

Contents list available at [Sinta](https://sinta)

ARMATUR

: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>

Analisis Pengaruh Variasi Beban Terhadap Efisiensi *Thermal* Turbin Gas PLTG Muara Karang

Anugerah Banjarnahor^{1*}, Hendri², Muhammad Ridwan³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi, Institut Teknologi PLN, Menara PLN, Jl. Lkr. Luar Barat Lantai 2, RT.1/RW.1, Duri Kosambi, Kecamatan Cengkareng, Kota Jakarta Barat, Daerah Khusus Jakarta 11750

ARTICLE INFO

Keywords:
Thermal Efficiency, Gas Turbine, Load Variation, PLTG, Brayton Cycle.

ABSTRACT

Gas turbines are one type of power plant with high flexibility, but their performance is greatly affected by variations in operating load. This study aims to analyse the effect of load variations on the thermal efficiency of Gas Turbine Unit 1.2 at the Muara Karang Gas Power Plant under three load conditions, namely 70 MW, 80 MW, and 90 MW. Actual operational data was used to calculate component work (compressor, combustion chamber, and turbine) and cycle thermal efficiency using thermodynamic calculation methods based on the Brayton Cycle. The calculation results were validated using Cycle Tempo and EES (Engineering Equation Solver) software with an average deviation of <5%. The results show that thermal efficiency increases as the operating load increases. At a load of 70 MW, the thermal efficiency was recorded at 30.30%, increasing to 30.76% at a load of 80 MW, and reaching a peak of 31.72% at a load of 90 MW. These findings prove that gas turbines operate most efficiently at loads close to their maximum capacity, so that operating at optimal loads can reduce specific fuel consumption and improve the energy efficiency of the plant.

Pendahuluan

Sektor pembangkitan listrik memegang peranan vital dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan ketahanan energi nasional. Ketersediaan energi listrik yang

andal dan efisien menjadi faktor kunci dalam menjamin keberlanjutan sistem kelistrikan suatu negara [1]. Salah satu jenis pembangkit yang memiliki peran strategis dalam sistem tenaga listrik adalah

*Corresponding author: anugerahbanjarnahor09@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i1.10393>

Received 15 Oktober 2026; Received in revised form 30 December 2025; Accepted 22 January 2026

Available online 1 March 2026

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), terutama karena fleksibilitas operasional, kemampuan mengikuti beban (*load following*), serta waktu *start-up* yang relatif cepat dibandingkan pembangkit termal lainnya [2][8].

Kinerja PLTG sangat ditentukan oleh performa turbin gas sebagai komponen utama konversi energi. Efisiensi termal turbin gas menjadi indikator penting karena berhubungan langsung dengan konsumsi bahan bakar, biaya operasi, dan emisi gas buang [3][6]. Dalam kondisi operasi nyata, turbin gas jarang beroperasi pada beban desain secara kontinu, melainkan harus menyesuaikan variasi permintaan beban jaringan listrik [4][12].

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa operasi beban parsial (*part-load*) menyebabkan penurunan efisiensi termal akibat perubahan rasio aliran massa udara dan bahan bakar, peningkatan *back work ratio*, serta menjauhnya titik operasi dari kondisi desain [4][5][9]. Pilidis dan Kyprianidis [4] serta Rahman et al. [5] melaporkan bahwa efisiensi termal turbin gas cenderung meningkat pada beban menengah hingga tinggi, karena kerja bersih turbin meningkat lebih signifikan dibandingkan kerja kompresor.

Selain faktor beban, degradasi kinerja komponen seperti fouling pada sudu kompresor dan penurunan efisiensi isentropik turut memengaruhi performa jangka panjang turbin gas [6]. Degradasi ini berdampak pada meningkatnya *specific fuel consumption* (SFC) serta menurunnya efisiensi energi pembangkit secara keseluruhan [13]. Oleh karena itu, analisis pengaruh variasi beban terhadap efisiensi termal turbin gas menjadi penting sebagai dasar optimasi operasi pembangkit, khususnya pada unit-unit eksisting seperti PLTG Muara Karang.

Rumusan Masalah

Dalam operasional sehari-hari, turbin gas pada PLTG Muara Karang dihadapkan pada variasi beban operasi yang mengikuti fluktuasi kebutuhan sistem kelistrikan. Operasi pada beban parsial (*part-load*) diketahui dapat memengaruhi performa termodinamika siklus Brayton, khususnya terhadap efisiensi termal akibat perubahan kondisi aliran massa udara dan bahan bakar serta karakteristik kerja komponen utama [4][5][9].

