turbin.

Laju aliran bahan bakar juga meningkat dari 8,36 kg/s menjadi 8,52 kg/s. Peningkatan bahan bakar tidak langsung berarti pemborosan, karena indikator yang lebih menentukan adalah heat rate dan efisiensi termal.

Pada data ini, kalor masuk naik, tetapi kerja netto juga naik dan heat rate justru turun. Dengan demikian, tambahan bahan bakar pasca-overhaul menghasilkan peningkatan kerja yang lebih efektif dibanding kondisi sebelum overhaul.

Tabel 5. Perbandingan sifat utama siklus Brayton sebelum dan sesudah overhaul

Parameter	Sebelum	Sesudah	Interpretasi
Rasio tekanan, rp	10,82	10,91	Kemampuan kompresi sedikit membaik
T1	305,66 K	307,01 K	Udara masuk relatif sebanding
T2 aktual	630,76 K	634,65 K	Kompresi aktual meningkat
T3	1539,98 K	1533,87 K	Temperatur masuk turbin lebih terkendali
T4 aktual	856,69 K	851,14 K	Temperatur gas buang turun
h1	305,8 kJ/kg	307,23 kJ/kg	Kondisi udara masuk sedikit berubah
h2	639,43 kJ/kg	643,55 kJ/kg	Energi setelah kompresor meningkat
h3	1684,49 kJ/kg	1677,06 kJ/kg	Energi masuk turbin lebih terkendali
h4	884,59 kJ/kg	878,43 kJ/kg	Energi gas buang menurun

3.9. Evaluasi Heat Rate sebagai Indikator Utama

Heat rate merupakan indikator yang sangat praktis bagi pembangkit karena langsung menunjukkan jumlah energi bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan listrik. Nilai heat rate yang lebih rendah berarti unit menghasilkan listrik dengan konsumsi energi yang lebih kecil. Pada penelitian ini, heat rate turun dari 10.957,89 kJ/kWh menjadi 10.930,15 kJ/kWh. Penurunan 27,74 kJ/kWh pada beban 137 MW menunjukkan bahwa unit menjadi lebih efisien setelah minor inspection. Nilai heat rate juga membantu menghindari kesalahan interpretasi akibat naiknya laju bahan bakar. Setelah overhaul, laju bahan bakar naik 0,16 kg/s dan kalor masuk naik 8.105,6 kJ/s. Apabila hanya melihat konsumsi bahan bakar, kondisi pasca-overhaul dapat terlihat kurang baik. Namun, kerja netto naik 2.985,6 kJ/s dan efisiensi termal meningkat. Oleh karena itu, indikator heat rate lebih representatif karena mempertimbangkan hubungan antara energi masuk dan keluaran kerja.

Dari sudut pandang operasi, heat rate dapat dijadikan parameter pengawasan harian. Jika heat rate terus naik pada beban yang sama, kemungkinan terjadi penurunan performa pada kompresor, ruang bakar, turbin, atau sistem kontrol bahan bakar. Sebaliknya, heat rate yang stabil setelah minor inspection menunjukkan bahwa kondisi komponen relatif terjaga. Dengan demikian, data heat rate perlu dicatat bersama beban, temperatur ambien, tekanan atmosfer, dan kelembapan agar analisis performa lebih akurat.

3.10. Sintesis Pengaruh Minor Inspection terhadap Komponen

Pengaruh minor inspection terhadap performa tidak terjadi secara tunggal, tetapi melalui kombinasi beberapa komponen. Pemulihan air intake dan IGV meningkatkan kualitas aliran udara ke kompresor. Perbaikan ruang bakar dan burner membantu proses pembakaran menjadi lebih stabil. Penggantian turbine blade mendukung pemanfaatan energi gas panas pada proses ekspansi. Karena komponen-komponen ini berada dalam satu siklus, perubahan kecil pada satu bagian dapat mempengaruhi parameter lain. Kenaikan efisiensi kompresor sebesar 0,62 poin menjadi kontribusi paling kuat dalam hasil penelitian. Kompresor yang lebih efisien mengurangi rugi-rugi kompresi dan memperbaiki suplai udara. Sementara itu, kenaikan efisiensi ruang bakar sebesar 0,14 poin menunjukkan pembakaran yang lebih baik, meskipun peningkatannya tidak sebesar kompresor. Kenaikan efisiensi turbin 0,06 poin menunjukkan bahwa sisi ekspansi juga membaik, tetapi dampaknya lebih kecil dibanding pemulihan sisi kompresor.

