

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

# ARMATUR

: Artikel Teknik Mesin &amp; Manufaktur

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

## Analisis Pengaruh *Before and After Overhaul* Terhadap Efisiensi *Thermal* Turbin Gas PLTG Muara Karang Menggunakan Diagram Sankey

Anugerah Banjarnahor<sup>1\*</sup>, Hendri<sup>2</sup>, Muhammad Ridwan<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>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, Major Overhaul, Sankey Diagram, PLTG Muara Karang.*

### ABSTRACT

*Gas turbine performance gradually declines due to fouling, thermal stress, and component wear, resulting in reduced thermal efficiency. A major overhaul is crucial to restore performance near design conditions. This study analyzes the impact of major overhaul on the thermal efficiency of Gas Turbine Unit 1.2 at Muara Karang Power Plant, operating on liquefied natural gas (LNG) at 90 MW maximum load. Actual operational data from July–August 2025 were processed using Brayton cycle thermodynamic principles to calculate net work output, fuel energy input, and overall thermal efficiency. Calculations were validated with deviations under 5%. Energy distribution and losses were visualized through Sankey diagrams comparing before and after overhaul conditions. Results show thermal efficiency increased from 31.91% to 32.41% after overhaul, corresponding to a reduction in heat loss of approximately 2,950 kJ/s. Improvements were mainly associated with compressor recovery and reduced irreversibility in the combustor. These findings confirm that major overhaul is an effective maintenance strategy to enhance thermal performance while Sankey diagrams serve as a valuable tool for visualising component-level energy losses. The novelty of this study lies in integrating validated thermodynamic modelling with real-overhaul data from PLTG Muara Karang.*

### Pendahuluan

\*Corresponding author: [anugerahbanjarnahor09@gmail.com](mailto:anugerahbanjarnahor09@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i1.10394>

Received 20 Oktober 2025; Received in revised form 22 January 2026; Accepted 04 January 2026

Available online 31 March 2026

Evaluasi kinerja sistem termal pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) umumnya dilakukan menggunakan Hukum Termodinamika I, yang menghasilkan parameter efisiensi termal sebagai indikator utama performa sistem [1,2]. Pendekatan ini menjelaskan kuantitas konversi energi melalui perbandingan antara daya keluaran dengan energi panas yang masuk ke sistem. Namun demikian, analisis berbasis Hukum Termodinamika I belum sepenuhnya mampu menggambarkan bagaimana energi tersebut terdistribusi pada setiap komponen utama serta mengidentifikasi secara rinci lokasi terjadinya kerugian energi terbesar [5,13].

Dalam konteks operasional PLTG Muara Karang, beberapa studi menunjukkan bahwa pelaksanaan *major overhaul* berperan penting dalam memulihkan performa turbin gas yang mengalami degradasi akibat *fouling*, keausan material, serta penurunan efisiensi komponen [3,6,10]. Data operasional menunjukkan bahwa pelaksanaan *major overhaul* mampu meningkatkan efisiensi termal hingga 0,69% pada beban maksimum 90 MW [7]. Meskipun peningkatan ini terlihat relatif kecil secara numerik, secara energi peningkatan tersebut merepresentasikan pengurangan kerugian energi yang signifikan dan berdampak langsung pada konsumsi bahan bakar serta biaya operasi pembangkit [9,11].

Pemahaman yang lebih komprehensif diperlukan untuk mengevaluasi distribusi energi dan potensi kerugian energi (*heat loss* maupun *exergy destruction*) pada komponen utama seperti kompresor, ruang bakar, dan turbin [3,4,6,12]. Salah satu pendekatan yang efektif untuk tujuan tersebut adalah penggunaan Diagram Sankey, yang mampu memvisualisasikan aliran energi dari *input* hingga *output* dan *losses* secara proporsional [5,8].

Diagram Sankey tidak hanya menampilkan besarnya energi masuk, energi berguna, dan energi hilang, tetapi juga memungkinkan perbandingan visual yang jelas antara kondisi *before* dan *after overhaul* [5,7]. Dengan demikian, analisis menggunakan Diagram Sankey memberikan gambaran yang lebih mendalam mengenai efektivitas *overhaul* dalam memulihkan kinerja unit serta kontribusinya terhadap perbaikan distribusi energi pada kondisi beban maksimum [8,9].

