

EVALUASI EKSERGI TURBIN GAS SEBELUM DAN SESUDAH OVERHAUL COMBUSTOR DI PT. X

Dianta Mustofa Kamal^{1*}, dan Ahmad Bustomi²

¹Program Studi Magister Terapan Teknologi Manufaktur, Politeknik Negeri Jakarta,
Kampus UI Depok, Jawa Barat, Indonesia

² Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta,
Kampus UI Depok, Jawa Barat, Indonesia

*E-mail: dianta@pnj.ac.id

Abstrak

Improving the efficiency and performance of gas turbine systems in power plants is essential to ensure optimal energy conversion and operational reliability. This study evaluates the impact of combustor inspection—carried out as an overhaul procedure—on the exergy performance of a gas turbine. The analysis focuses on five key parameters: heat rate, thermal efficiency, specific fuel consumption, exergy efficiency, and exergy destruction across the compressor, combustor, and turbine. Secondary operational data from a 170 MW gas turbine unit operating between February 2022 and January 2023 were analyzed using both energy and exergy approaches. The results show that in December 2022, after the combustor overhaul, the gas turbine achieved its highest thermal efficiency of 37.48%, lowest heat rate of 2,297.86 Kcal/kWh, and lowest specific fuel consumption of 0.1804 kg/kWh. Additionally, exergy efficiency increased to 38.41%, while exergy destruction in the compressor, combustor, and turbine decreased significantly to 127,857.67 kW, 232,420.96 kW, and 134,187.11 kW, respectively. This study concludes that the overhaul of the combustor area significantly improves the thermodynamic performance of the gas turbine system. Exergy efficiency increased by 7.09%, thermal efficiency by 7.79%, while the heat rate and fuel consumption decreased by 87.07 Kcal/kWh and 0.0408 kg/kWh, respectively. These findings are consistent with the second law of thermodynamics, which states that reducing system irreversibility leads to higher energy conversion efficiency.

Kata kunci: combustor inspection, exergy, thermal efficiency, heat rate, specific fuel consumption

1. Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga panas (thermal power plant) merupakan jenis pembangkit yang memanfaatkan energi panas untuk menghasilkan energi listrik. Meskipun demikian, sistem pembangkit ini menghadapi berbagai tantangan dalam menjaga stabilitas dan kinerja operasionalnya, terutama pada komponen utama seperti turbin gas. Salah satu upaya penting untuk menjaga kualitas dan mencegah kerusakan pada turbin gas adalah dengan melakukan perawatan secara berkala. Jenis perawatan yang umum dilakukan mencakup preventive maintenance, predictive maintenance, dan overhaul [1].

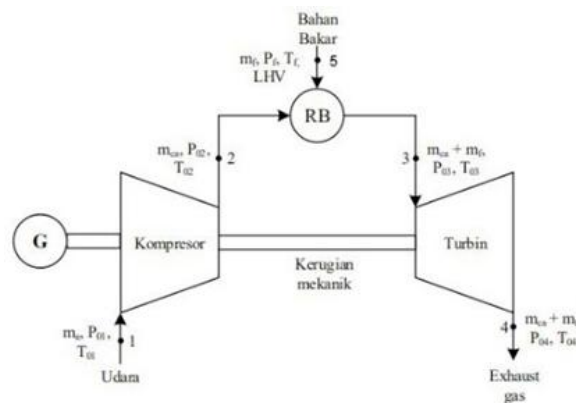
Penurunan performa pada sistem turbin gas umumnya ditandai dengan penurunan efisiensi termal secara signifikan. Berdasarkan hasil uji performa pada tahun 2022, efisiensi termal turbin gas di PT. X menunjukkan tren penurunan yang cukup mencolok. Pada bulan November 2022, efisiensi termal tercatat hanya sebesar 29,70%, atau turun sebesar 7,64% dibandingkan dengan capaian tahun sebelumnya yang mencapai 37,34% [2]. Penurunan efisiensi termal ini mengindikasikan bahwa turbin gas membutuhkan lebih banyak bahan bakar untuk menghasilkan daya listrik yang sama, yang pada akhirnya meningkatkan kerugian energi dalam sistem.