Berbagai studi terdahulu menunjukkan bahwa efisiensi termal turbin gas cenderung meningkat pada beban menengah hingga mendekati beban desain, sementara pada beban rendah terjadi penurunan efisiensi karena meningkatnya *back work ratio* dan menjauhnya titik operasi dari kondisi optimal [4][12][13]. Namun demikian, karakteristik hubungan antara variasi beban dan efisiensi termal sangat dipengaruhi oleh kondisi aktual unit, konfigurasi sistem, serta tingkat degradasi komponen [6][8].

Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada analisis kuantitatif pengaruh variasi beban operasi sebesar 70 MW, 80 MW, dan 90 MW terhadap efisiensi termal Turbin Gas Unit 1.2 PLTG Muara Karang. Permasalahan yang ingin dijawab dalam penelitian ini meliputi: (1) bagaimana hubungan antara kenaikan beban operasi dengan perubahan efisiensi termal turbin gas, (2) pada tingkat beban berapa efisiensi termal optimal dicapai, serta (3) sejauh mana hasil perhitungan termodinamika manual sesuai dengan hasil validasi menggunakan perangkat lunak *Cycle Tempo* dan *Engineering Equation Solver (EES)* sebagai alat simulasi kinerja siklus [1][2].

Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menganalisis secara kuantitatif pengaruh variasi beban operasi terhadap efisiensi termal Turbin Gas Unit 1.2 PLTG Muara Karang berdasarkan pendekatan

termodinamika teknik siklus Brayton [1][3][8].

Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis perubahan kinerja termodinamika siklus Brayton pada tiga kondisi beban operasi, yaitu 70 MW, 80 MW, dan 90 MW, guna mengetahui pengaruh variasi beban terhadap efisiensi termal turbin gas [4][5][12].
2. Menentukan tingkat beban operasi yang menghasilkan efisiensi termal optimal, sehingga dapat dijadikan acuan dalam pengambilan keputusan operasional unit pembangkit [9][13].
3. Memvalidasi hasil perhitungan termodinamika manual menggunakan perangkat lunak *Cycle Tempo* dan *EES*, untuk menilai tingkat akurasi dan keandalan model perhitungan yang digunakan dalam merepresentasikan kondisi operasi aktual turbin gas [1][2].

Tinjauan Pustaka

Dasar Termodinamika Siklus Turbin Gas

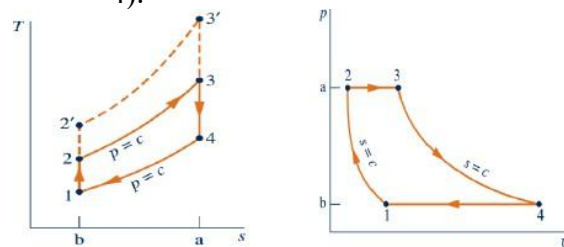
Turbin gas bekerja berdasarkan Siklus Brayton terbuka, yang melibatkan proses kompresi isentropik di kompresor, penambahan panas pada tekanan konstan di ruang bakar, serta ekspansi isentropik di turbin gas [1][2][3]. Siklus ini menjadi dasar analisis termodinamika pada pembangkit listrik tenaga gas karena merepresentasikan proses konversi energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik secara langsung.

Karakteristik utama siklus Brayton ditentukan oleh rasio tekanan kompresor (*compression ratio*) dan Turbine Inlet Temperature (TIT). Peningkatan kedua parameter tersebut secara teoritis dapat meningkatkan efisiensi siklus, namun dalam praktik dibatasi oleh kekuatan material turbin dan batasan termal komponen

[8][13]. Oleh karena itu, performa aktual turbin gas sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi dan desain sistem.

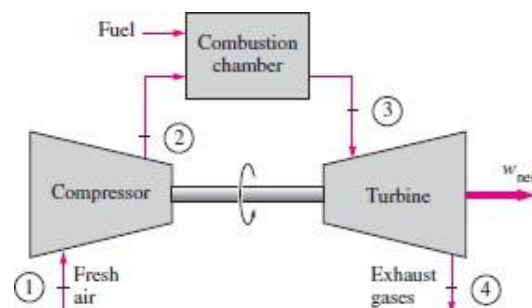
Secara ideal, siklus Brayton terbuka terdiri dari tiga proses utama [1][8]:

1. Kompresi isentropik di kompresor (1–2).
2. Penambahan panas pada tekanan konstan di ruang bakar (2–3).
3. Ekspansi isentropik di turbin gas (3–4).