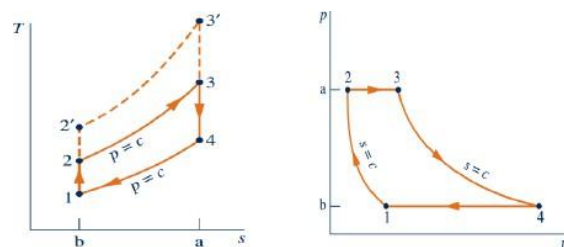
## Tinjauan Pustaka

### Dasar Termodinamika Siklus Brayton

Turbin gas beroperasi berdasarkan siklus **Brayton terbuka**, yang terdiri dari tiga proses utama, yaitu kompresi isentropik udara pada kompresor, penambahan panas pada tekanan konstan di ruang bakar, serta ekspansi isentropik gas hasil pembakaran di turbin [1,2]. Siklus ini merupakan dasar analisis termodinamika pada pembangkit listrik tenaga gas modern [13,14].

Turbin gas beroperasi berdasarkan Siklus Brayton terbuka, yang terdiri dari tiga proses utama:

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) [1,2].



Gambar 1 Siklus Brayton Ideal

(Sumber: Boles, 2006)

Pada setiap komponen terjadi perubahan energi spesifik yang dapat dianalisis menggunakan persamaan entalpi. Kerja

kompresor, kerja turbin, serta kerja bersih siklus dihitung berdasarkan prinsip keseimbangan energi [1,2].

Kerja kompresor ( $W_c$ ) didefinisikan sebagai:

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

Keterangan :

$W_c$ : Kerja kompresor (kW atau kJ/s)

$\dot{m}_{air}$ : Laju aliran massa udara (kg/s)

$h_1$ : Entalpi udara masuk kompresor (kJ/kg)

$h_2$ : Entalpi udara keluar kompresor (kJ/kg)

Sementara itu, kerja turbin ( $W_t$ ) adalah:

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

Keterangan :

$W_t$ : Kerja turbin gas (kW atau kJ/s)

$\dot{m}_{flue\ bb}$ : Laju aliran massa gas bahan bakar (kg/s)

$h_3$ : Entalpi gas masuk turbin (kJ/kg)

$h_4$ : Entalpi gas keluar turbin (kJ/kg)

Kerja bersih siklus ( $W_{net}$ ) merupakan selisih kerja turbin dan kompresor:

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

Keterangan :

$W_{net}$ : Kerja bersih siklus PLTG (kW atau kJ/s)

Efisiensi termal ( $\eta_{th}$ ) dihitung sebagai perbandingan antara kerja bersih dengan energi panas masuk dari bahan bakar ( $Q_{in}$ ):

$$\eta_{thermal} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan :

$\eta_{thermal}$ : Efisiensi termal siklus PLTG (%)

$Q_{in}$ : Energi panas masuk dari bahan bakar (kW atau kJ/s)

Efisiensi termal didefinisikan sebagai perbandingan antara kerja bersih siklus dengan energi panas masuk dari bahan bakar, di mana energi panas masuk diperoleh dari laju aliran massa bahan bakar

dan nilai kalor bawah (*Lower Heating Value/LHV*) [1,2,5].

### Konsep Heat Loss / Exergy Destruction

Dalam siklus turbin gas, tidak seluruh energi panas yang berasal dari pembakaran bahan bakar dapat dikonversi menjadi kerja berguna. Sebagian energi hilang sebagai *heat loss* atau *exergy destruction* akibat adanya irreversibilitas proses termodinamika pada setiap komponen utama, seperti kompresor, ruang bakar, turbin, dan generator [1–3,6,13]. Kerugian energi ini umumnya dipengaruhi oleh fenomena gesekan, perpindahan panas tak terkendali, penurunan efisiensi isentropik komponen, serta irreversibilitas proses pembakaran [3,4,6,10].

Secara umum, neraca energi pada sistem turbin gas dapat dinyatakan sebagai:

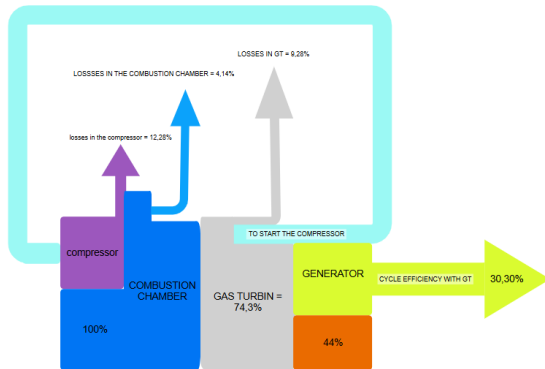
$$Q_{in} = W_{net} - Q_{loss} \quad (5)$$

di mana  $Q_{loss}$  merepresentasikan total kerugian energi yang tidak dapat dikonversi menjadi kerja bersih sistem. Dalam pendekatan lanjutan, kerugian energi ini dapat dikaitkan dengan *exergy destruction* yang mencerminkan tingkat irreversibilitas proses dan kehilangan potensi kerja berguna pada sistem [3,6,13].