Hasil ini memperlihatkan bahwa fokus pemeliharaan turbin gas tidak boleh hanya pada turbin sebagai komponen ekspansi. Kompresor dan ruang bakar sama pentingnya karena keduanya menentukan kualitas gas yang masuk ke turbin. Jika kompresor mengalami fouling, udara masuk berkurang dan kerja kompresor meningkat. Jika ruang bakar mengalami gangguan, temperatur masuk turbin dapat tidak stabil. Kedua kondisi tersebut pada akhirnya akan menurunkan efisiensi termal dan meningkatkan heat rate.

Tabel 6. Keterkaitan kegiatan minor inspection dengan parameter performa

Kegiatan pemeliharaan	Komponen terdampak	Parameter yang dipengaruhi
Pembersihan dan penggantian filter air intake	Sistem udara masuk	Laju aliran udara, efisiensi kompresor, heat rate
Pembersihan dan recoating inlet guide vane	Kompresor	Tekanan keluar kompresor, kerja kompresor, efisiensi kompresor
Perbaikan material refraktori	Combustion chamber	Temperatur pembakaran, efisiensi ruang bakar
Perbaikan burner fuel oil	Sistem bahan bakar dan ruang bakar	Stabilitas pembakaran, AFR, kalor masuk
Penggantian turbine blade	Turbin gas	Kerja turbin, temperatur gas buang, efisiensi turbin

3.11. Baseline Performa Pasca-Overhaul

Nilai pasca-overhaul dapat digunakan sebagai baseline awal. Baseline ini bukan angka mutlak, karena turbin gas sangat dipengaruhi temperatur ambien, tekanan atmosfer, kualitas bahan bakar, dan beban operasi. Namun, baseline tetap berguna sebagai acuan untuk memantau apakah performa unit kembali menurun setelah beberapa periode operasi. Pada data ini, baseline pasca-overhaul yang paling penting adalah efisiensi termal 32,93%, efisiensi kompresor 91,58%, efisiensi ruang bakar 97,08%, efisiensi turbin 90,48%, dan heat rate 10.930,15 kJ/kWh. Pemantauan baseline sebaiknya dilakukan pada beban yang sama atau dikoreksi terhadap kondisi ambien. Pembacaan heat rate pada beban berbeda tidak dapat langsung dibandingkan tanpa normalisasi. Demikian pula, temperatur udara masuk yang lebih tinggi dapat menurunkan densitas udara dan mempengaruhi laju massa udara yang masuk ke kompresor. Oleh sebab itu, performance test perlu dilakukan dengan prosedur yang konsisten.

Tabel 7. Baseline performa yang disarankan untuk monitoring pasca-overhaul

Indikator	Nilai baseline	Kewaspadaan awal
Efisiensi termal	32,93%	Turun konsisten pada beban 137 MW
Efisiensi kompresor	91,58%	Turun disertai kenaikan temperatur keluar kompresor
Efisiensi ruang bakar	97,08%	Turun disertai ketidakstabilan temperatur masuk turbin
Efisiensi turbin	90,48%	Turun disertai kenaikan temperatur gas buang
Heat rate	10.930,15 kJ/kWh	Naik pada beban dan kondisi ambien sebanding
Back work ratio	0,4090	Naik berlebihan tanpa peningkatan kerja netto