Gambar 1 Siklus Brayton Ideal

(Sumber: Boles, 2006)



Gambar 2 Siklus *Open Cycle* PLTG

(Sumber: Cengel, 2008)

Kerja Komponen

Analisis performa siklus Brayton dilakukan dengan menerapkan neraca energi pada setiap komponen utama, yaitu kompresor dan turbin gas [1][3]. Pendekatan ini digunakan secara luas dalam analisis performa pembangkit karena mampu menggambarkan kontribusi masing-masing komponen terhadap daya bersih sistem.

- Kerja Kompresor (W_c) merupakan energi yang dibutuhkan untuk menaikkan tekanan udara masuk dan

dihitung berdasarkan perubahan entalpi spesifik udara dikalikan dengan laju aliran massa udara [1][2]:

$$W_c = \dot{m}_{air} \times (h_2 - h_1) \quad (1)$$

- Kerja Turbin Gas (Wt) adalah energi yang dihasilkan dari ekspansi gas hasil pembakaran di dalam turbin, yang dihitung dari perubahan entalpi gas dikalikan laju aliran massa total gas [3][8]:

$$W_t = \dot{m}_{flue\ bb} \times (h_3 - h_4) \quad (2)$$

- Kerja Bersih (Wnet) merupakan selisih antara kerja turbin dan kerja kompresor, dan merepresentasikan daya bersih yang tersedia untuk menggerakkan generator [1][3]:

$$W_{net} = W_t - W_c \quad (3)$$

Besarnya kerja bersih inilah yang secara langsung menentukan output daya turbin gas dan menjadi parameter utama dalam evaluasi kinerja pembangkit.

Efisiensi Termal

Efisiensi termal (η_{th}) merupakan parameter utama dalam menilai kinerja turbin gas, yang didefinisikan sebagai kemampuan siklus dalam mengonversi energi kimia bahan bakar menjadi kerja bersih [1][2]. Secara umum, efisiensi termal dinyatakan sebagai:

$$H_t = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_4')} \times 100\% \quad (4)$$

dengan Q_{in} merupakan laju energi panas dari bahan bakar, dihitung sebagai:

$$\eta_t = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_4')} \times 100\% \quad (5)$$

Pada turbin gas siklus sederhana (*simple cycle*), nilai efisiensi termal aktual umumnya berada pada kisaran 30–35%, tergantung pada rasio tekanan, TIT, dan kondisi operasi unit [2][4][12]. Studi operasional menunjukkan bahwa efisiensi

ini sangat sensitif terhadap perubahan beban dan kondisi komponen [4][5].

Efisiensi Isentropik Komponen

Selain efisiensi siklus, efisiensi isentropik komponen digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana proses aktual mendekati proses ideal tanpa kehilangan energi akibat irreversibilitas [1][8].

- Efisiensi Kompresor (η_c):

$$\eta_{\text{termal}} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (6)$$

- Efisiensi Turbin Gas (η_t):

$$Q_{in} = \dot{m}_{bb} \times \text{LHV} \quad (7)$$

Efisiensi isentropik kompresor dan turbin gas yang tinggi menunjukkan kerugian energi yang relatif kecil, sehingga berkontribusi positif terhadap peningkatan efisiensi termal siklus secara keseluruhan [1][2][6]. Degradasi efisiensi isentropik, khususnya pada kompresor akibat *fouling*, diketahui menjadi salah satu penyebab utama penurunan performa turbin gas dalam jangka panjang [6][13].

Faktor Operasional: Variasi Beban

Dalam praktik operasional sistem tenaga listrik, turbin gas jarang beroperasi pada beban penuh secara kontinu, melainkan mengikuti fluktuasi permintaan beban jaringan. Variasi beban operasi ini menyebabkan perubahan laju aliran massa udara dan bahan bakar, yang berdampak langsung pada kerja komponen dan efisiensi termal siklus [4][5][12].