Analisis *heat loss* dan *exergy destruction* sangat penting untuk mengidentifikasi komponen yang paling dominan menyumbang kerugian energi, khususnya pada ruang bakar dan kompresor yang secara umum memiliki tingkat irreversibilitas tertinggi pada siklus Brayton [3,4,12]. Informasi ini dapat dijadikan dasar dalam penyusunan strategi pemeliharaan dan pelaksanaan *major overhaul*, karena perbaikan kondisi komponen kritis terbukti mampu menurunkan kerugian energi dan meningkatkan efisiensi termal sistem secara keseluruhan [4,7,9,11].

### Konsep Diagram Sankey dalam Analisis Energi

Diagram Sankey merupakan diagram aliran energi yang menggambarkan proporsi energi *input*, *output*, dan *losses* secara visual dengan ketebalan panah yang sebanding dengan besar energi [5]. Diagram ini banyak digunakan dalam analisis sistem energi kompleks karena mampu memperlihatkan distribusi energi secara intuitif dan kuantitatif [5,8].



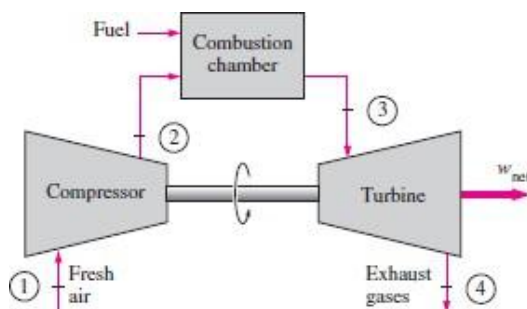
Gambar 2 Diagram Sankey

(Sumber: Perhitungan, 2025)

Dalam penelitian ini, Diagram Sankey digunakan untuk membandingkan distribusi energi kondisi *before* dan *after overhaul*, sehingga perubahan aliran energi dan penurunan *losses* pada masing-masing komponen dapat diidentifikasi dengan jelas [5,7,8].

### Efisiensi Termal, Distribusi Energi, dan Overhaul pada Turbin Gas

Efisiensi termal siklus Brayton dipengaruhi oleh rasio tekanan kompresor, temperatur masuk turbin (*Turbine Inlet Temperature*), serta kondisi aktual komponen mesin [1,2,14].