3.12. Standardisasi Pengujian dan Pelaporan

Agar evaluasi overhaul dapat digunakan untuk keputusan pemeliharaan, proses pengujian perlu distandardisasi. Data minimum yang perlu dicatat mencakup beban generator, temperatur udara masuk, tekanan atmosfer, tekanan keluar kompresor, temperatur keluar kompresor, temperatur gas buang, laju bahan bakar, nilai kalor bahan bakar, laju udara, serta status operasi unit. Pencatatan perlu dilakukan pada saat kondisi stabil, bukan saat transien, start-up, shutdown, atau perubahan beban cepat. Pelaporan hasil uji sebaiknya menampilkan nilai sebelum dan sesudah overhaul dalam tabel ringkas seperti Tabel 2, bukan hanya menampilkan grafik. Tabel memudahkan pembaca untuk memeriksa nilai numerik, sedangkan grafik membantu melihat kecenderungan. Untuk artikel jurnal, pembahasan perlu menjelaskan hubungan sebab-akibat antara kegiatan pemeliharaan dan perubahan parameter, sehingga hasil tidak sekadar menyatakan bahwa efisiensi meningkat.

Penulisan rumus juga perlu konsisten. Simbol seperti W_c , W_t , W_{net} , Q_{in} , η_c , η_t , η_{th} , dan HRGT harus ditulis dengan makna yang sama dari metode sampai hasil. Satuan juga perlu dijaga agar tidak tercampur antara kJ/s, kJ/kg, MW, dan kJ/kWh. Konsistensi ini penting karena kesalahan satuan dapat menghasilkan interpretasi teknis yang keliru, terutama dalam perhitungan heat rate dan efisiensi termal. Dengan standardisasi tersebut, hasil penelitian tidak hanya menjadi evaluasi satu kali setelah minor inspection, tetapi juga dapat menjadi pola

pelaporan rutin untuk turbin gas lain. Pola yang sama dapat dipakai untuk membandingkan performa antarunit, mengevaluasi efektivitas compressor washing, memverifikasi hasil hot gas path inspection, atau menentukan prioritas overhaul berikutnya berdasarkan kondisi aktual mesin.

3.13. Implikasi Operasional untuk PLTGU Muara Tawar

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa minor inspection memberi dampak positif terhadap efisiensi, tetapi nilai kenaikannya relatif kecil. Kondisi ini lazim pada turbin gas yang masih dapat beroperasi sebelum overhaul, karena pemeliharaan minor tidak selalu mengubah desain atau kapasitas unit. Dampak utamanya adalah memulihkan kondisi komponen agar mendekati kondisi operasi yang lebih bersih, stabil, dan terkendali. Oleh karena itu, keberhasilan minor inspection perlu dinilai bukan hanya dari kenaikan efisiensi sesaat, tetapi juga dari kestabilan performa setelah unit kembali beroperasi dalam jangka panjang.

Pada operasi PLTGU, penurunan heat rate memiliki arti langsung terhadap konsumsi bahan bakar. Jika penurunan heat rate dapat dipertahankan, maka unit dapat menghasilkan daya dengan konsumsi energi yang lebih rendah. Selain itu, efisiensi kompresor yang lebih baik membantu menjaga kecukupan udara pembakaran, mengurangi risiko pembakaran tidak sempurna, dan mendukung kestabilan temperatur masuk turbin. Faktor ini penting karena ketidakstabilan pembakaran dapat mempercepat degradasi komponen hot gas path.

Dari sisi keandalan, perbaikan air intake, IGV, combustion chamber, burner, dan turbine blade juga mengurangi potensi gangguan operasi. Filter yang rusak atau kotor dapat meningkatkan pressure drop dan menurunkan laju massa udara. Burner yang tidak optimal dapat menyebabkan distribusi panas tidak merata. Sudu turbin yang mengalami degradasi dapat menurunkan kerja turbin dan meningkatkan vibrasi. Karena itu, hasil efisiensi perlu dikombinasikan dengan inspeksi visual dan data operasi mekanik.