Beberapa penelitian melaporkan bahwa efisiensi termal turbin gas cenderung meningkat seiring dengan kenaikan beban, karena kerugian relatif pada kompresor menjadi lebih kecil dibandingkan peningkatan kerja bersih yang dihasilkan turbin [4][6][9]. Sebaliknya, pada beban

rendah, efisiensi menurun akibat meningkatnya *back work ratio* dan menjauhnya titik operasi dari kondisi desain [12][13].

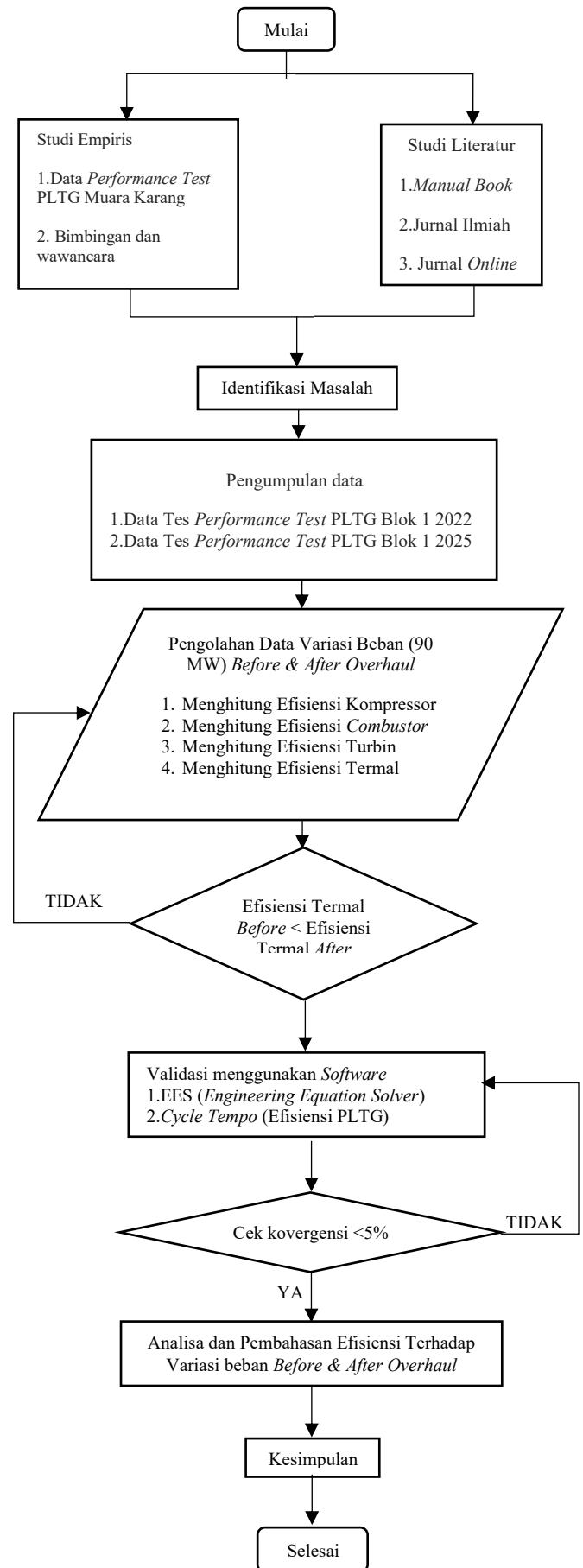
Selain efisiensi termal, parameter tambahan seperti *Specific Fuel Consumption (SFC)* dan *Back Work Ratio (BWR)* sering digunakan sebagai indikator performa. *SFC* umumnya menurun pada beban tinggi, sementara *BWR* menunjukkan proporsi kerja turbin yang digunakan untuk menggerakkan kompresor [2][8].

Metode Penelitian

Waktu dan Tempat. Penelitian ini merupakan studi kuantitatif yang dilakukan pada Turbin Gas Unit 1.2 PT PLN Nusantara Power (NP) Unit Pembangkitan Muara Karang, Jakarta. Pemilihan unit ini didasarkan pada ketersediaan data operasional yang lengkap dan representatif pada berbagai variasi beban operasi, sebagaimana direkomendasikan dalam studi analisis performa turbin gas berbasis data lapangan [4][5][12].

Data yang digunakan diperoleh dari *logsheet* operasional unit pada kondisi operasi stabil (*steady-state*) dengan tiga tingkat beban, yaitu 70 MW, 80 MW, dan 90 MW. Pemilihan kondisi operasi stabil bertujuan untuk meminimalkan pengaruh fluktuasi transien terhadap hasil perhitungan termodinamika [8][9].