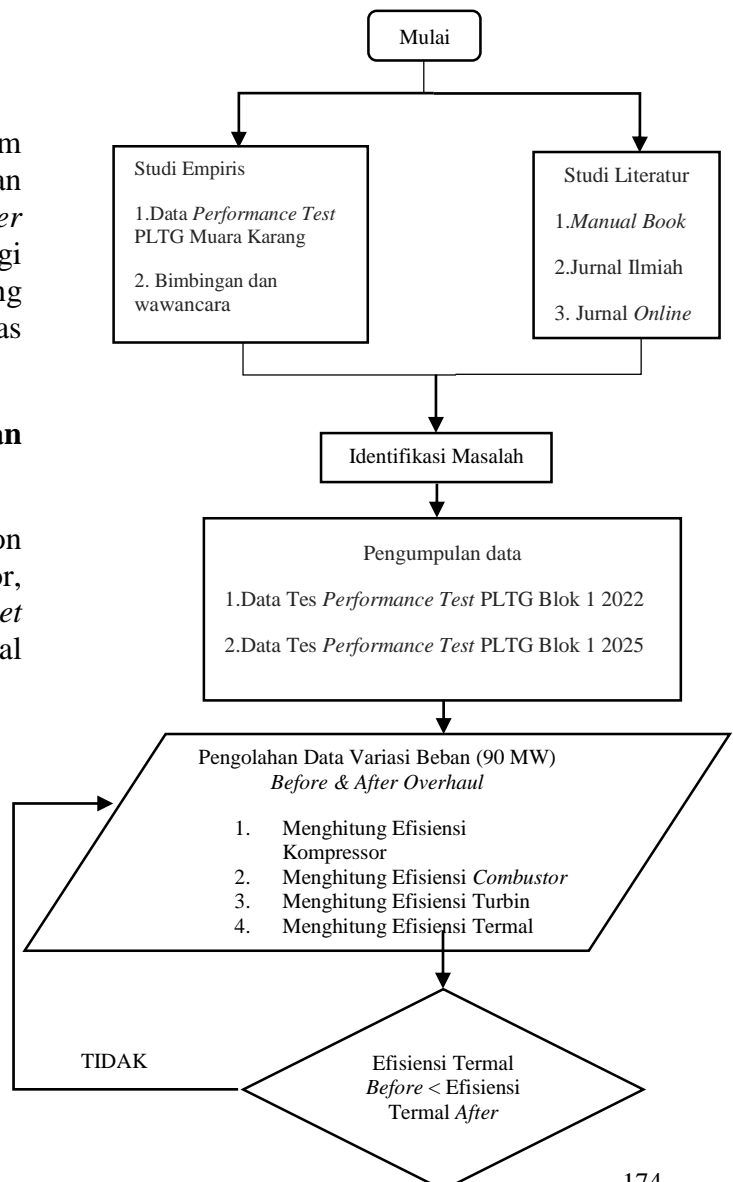
Gambar 3 Siklus *Open Cycle* PLTG

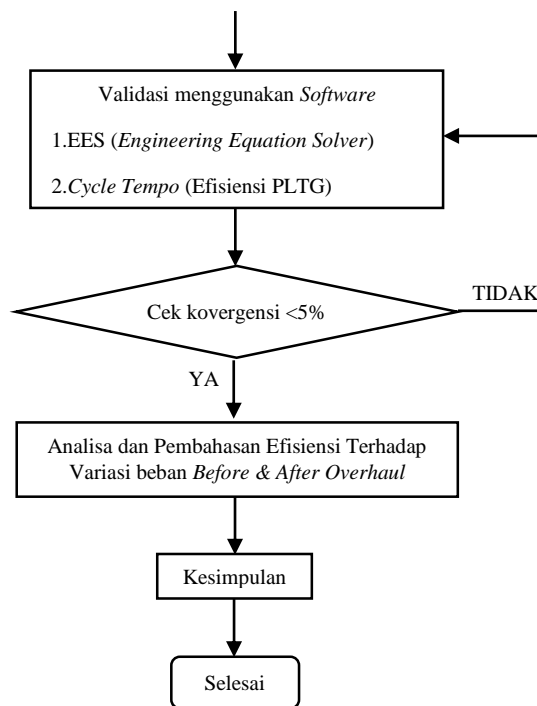
(Sumber: Cengel, 2008)

Degradasi performa kompresor akibat *fouling* dan penurunan kualitas pembakaran di ruang bakar merupakan penyebab utama menurunnya efisiensi termal turbin gas [3,4,6,10].

*Major overhaul* merupakan strategi pemeliharaan menyeluruh yang bertujuan memulihkan performa komponen melalui pembersihan, perbaikan, dan penggantian komponen kritis. Dampak *overhaul* tidak hanya terlihat dari peningkatan efisiensi termal secara numerik, tetapi juga dapat divisualisasikan melalui Diagram Sankey, di mana aliran energi menuju *losses* berkurang dan porsi energi berguna meningkat [7,9,11].

### Metode Penelitian





**Waktu dan Tempat.** Penelitian ini merupakan studi kuantitatif komparatif yang menggunakan data operasional aktual Turbin Gas Unit 1.2 PLTG Muara Karang sebelum dan sesudah pelaksanaan *major overhaul*. Pendekatan komparatif *before-after* ini umum digunakan untuk mengevaluasi dampak pemeliharaan terhadap kinerja termal turbin gas dan degradasi komponen [6,9,10,11]. Analisis difokuskan pada kondisi operasi beban maksimum 90 MW sebagai beban desain unit, sesuai dengan praktik evaluasi performa pembangkit tenaga gas [1,2,14].

**Tahapan Penelitian.** Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data operasional aktual, perhitungan termodinamika manual berdasarkan siklus Brayton terbuka, validasi hasil perhitungan menggunakan perangkat lunak analisis termal, serta pemetaan distribusi energi menggunakan Diagram Sankey [1,2,3,5]. Pendekatan ini sejalan dengan metode analisis kinerja turbin gas yang banyak digunakan dalam studi evaluasi efisiensi dan degradasi performa [6,7,9].

Tahap berikutnya adalah perhitungan termodinamika manual berdasarkan prinsip siklus Brayton terbuka. Pada tahap ini, energi pada tiap titik siklus dihitung menggunakan persamaan entalpi, kemudian ditentukan kerja kompresor ( $W_c$ ) dan kerja turbin ( $W_t$ ) untuk memperoleh kerja bersih siklus ( $W_{net}$ ). Selanjutnya, efisiensi termal siklus ( $\eta_{th}$ ) dihitung sebagai perbandingan antara kerja bersih dan energi panas masuk dari bahan bakar ( $Q_{in}$ ), sebagaimana dirumuskan dalam literatur termodinamika klasik dan modern [1,2]. Selain itu, dihitung pula kerugian energi (*heat loss/exergy destruction*) sebagai selisih antara energi masuk dan energi yang berhasil dikonversi menjadi kerja berguna, yang merepresentasikan irreversibilitas proses pada komponen utama [3,4,6,13].