Tabel 8. Indikator risiko degradasi performa turbin gas

Gejala operasi	Kemungkinan penyebab	Dampak terhadap performa	Prioritas tindakan
Heat rate meningkat	Fouling kompresor, pembakaran tidak optimal, blade terdegradasi	Konsumsi bahan bakar per kWh naik	Audit performa dan cek komponen utama
Tekanan keluar kompresor turun	Filter kotor, IGV tidak optimal, kompresor fouling	Laju udara berkurang dan efisiensi kompresor turun	Inspeksi air intake dan kompresor
Temperatur gas buang naik	Ekspansi kurang efektif atau pembakaran tidak merata	Kerja turbin menurun dan heat rate naik	Cek burner, combustor, dan turbine blade
Vibrasi meningkat	Ketidakseimbangan rotor, bearing aus, sudu bermasalah	Risiko kerusakan mekanik lanjutan	Vibration analysis dan inspeksi mekanik
AFR berubah drastis	Sensor aliran, sistem bahan bakar, atau suplai udara bermasalah	Pembakaran tidak stabil	Kalibrasi instrumen dan cek fuel system

Tabel 8 dapat digunakan sebagai pedoman awal dalam membaca data operasi setelah minor inspection. Indikator-indikator tersebut tidak berdiri sendiri; misalnya, kenaikan temperatur gas buang perlu dibandingkan dengan beban, tekanan keluar kompresor, dan laju bahan bakar. Jika beberapa indikator menunjukkan kecenderungan buruk secara bersamaan, maka inspeksi lebih lanjut perlu dilakukan meskipun jadwal overhaul berikutnya belum tiba.

Secara keseluruhan, pola evaluasi ini memperlihatkan bahwa artikel jurnal teknik perlu menggabungkan angka, rumus, dan interpretasi operasional. Angka efisiensi memberikan bukti kuantitatif, rumus menunjukkan dasar perhitungan, sedangkan interpretasi operasional menjelaskan mengapa perubahan tersebut penting bagi keandalan pembangkit. Dengan susunan tersebut, artikel menjadi lebih sesuai untuk pembaca JTM yang membutuhkan pembahasan teknis tetapi tetap ringkas.

3.14. Skenario Pemeliharaan Berbasis Kondisi

Data hasil penelitian dapat dikembangkan menjadi skenario condition-based maintenance. Pada pendekatan ini, jadwal pemeriksaan tidak hanya ditentukan oleh jam operasi, tetapi juga oleh kecenderungan parameter performa. Jika efisiensi kompresor mulai turun dan pressure ratio ikut menurun, tim pemeliharaan dapat memprioritaskan pemeriksaan air intake, filter, dan compressor washing. Jika efisiensi ruang bakar turun, fokus pemeriksaan diarahkan pada burner, fuel nozzle, dan kondisi dinding ruang bakar. Jika efisiensi turbin

turun bersamaan dengan kenaikan temperatur gas buang, area turbine blade dan hot gas path perlu menjadi prioritas.

Pendekatan berbasis kondisi penting karena turbin gas sangat dipengaruhi lingkungan operasi. Debu, kelembapan, kualitas udara masuk, dan kualitas bahan bakar dapat mempercepat penurunan performa. Pada daerah dengan udara masuk yang kotor, fouling kompresor dapat terjadi lebih cepat sehingga efisiensi kompresor menurun sebelum jadwal inspeksi berikutnya. Oleh karena itu, baseline pasca-overhaul harus dipakai sebagai titik awal pemantauan, bukan sebagai kesimpulan akhir bahwa mesin akan selalu berada pada kondisi baik.