Berdasarkan nilai entalpi tersebut, dilakukan perhitungan kerja kompresor, kerja turbin gas, kerja bersih, efisiensi isentropik komponen, serta efisiensi termal siklus pada masing-masing variasi beban. Pendekatan ini sejalan dengan metode yang digunakan dalam berbagai penelitian analisis kinerja turbin gas pada kondisi beban parsial [4][5][12].



Gambar 3 Diagram Alir Penelitian

Hasil dan Pembahasan

Validasi Model Numerik

Untuk menjamin keakuratan dan keandalan hasil, perhitungan manual yang diperoleh divalidasi menggunakan perangkat lunak *Cycle Tempo* dan *Engineering Equation Solver (EES)*. Kedua perangkat lunak tersebut banyak digunakan dalam analisis dan simulasi siklus termodinamika pembangkit listrik karena kemampuannya dalam memodelkan sistem energi secara komprehensif [1][2][10].

Validasi dilakukan dengan membandingkan nilai efisiensi termal hasil perhitungan manual dengan hasil simulasi perangkat lunak. Model perhitungan dianggap valid apabila deviasi rata-rata berada di bawah 5%, sesuai dengan toleransi yang umum digunakan dalam studi validasi model termodinamika sistem energi [1][2][9].

Pengaruh Variasi Beban Terhadap Efisiensi Termal

Hasil analisis menunjukkan bahwa efisiensi termal Turbin Gas Unit 1.2 PLTG Muara Karang meningkat seiring dengan bertambahnya beban operasi. Pada beban 70 MW, efisiensi termal tercatat sebesar 30,30%, kemudian meningkat menjadi 30,76% pada beban 80 MW, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 31,72% pada beban 90 MW. Tren peningkatan efisiensi ini sejalan dengan karakteristik kinerja turbin gas pada kondisi *part-load*, di mana efisiensi meningkat saat operasi mendekati beban desain [4][9][12].

Kenaikan efisiensi termal tersebut disebabkan oleh meningkatnya daya keluaran bersih (*net work*) yang dihasilkan turbin, sementara peningkatan konsumsi energi untuk menggerakkan kompresor tidak terjadi secara proporsional. Pada beban rendah, porsi kerja turbin yang digunakan untuk menggerakkan kompresor relatif besar, sehingga *back work ratio* meningkat dan efisiensi siklus menjadi lebih rendah

[2][4]. Sebaliknya, pada beban tinggi, kerja bersih yang dihasilkan meningkat lebih signifikan dibandingkan kerja kompresor, sehingga efisiensi termal siklus turut meningkat [5][6][13].

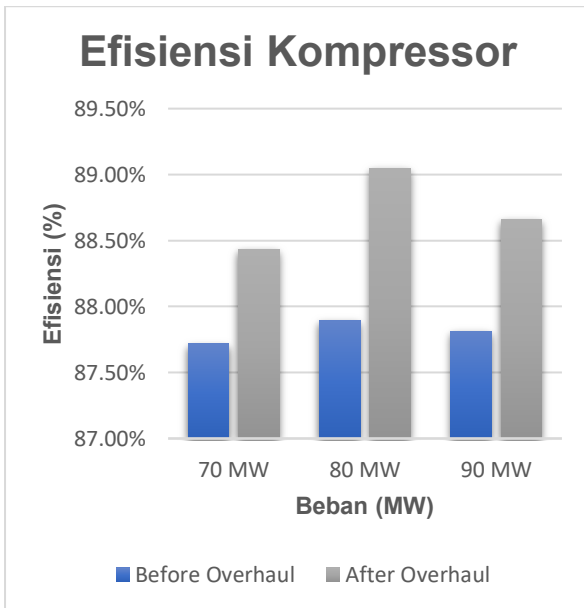
Fenomena ini konsisten dengan hasil penelitian Pilidis dan Kyprianidis [4] serta Rahman et al. [5] yang melaporkan bahwa peningkatan beban operasi menyebabkan penurunan kerugian relatif pada kompresor dan meningkatkan pemanfaatan energi panas di turbin. Selain itu, Ameri dan Enadi [9] serta Mousavi et al. [12] menunjukkan bahwa efisiensi termal turbin gas pada beban parsial sangat dipengaruhi oleh perubahan laju aliran massa dan kondisi operasi komponen, sehingga efisiensi maksimum umumnya dicapai pada beban menengah tinggi.