Hasil perhitungan manual kemudian divalidasi menggunakan perangkat lunak *Cycle Tempo* dan *Engineering Equation Solver (EES)*. Validasi ini dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dan perhitungan manual, dengan batas deviasi yang diperbolehkan  $\leq 5\%$ , sesuai dengan praktik validasi model termodinamika pada analisis sistem turbin gas [6,7,12].

Tahap utama penelitian adalah pemetaan distribusi energi menggunakan Diagram Sankey. Pada tahap ini, energi input, energi berguna (kerja bersih), serta kerugian energi pada masing-masing komponen utama—kompresor, ruang bakar, turbin, dan generator/*exhaust*—divisualisasikan dalam bentuk aliran energi dengan ketebalan panah yang proporsional terhadap besarnya [5,8]. Diagram Sankey disusun untuk dua kondisi operasi, yaitu *before* dan *after overhaul*, sehingga perubahan distribusi energi dan penurunan *losses* akibat pemulihan kondisi komponen dapat diamati secara visual dan kuantitatif [5,7,9].

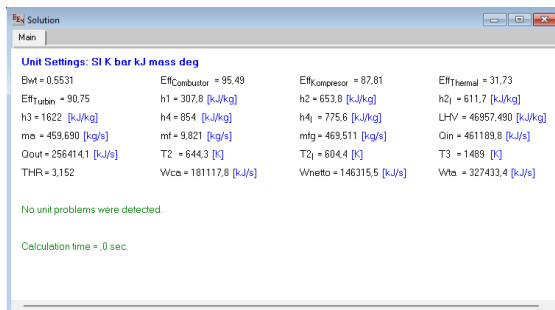
Tahap terakhir adalah analisis komparatif antara kondisi *before* dan *after overhaul*. Analisis ini bertujuan untuk

mengevaluasi sejauh mana pelaksanaan *overhaul* meningkatkan efisiensi termal unit serta mengurangi kerugian energi pada masing-masing komponen utama. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi komponen yang paling dominan menyumbang kerugian energi dan menjadi prioritas dalam strategi pemeliharaan berikutnya [3,4,7,10,11]. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan indikator numerik berupa efisiensi termal, tetapi juga memberikan visualisasi komprehensif mengenai aliran dan distribusi energi dalam sistem turbin gas [5,8].

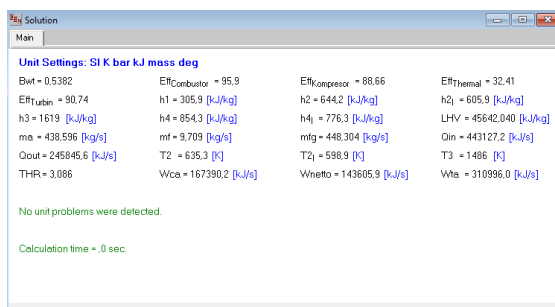
## Hasil dan Pembahasan

### Validasi Perhitungan

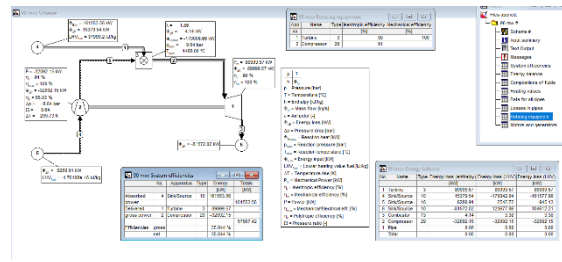
Perhitungan termodinamika manual divalidasi menggunakan perangkat lunak *Cycle Tempo* dan *Engineering Equation Solver (EES)*. Hasil validasi menunjukkan deviasi  $\leq 5\%$  terhadap data operasional aktual, sehingga model perhitungan dapat diandalkan dan data yang digunakan layak untuk analisis lebih lanjut.



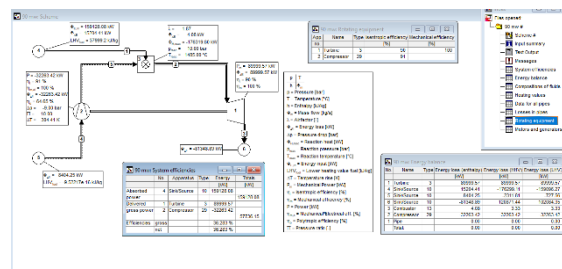
Gambar 4. Validasi EES *Before Overhaul* (Sumber: Perhitungan, 2025)



Gambar 5. Validasi EES *After Overhaul* (Sumber: Perhitungan, 2025)



Gambar 6. Validasi *Cycle Tempo Before Overhaul* (Sumber: Perhitungan, 2025)



Gambar 7. Validasi *Cycle Tempo Before Overhaul* (Sumber: Perhitungan, 2025)

### Efisiensi Termal dan *Heat Loss Before-After Overhaul*

Analisis pada beban maksimum 90 MW menunjukkan peningkatan efisiensi termal setelah pelaksanaan *major overhaul*. Efisiensi Termal (*Before Overhaul*)

- Laju alir bahan bakar:  $\dot{m}_{bb} = 5,89$  kg/s, LHV= 47.500 kJ/kg.