Tabel 9. Skenario keputusan pemeliharaan berdasarkan tren performa

Tren data	Diagnosis awal	Pemeriksaan prioritas	Keputusan pemeliharaan
η_c turun, r_p turun, T2 naik	Fouling atau hambatan sisi kompresor	Air filter, IGV, compressor blade	Compressor cleaning atau inspeksi inlet
η_{comb} turun, T3 tidak stabil	Pembakaran tidak seragam	Fuel nozzle, burner, combustor basket	Tuning pembakaran dan inspeksi ruang bakar
η_t turun, T4 naik	Ekspansi turbin kurang efektif	Turbine blade, clearance, hot gas path	Borescope inspection atau hot gas path check
HRGT naik, W_{net} turun	Efisiensi keseluruhan turun	Semua komponen utama siklus	Performance test ulang dan analisis akar masalah
Vibrasi naik, efisiensi turun	Masalah mekanik mulai berkembang	Bearing, alignment, rotor, blade	Inspeksi mekanik sebelum operasi panjang

Skenario pada Tabel 9 menunjukkan bahwa satu parameter tidak cukup untuk menentukan tindakan. Misalnya, kenaikan heat rate dapat disebabkan oleh kompresor yang kotor, pembakaran yang tidak stabil, atau turbin yang mengalami degradasi. Karena itu, analisis harus dilakukan secara berlapis. Tahap pertama adalah membaca tren heat rate dan efisiensi termal. Tahap kedua adalah memeriksa efisiensi kompresor, ruang bakar, dan turbin. Tahap ketiga adalah mencocokkan hasil perhitungan dengan data mekanik, seperti vibrasi, temperatur bearing, dan hasil inspeksi visual.

Dengan cara tersebut, hasil minor inspection dapat dimanfaatkan untuk menentukan prioritas pemeliharaan berikutnya. Jika data pasca-overhaul tetap stabil, unit dapat terus dioperasikan dengan preventive maintenance rutin. Jika data mulai menyimpang dari baseline, inspeksi ringan dapat dilakukan sebelum kerusakan menjadi lebih besar. Jika beberapa indikator menunjukkan penurunan bersamaan, maka tindakan korektif perlu direncanakan lebih awal agar tidak berdampak pada availability unit.

Keterkaitan antara efisiensi dan keandalan juga penting untuk penilaian ekonomi pembangkit. Heat rate yang lebih rendah berhubungan dengan konsumsi bahan bakar yang lebih efisien, sedangkan performa komponen yang stabil mengurangi risiko outage. Oleh karena itu, laporan performance test sebaiknya tidak hanya menjadi arsip teknis, tetapi juga menjadi dasar diskusi antara tim operasi, pemeliharaan, dan engineering dalam menentukan strategi operasi yang paling efisien dan aman.

4. Kesimpulan

Minor inspection meningkatkan performa turbin gas Blok 4 Unit 1 PLTGU Muara Tawar pada beban 137 MW. Efisiensi termal meningkat dari 32,85% menjadi 32,93%, efisiensi kompresor meningkat dari 90,96% menjadi 91,58%, efisiensi ruang bakar meningkat dari 96,94% menjadi 97,08%, dan efisiensi turbin meningkat dari 90,42% menjadi 90,48%. Heat rate menurun dari 10.957,89 kJ/kWh menjadi 10.930,15 kJ/kWh, sehingga energi bahan bakar per satuan listrik menjadi lebih rendah.

Peningkatan tersebut berkaitan dengan pemulihan kondisi air intake, pembersihan dan recoating inlet guide vane, perbaikan combustion chamber, perbaikan burner fuel oil, serta penggantian turbine blade. Hasil ini menunjukkan bahwa overhaul berpengaruh positif terhadap performa turbin gas, tetapi pemantauan heat rate, efisiensi kompresor, temperatur gas buang, kondisi pembakaran, dan vibrasi tetap diperlukan agar penurunan performa dapat dideteksi lebih dini.

Saran

Performance test pasca-overhaul sebaiknya dilakukan secara periodik pada beban yang sebanding dengan pengujian awal, terutama pada sekitar 137 MW, sehingga perubahan heat rate, efisiensi kompresor, efisiensi ruang bakar, dan efisiensi turbin dapat dibandingkan secara adil. Data uji perlu dilengkapi kondisi ambien, nilai kalor bahan bakar, exhaust temperature spread, serta status compressor washing agar penyebab perubahan performa dapat ditelusuri lebih tepat [15,16].