Setelah diperoleh kecenderungan umum efisiensi termal pada setiap variasi beban, langkah selanjutnya adalah menyajikan data dasar operasional yang digunakan dalam perhitungan. Data ini meliputi nilai entalpi pada titik-titik utama siklus, laju aliran massa udara, serta energi panas masuk ke ruang bakar (Q_{in}). Parameter-parameter tersebut merupakan variabel utama dalam perhitungan kerja kompresor, kerja turbin, dan efisiensi termal siklus sesuai dengan pendekatan analisis termodinamika siklus Brayton [1][3][8]. Rangkuman data operasional yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Data Awal

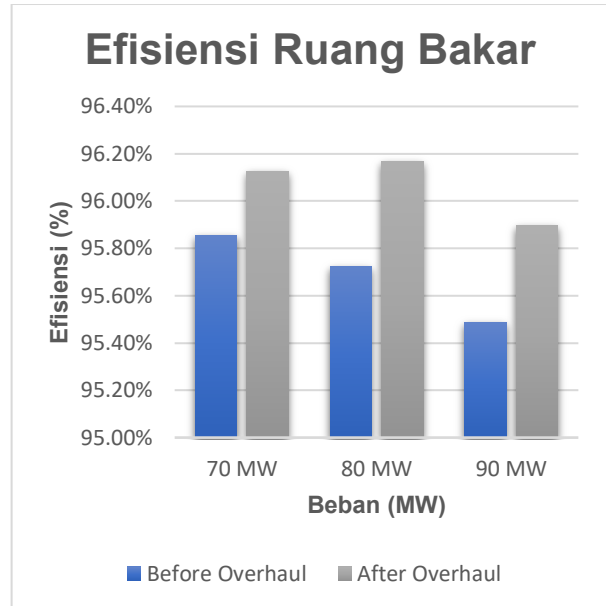
Parameter	Beban (kJ/kg)		Beban (kJ/kg)		Beban (kJ/kg)	
	70 MW	70 MW	80 MW	80 MW	90 MW	90 MW
	Befor e	After	Befor e	After	Befor e	After
Enthalpi udara masuk kompresor (h1)	302,09	302,23	304,42	305,59	307,82	305,87
Enthalpi udara keluar kompresor (h2)	605,69	604,09	629,53	625,58	653,81	644,23
Enthalpi gas hasil pembakaran masuk turbin (h3)	1543,1	1545,7	1586,8	1581,0	1622,4	1618,7
Enthalpi gas hasil pembakaran keluar turbin (h4)	852,11	852,88	853,26	852,72	853,95	854,26
Enthalpi ideal udara kompresor keluar kompresor (h2')	568,40	569,18	590,17	590,54	611,65	605,85
Enthalpi ideal gas hasil pembakaran keluar turbin (h4')	781,39	781,89	778,40	778,36	775,64	776,29
Kalor Masuk Kedalam Ruang Bakar (Q_{in})	393950,06	377726,07	432790,26	402135,43	461189,79	443127,23

Laju aliran udara actual (mudara)	406,4 9	387,8 2	436,8 8	406,1 7	459,6 9	438,6 0
Kerja Kompresor (Wkomp)	1406 86,98	1323 73,03	1615 98,91	1459 52,69	1811 21,36	1673 88,73
Kerja Turbin (Wturbin)	2600 47,33	2488 08,53	2968 94,03	2742 81,93	3274 31,78	3110 00,20



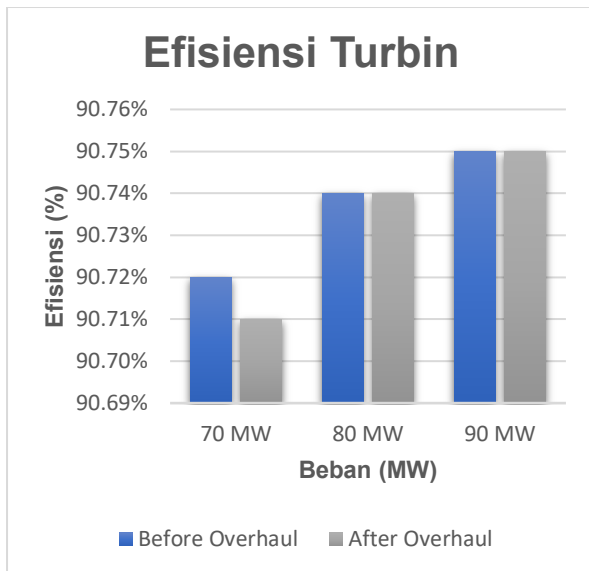
Gambar 4 Efisiensi Kompresor
(Sumber: Perhitungan, 2025)