- Energi Masuk

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{fuel} \times LHV = 280.000 \text{ kJ/s}$$

- Efisiensi Thermal

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{\dot{Q}_{in}} \times 100\% = \frac{89,20}{280.000} \times 100\% = 31,91\%$$

- *Heat Loss*

$$Q_{loss} = Q_{in} - W_{net} = 190.750 \text{ kJ/s}$$

### Efisiensi Termal (*Before Overhaul*)

- Laju alir bahan bakar:  $\dot{m}_{bb} = 5,85$  kg/s, LHV= 47.500 kJ/kg.

- Energi Masuk

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{fuel} \times LHV = 277.800 \text{ kJ/s}$$

- Efisiensi Thermal

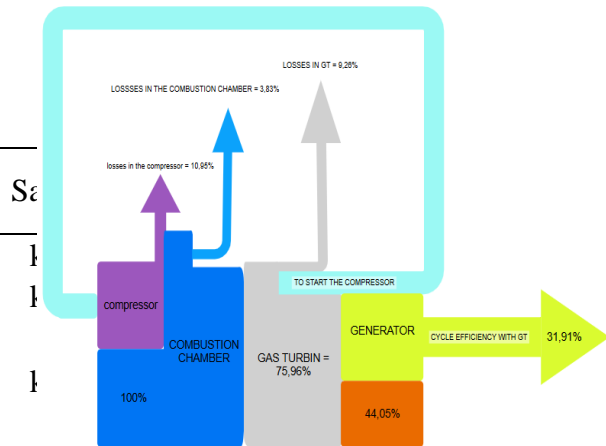
$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{\dot{Q}_{in}} \times 100\% = 32,41\%$$

- *Heat Loss*

$$Q_{loss} = Q_{in} - W_{net} = 187.800 \text{ kJ/s}$$

**Tabel 1.** Ringkasan Efisiensi Termal dan Distribusi Energi

Kondisi	Overhaul	
	Before	After
$Q_{in}$	280.000	277.800
$W_{net}$	89.250	90.000
$\eta_{th}$	31,91	32,41
$Q_{loss}$	190.750	187.800
Kompresor	10,96	11,34
Ruang Bakar	3,83	4,1
Turbin	0,26	0,25
Generator/Exhaust	55	53,9



Gambar 8 Sankey Diagram Beban 90 MW Before Overhaul (Sumber: Perhitungan, 2025)

- Efisiensi termal naik dari 31,91% → 32,41% (kenaikan 0,50%).
- Energi masuk ( $Q_{in}$ ) berkurang karena pembakaran lebih efisien.
- Total *losses* menurun sekitar 2.950 kJ/s.
- Kompresor dan ruang bakar tetap menjadi penyumbang kerugian utama.

### Analisis Distribusi Energi dengan Diagram Sankey

Distribusi energi divisualisasikan menggunakan Diagram Sankey untuk kondisi *before* dan *after overhaul*.

#### a. Before Overhaul

Pembagian  $Q_{loss}$  per komponen (contoh):

- Kompresor: 12,19% dari  $Q_{in} \Rightarrow 0,1219 \times 283.750 = 34.589$  kJ/s
- Ruang bakar: 4,51%  $\Rightarrow 12.797$  kJ/s
- Turbin: 0,28%  $\Rightarrow 795$  kJ/s
- Generator/Exhaust (sisa): 51,30%  $\Rightarrow 145.569$  kJ/s

Jumlah komponen  $\approx 193.750$  kJ/s (sesuai  $Q_{loss}$ ).

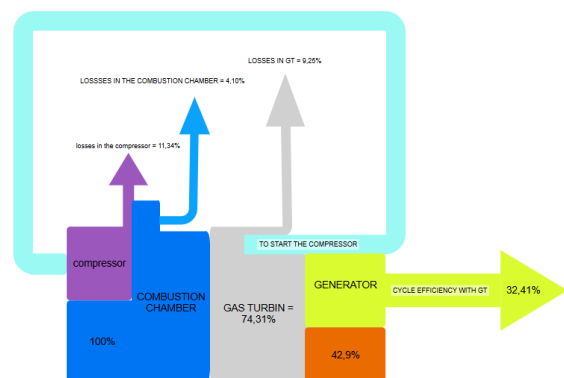
Efisiensi siklus sebesar 31,91%. Kerugian utama terjadi pada kompresor (10,96%) dan ruang bakar (3,83%), sementara turbin relatif kecil (0,26%). Kerugian generator/exhaust tetap dominan karena sifat siklus Brayton terbuka.