Pemeliharaan rutin perlu memprioritaskan kebersihan air intake, kondisi filter, inlet guide vane, burner, combustor basket, dan turbine blade karena komponen tersebut terbukti berkaitan langsung dengan kenaikan efisiensi pasca-overhaul. Apabila heat rate mulai meningkat pada beban yang sama, inspeksi awal dapat diarahkan pada fouling kompresor, ketidakseimbangan pembakaran, dan degradasi hot gas path sebelum jadwal overhaul berikutnya [6,13,18].

Untuk penelitian lanjutan, evaluasi dapat diperluas pada beberapa tingkat beban dan dikoreksi terhadap temperatur ambien. Integrasi data performa dengan vibrasi, temperatur bearing, emisi NO_x/CO, serta riwayat inspeksi komponen akan membuat diagnosis kondisi turbin gas lebih kuat dan mendukung penerapan condition-based maintenance pada PLTGU Muara Tawar [7,8,17,18].

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT PJB UP Muara Tawar atas dukungan data performance test dan informasi kegiatan minor inspection, serta kepada pembimbing dan pihak pemeliharaan turbin gas yang telah memberikan arahan selama proses penelitian.

Daftar Rujukan

- 1) Sunarwo, Harijono. Analisis sistem turbin gas dan siklus Brayton. Jakarta; 2016.
- 2) Faizal. Termodinamika siklus Brayton pada turbin gas. Jakarta; 2017.
- 3) Syammari. Gas turbine component and operation. 2019.
- 4) Moran MJ, Shapiro HN, Boettner DD, Bailey MB. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 8th ed. Hoboken: Wiley; 2014.
- 5) Cengel YA, Boles MA. Thermodynamics: An Engineering Approach. 8th ed. New York: McGraw-Hill; 2015.
- 6) Boyce MP. Gas Turbine Engineering Handbook. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2012.
- 7) Kurz R, Brun K. Gas turbine performance. J Eng Gas Turbines Power. 2001;123(1):70-77.
- 8) Walsh PP, Fletcher P. Gas Turbine Performance. 2nd ed. Oxford: Blackwell Science; 2004.
- 9) PT PJB UP Muara Tawar. Data performance test turbin gas Blok 4 Unit 1 sebelum dan sesudah minor inspection. Bekasi; 2019.
- 10) PT PJB UP Muara Tawar. Manual book dan scope pekerjaan minor inspection turbin gas Siemens AG V94.2. Bekasi; 2019.
- 11) Rahardianto R. Analisis pengaruh overhaul terhadap efisiensi turbin gas Blok 4 Unit 1 PLTGU PT PJB UP Muara Tawar. Skripsi. Institut Teknologi PLN; 2020.
- 12) Saravanamuttoo HIH, Rogers GFC, Cohen H, Straznicky PV, Nix AC. Gas Turbine Theory. 7th ed. Harlow: Pearson; 2017.
- 13) Meherwan PB. Gas turbine performance diagnostics. Houston: Gulf Professional Publishing; 2012.
- 14) Rahman MM, Ibrahim TK, Abdalla AN. Thermodynamic performance analysis of gas-turbine power-plant. Int J Phys Sci. 2011;6(14):3539-3550.
- 15) ISO 2314. Gas turbines: acceptance tests. Geneva: International Organization for Standardization; 2009.
- 16) ASME PTC 22. Gas Turbines Performance Test Code. New York: American Society of Mechanical Engineers; 2014.
- 17) ASME PTC 46. Overall Plant Performance. New York: American Society of Mechanical Engineers; 2015.
- 18) Lakshminarasimha AN, Boyce MP, Meher-Homji CB. Modeling and analysis of gas turbine performance deterioration. J Eng Gas Turbines Power. 1994;116(1):46-
- 19) Putra TS, Prabowo E, Ramadani F. Pengaruh Overhaul Terhadap Kinerja High Pressure Heater Unit 3 PLTU Banten Lontar. JTM: JURNAL TEKNIK MESIN. 2026 Feb 1;2(1):10-5.