Grafik menunjukkan bahwa efisiensi isentropik kompresor berada pada kisaran 87–89%. Pada kondisi *before overhaul*, efisiensi relatif lebih rendah, yaitu 87,7% pada 70 MW, sedikit naik menjadi 87,9% pada 80 MW, lalu kembali menurun menjadi 87,8% pada 90 MW. Setelah *overhaul*, efisiensi meningkat signifikan pada semua beban, dengan nilai tertinggi mencapai sekitar 89,0% pada beban 80 MW. Hal ini menegaskan bahwa kinerja kompresor sangat dipengaruhi oleh kebersihan sudu dan kondisi mekanisnya, sehingga pemulihan setelah *overhaul* memberikan kontribusi besar terhadap perbaikan kinerja siklus [6].



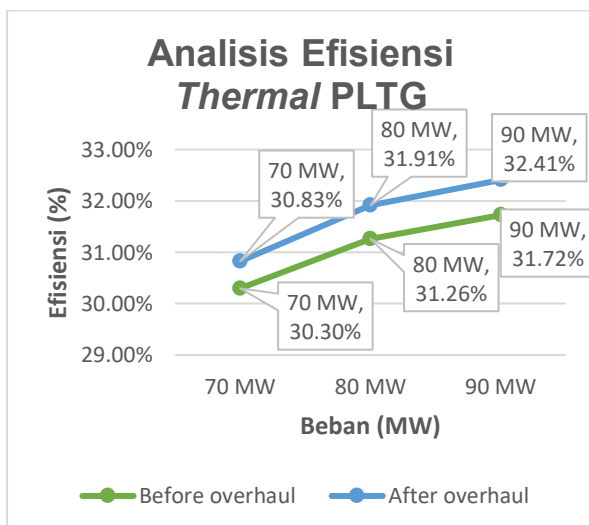
Gambar 5 Efisiensi Ruang Bakar
(Sumber: Perhitungan, 2025)

Efisiensi ruang bakar menunjukkan tren yang sedikit berbeda. Pada kondisi *before overhaul*, efisiensi berkisar antara 95,5% hingga 95,8%. Setelah *overhaul*, efisiensi meningkat pada semua tingkat beban, dengan nilai tertinggi mencapai 96,2% pada beban 80 MW. Peningkatan ini relatif kecil dibandingkan kompresor, namun tetap signifikan karena menunjukkan bahwa pembersihan dan penyetelan ulang sistem pembakaran mampu mengurangi kehilangan panas akibat ketidak sempurnaan pembakaran. Dengan demikian, kontribusi ruang bakar terhadap peningkatan efisiensi total lebih pada perbaikan kualitas pembakaran [7].



Gambar 6 Efisiensi Turbin
(Sumber: Perhitungan, 2025)

Efisiensi isentropik turbin relatif stabil baik sebelum maupun sesudah overhaul, yaitu berada pada rentang 90,7% hingga 90,75%. Tidak ada perbedaan mencolok antara dua kondisi tersebut, yang mengindikasikan bahwa komponen turbin tidak mengalami degradasi signifikan dalam periode operasi yang ditinjau. Stabilitas efisiensi turbin ini menunjukkan bahwa degradasi utama lebih dominan terjadi pada kompresor, sementara turbin tetap bekerja mendekati kondisi ideal [8].



Gambar 7 Efisiensi Thermal
(Sumber: Perhitungan, 2025)

Kenaikan efisiensi ini dapat dijelaskan dari sisi kerja komponen. Pada

beban rendah (70 MW), proporsi kerja turbin yang digunakan untuk menggerakkan kompresor relatif besar, sehingga efisiensi siklus rendah. Namun, seiring kenaikan beban ke 80 MW dan 90 MW, kerja bersih (W_{net}) meningkat lebih signifikan dibandingkan kenaikan konsumsi bahan bakar, sehingga efisiensi termal juga meningkat [4][5].