#### b. After Overhaul

Pembagian  $Q_{loss}$  per komponen (contoh):

- Kompresor: 11,34%  $\Rightarrow 31.469$  kJ/s
- Ruang bakar: 4,10%  $\Rightarrow 11.378$  kJ/s
- Turbin: 0,25%  $\Rightarrow 694$  kJ/s
- Generator/Exhaust (sisa): 51,88%  $\Rightarrow 143.960$  kJ/s

Jumlah komponen  $\approx 187.500$  kJ/s (sesuai  $Q_{loss}$ ).

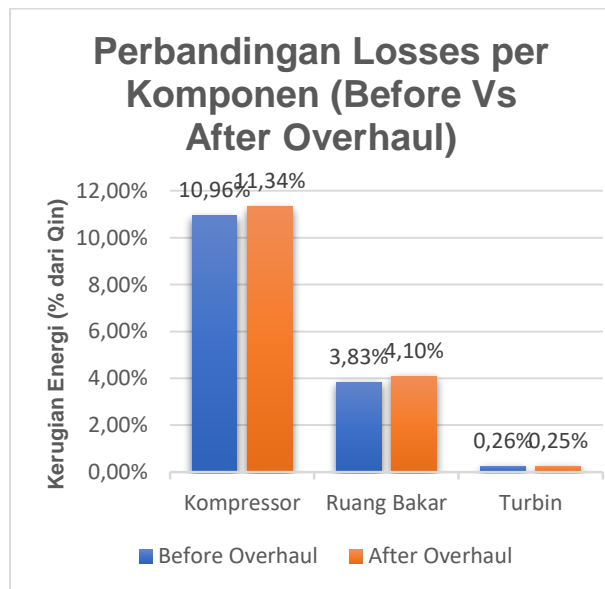


Gambar 9 Sankey Diagram Beban 90 MW After Overhaul (Sumber: Perhitungan, 2025)

Setelah overhaul, efisiensi meningkat menjadi 32,41%. Losses pada kompresor sedikit berubah, sedangkan *losses* ruang bakar turun tipis. Panah menuju *output* kerja (generator) menebal, menandakan peningkatan energi berguna.

Diagram Sankey memperlihatkan perbedaan ketebalan panah: *losses* pada kompresor dan ruang bakar mengecil, sementara *output* kerja meningkat. Hal ini menegaskan peran *overhaul* dalam memperbaiki distribusi energi.

### Grafik Perbandingan Losses per Komponen



Gambar 10 Diagram Perbandingan *Losses* per Komponen (*Before Vs After Overhaul*) (Sumber: Perhitungan, 2025)

- Kompresor tetap menjadi penyumbang kerugian terbesar, sekitar 11% dari *Qin*.
- Ruang bakar menyumbang  $\pm 4\%$  dan tidak banyak berubah, namun cenderung lebih stabil setelah *overhaul*.
- Turbin hanya menyumbang 0,25% dan relatif konstan.

Secara total, *losses* menurun, sehingga efisiensi termal meningkat.

### Implikasi Analisis

Penelitian ini menunjukkan bahwa *major overhaul* efektif meningkatkan efisiensi termal turbin gas PLTG Muara Karang. Kenaikan absolut sebesar 0,50% pada beban puncak 90 MW berarti penghematan energi sekitar 2.950 kJ/s yang sebelumnya hilang sebagai kerugian.

Implikasi praktisnya adalah:

1. Kompresor dan ruang bakar merupakan komponen kritis yang harus menjadi prioritas perawatan, karena menyumbang kerugian terbesar.
2. Diagram Sankey terbukti efektif dalam memvisualisasikan distribusi energi, sehingga dapat digunakan sebagai alat bantu evaluasi kinerja dan prioritas *maintenance*.
3. Meskipun *losses* terbesar tetap berasal dari generator/*exhaust* (lebih dari 50%), sifatnya *inherent* pada siklus Brayton terbuka dan sulit ditekan melalui *overhaul*. Fokus perbaikan paling efektif adalah pada kompresor (*fouling*) dan ruang bakar (irreversibilitas pembakaran).

### Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis pengaruh *major overhaul* terhadap efisiensi termal Turbin Gas Unit 1.2 PLTG Muara Karang dengan pendekatan siklus Brayton dan visualisasi energi melalui Diagram Sankey. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi termal meningkat dari 31,91% sebelum *overhaul* menjadi 32,41% sesudah *overhaul*, yang berarti terjadi peningkatan sebesar 0,50%. Peningkatan ini mengindikasikan keberhasilan *overhaul* dalam memulihkan performa unit serta mengurangi kerugian energi total sekitar

2.950 kJ/s. Kompresor dan ruang bakar diidentifikasi sebagai komponen dengan kontribusi terbesar terhadap kerugian energi, sehingga disarankan menjadi fokus utama pada program pemeliharaan preventif berikutnya. Selain itu, penggunaan Diagram Sankey terbukti efektif dalam memvisualisasikan distribusi energi dan membantu pengambilan keputusan operasional. Secara keseluruhan, *major overhaul* dapat disimpulkan sebagai strategi pemeliharaan yang efektif dalam meningkatkan efisiensi termal dan kinerja sistem turbin gas. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar analisis diperluas dengan mempertimbangkan variasi beban operasi dan integrasi sistem *heat recovery* guna memperoleh gambaran yang lebih komprehensif terhadap efisiensi keseluruhan siklus.

## Referensi

- [1] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach, 8th ed.* New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015
- [2] Moran, M. J., Shapiro, H. N., & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics 9th Edition*
- [3] Martín-Aragón, J., & Valdés, M. (2014). *A method to determine the economic cost of fouling of gas turbine compressors.* *Applied Thermal Engineering*, 69(1–2), 261–266.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.051>
- [4] Ogbonnaya, E. A. (2011). *Gas Turbine Performance Optimization Using Compressor Online Water Washing Technique.* *Engineering*, 03(05), 500–507.  
<https://doi.org/10.4236/eng.2011.35058>
- [5] Qiao, Y., Zhu, L., Cao, H., Liu, Z., Wang, G., & Meng, F. (2025). *Sankey diagram mapping of greenhouse gas emissions in road infrastructure projects: A cradle-to-laid perspective.* *Sustainable Cities and Society*, 130.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106614>
- [6] Zhang, J., Li, J., & Li, X. (2025). *An agent composed of data model and thermodynamic model for multi-component degradation identification of gas turbine online.* *Energy*, 335.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138245>
- [7] Park, Y. K., Kang, D. W., Jeong, J. H., & Kim, T. S. (2024). *A novel model-based diagnostics for identifying component degradations in gas turbines for power generation.* *Case Studies in Thermal Engineering*, 64.  
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105528>
- [8] Ridwan, M. (2025). Analisis Efisiensi Termal PLTGU Muara Karang Blok 2 Menggunakan Sankey Diagram pada Beban 135 MW. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 14(2).
- [9] Purba, J. H., & Yuwana, F. A. (2024). Analisis efisiensi gas turbine unit 2 sebelum dan sesudah *overhaul* di PLTGU Tanjung Uncang. *Jurnal Teknologi dan Riset Terapan (JATRA)*, 6(1), 1–6.  
<https://doi.org/10.30871/jatra.v6i1.7033>
- [10] Kurz, R., Brun, K., Pinelli, M., & Suman, A. (2024). *Status of Gas Turbine Performance Degradation (GT2024-122216).* *ASME Turbo Expo 2024 Proceedings.*  
<https://doi.org/10.1115/GT2024-122216>
- [11] Firdaus, N., Abdul Samat, H., & Prasetyo, B. T. (2023). *Maintenance strategies and energy efficiency: A review.* *Journal of Quality in Maintenance Engineering.*  
<https://doi.org/10.1108/JQME-06-2021-0046>

- [12] Qiao, Y., Zhu, L., Cao, H., Liu, Z., Grigore, R., et al. (2024). *Enhancing the energy performance of a gas turbine component of a high-efficiency cogeneration plant*. *Energies*, 17(19), 4860. <https://doi.org/10.3390/en17194860>
- [13] Altarawneh, O. R., Alsarayreh, A. A., Al-Falahat, A. M., Al-Kheetan, M. J., & Alrwashdeh, S. S. (2022). *Energy and exergy analyses for a combined cycle power plant in Jordan*. *Case Studies in Thermal Engineering*, 31, 101852. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101852>
- [14] Motamed, M. A., Genrup, M., & Nord, L. O. (2024). *Part-load thermal efficiency enhancement in gas turbine combined cycles by exhaust gas recirculation*. *Applied Thermal Engineering*, 244, 122716. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122716>
- [15] Park, Y. K., Kang, D. W., Jeong, J. H., & Kim, T. S. (2024). *A novel model-based diagnostics for identifying component degradations in gas turbines for power generation*. *Case Studies in Thermal Engineering*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105528>