Implikasi Teknis Hasil Penelitian

Temuan ini memiliki implikasi penting dalam pengoperasian PLTG. Efisiensi termal yang lebih tinggi pada beban mendekati kapasitas puncak berarti konsumsi bahan bakar spesifik lebih rendah. Hal ini berdampak langsung pada penurunan biaya operasional dan peningkatan efisiensi energi pembangkit [6]. Oleh karena itu, pengoperasian unit pada beban menengah hingga tinggi lebih disarankan untuk memperoleh kinerja yang optimal, meskipun tetap memperhatikan batasan teknis dan kebutuhan sistem kelistrikan.

Kesimpulan

Berdasarkan analisis termodinamika yang dilakukan pada Turbin Gas Unit 1.2 PLTG Muara Karang, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Efisiensi termal meningkat seiring dengan kenaikan beban operasi. Pada beban 70 MW, efisiensi termal tercatat sebesar 30,30%, naik menjadi 30,76% pada 80 MW, dan mencapai puncaknya pada 31,72% di beban 90 MW. Hal ini linear dengan teori dimana efisiensi termal turbin gas sangat dipengaruhi oleh variasi beban operasi, di mana penurunan beban dari kondisi desain menyebabkan penurunan efisiensi dan sebaliknya akibat operasi komponen yang menjauhi titik optimalnya [9].
2. Kenaikan efisiensi tersebut terjadi karena kerja bersih (*net work*) yang dihasilkan turbin meningkat lebih besar dibandingkan penambahan kerja kompresor. Dengan demikian, semakin

tinggi beban operasi, semakin optimal pemanfaatan energi panas yang masuk ke sistem.

3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengoperasian unit pada beban menengah hingga tinggi memberikan efisiensi energi yang lebih baik. Hal ini dapat menjadi dasar pertimbangan operasional untuk meminimalkan konsumsi bahan bakar spesifik dan meningkatkan keekonomian pembangkitan listrik.

Referensi

- [1] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2019.
- [2] R. K. Rajput, *Engineering Thermodynamics*, 5th ed. New Delhi: Laxmi Publications, 2016.
- [3] M. Moran, H. Shapiro, D. Boettner, and M. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 9th ed. Hoboken: Wiley, 2018.
- [4] P. Pilidis and K. Kyprianidis, "Gas turbine performance in variable load operation," *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 52–61, 2012.
- [5] M. Rahman, A. R. Saidi, and T. Sutikno, "Performance analysis of gas turbine under different load conditions," *International Journal of Energy Research*, vol. 41, no. 3, pp. 410–420, 2017.
- [6] A. J. Kurz and K. Brun, *Gas Turbine Performance Degradation and Recovery*, Houston: Gas Machinery Research Council, 2012.
- [7] PLN Nusantara Power, Laporan Operasional Unit PLTG Muara Karang, Jakarta: PT PLN Nusantara Power, 2025.
- [8] H. Saravanamuttoo, G. Rogers, H. Cohen, and P. Straznicky, *Gas Turbine Theory*, 7th ed. Harlow: Pearson Education, 2017.
- [9] Ameri, M., & Enadi, N. (2019). *Thermodynamic and exergy analysis of gas turbine power plants under part-load conditions*. *Energy Conversion and Management*, 199, 111987.
- [10] Ahmadi, P., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2019). *Performance assessment and optimization of a combined cycle power plant under part-load conditions*. *Energy*, 173, 212–225.
- [11] Zhang, X., Li, H., Wang, J., & Zhao, Y. (2020). *Part-load performance analysis of gas turbine combined cycle power plants*. *Applied Thermal Engineering*, 170, 114987.
- [12] Mousavi, S. M., Ahmadi, M. H., & Pourkiaei, S. M. (2020). *Effect of load variation on gas turbine performance and thermal efficiency*. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100682.
- [13] Gülen, S. C. (2020). *Off-design performance characteristics of industrial gas turbines*. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 142(8), 081012.
- [14] Edhy Sofyan, S., Umar, H., Ilham Ramafunna, F., & Tamlicha, A. (2024). *Thermodynamic analysis of gas turbine power plant of PT PLN Belawan generation implementation unit*. 404 *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering-Jurnal Polimesin*, 22(4). <http://e-jurnal.pnl.ac.id/polimesin>
- [15] Ali Motamed, M., Genrup, M., & Nord, L. O. (2024). *Part-load thermal efficiency enhancement in gas turbine combined cycles by exhaust gas recirculation*. *Applied Thermal Engineering*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122716>