Menurut Boyce (2001), efisiensi termal ideal untuk sistem Gas Turbine Generator (GTG) berkisar antara 30% hingga 46%, dengan kapasitas beban mulai dari 3 MW hingga 480 MW [3]. Oleh karena itu, untuk mengembalikan kinerja sistem turbin gas yang telah melampaui 12.000 Equivalent Operating Hours (EOH), diperlukan tindakan perawatan berupa inspeksi dan overhaul pada area combustor. Prosedur combustor inspection dilakukan untuk memeriksa dan mengevaluasi kondisi komponen-komponen ruang bakar seperti fuel nozzle, cross-flame tube, igniter, dan transition piece. Proses ini umumnya memerlukan penghentian operasi jangka pendek guna memastikan keandalan sistem secara keseluruhan [4]. Namun demikian, studi yang secara khusus menganalisis pengaruh overhaul combustor terhadap parameter eksergi dan performa termal secara simultan masih terbatas, khususnya di lingkungan pembangkit domestik.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh inspeksi combustor terhadap efisiensi eksergi dan efisiensi thermal sistem turbin gas di PT. X, dengan menggunakan pendekatan hukum kedua termodinamika.

2. Metodologi

Penelitian ini didasarkan pada data operasional sekunder dari sistem turbin gas selama periode 10 bulan dengan beban tetap sebesar 170 MW. Analisis kinerja turbin gas dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan, yaitu analisis energi dan analisis eksergi. Analisis energi mengacu pada hukum pertama termodinamika, yang menghitung selisih antara energi yang masuk dan energi yang keluar dari suatu sistem. Sementara itu, analisis eksergi didasarkan pada hukum kedua termodinamika, yang memperhitungkan kerugian akibat entropi serta kualitas energi yang tersedia untuk melakukan kerja [5]. Dengan memanfaatkan kedua metode ini, performa turbin gas dapat dievaluasi secara lebih menyeluruh, mencakup aspek efisiensi, kerugian energi, dan kualitas energi dalam sistem.



Gambar 1. Logo Jurnal Simpul Inovasi

Pemrosesan data dilakukan secara manual dengan menganalisis lima titik kondisi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 Diagram Blok Turbin Gas. Untuk siklus ideal, digunakan siklus Brayton dengan asumsi aliran berada dalam kondisi tunak (steady state). Perhitungan efisiensi termal, heat rate, dan konsumsi spesifik bahan bakar dilakukan dengan menggunakan rumus-rumus yang merujuk pada ASME PTC 22 (American Society of Mechanical Engineers Performance Test Codes). Data yang diperoleh digunakan untuk menghitung nilai entalpi, laju aliran massa bahan bakar, performa sistem, serta analisis eksergi pada turbin gas. Hasil perhitungan kemudian disajikan dalam bentuk grafik batang (column graph) yang menggambarkan variasi data dalam waktu 10 bulan.

2.1 Pendekatan Energi

Pendekatan energi yang didasarkan pada hukum pertama termodinamika merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem pembangkit listrik berbahan bakar gas. Pendekatan ini mengasumsikan bahwa sistem bekerja dalam kondisi tunak dan mengikuti siklus ideal Brayton. Dengan demikian, pemodelan matematis dapat dilakukan melalui keseimbangan energi (energy balance) pada setiap komponen utama, yaitu kompresor, ruang bakar, dan turbin [7]. Dengan mengetahui parameter operasi seperti tekanan, suhu, dan laju aliran massa pada setiap komponen, maka efisiensi termal, daya keluaran, dan konsumsi bahan bakar dari sistem dapat dihitung secara akurat [7].

Kerja kompresor:

$$\dot{W}_{Kompressor} = \dot{m}_{Udara}(h_2 - h_1) \quad (1)$$

Kerja turbin :

$$\dot{W}_{Turbin Gas} = (\dot{m}_{Udara} - \dot{m}_{Bahan bakar})(h_3 - h_4) \quad (2)$$

Laju Aliran bahan bakar :

$$\dot{m}_{bb} = \rho \dot{v} \quad (3)$$

Kalor masuk :

$$Q_{in} = \dot{m}_f \times LHV \quad (4)$$

Laju Aliran Masa Gas :

$$\dot{m}_g = \dot{m}_b \times \dot{m}_u \quad (5)$$

Efisiensi thermal :

$$\eta_{th} = \frac{W_{nett}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (6)$$

Specific Fuel Consumption:

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{W_{nett}} \quad (7)$$

Heat Rate:

$$HR = \frac{\dot{Q}_{in}}{W_{nett}} \quad (8)$$

2.2 Pendekatan Eksergi

Pendekatan eksergi merupakan metode yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja suatu sistem termodinamika berdasarkan hukum kedua termodinamika. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi sumber-sumber ireversibilitas, kerugian energi, dan ketidakefisienan yang terjadi di dalam sistem. Eksergi merupakan ukuran kualitas energi yang tersedia untuk melakukan kerja.

Eksergi terdiri atas empat komponen utama, yaitu eksergi fisik, eksergi kinetik, eksergi potensial, dan eksergi kimia. Selama tidak terdapat pengaruh dari reaksi nuklir, medan magnet, arus listrik, atau tegangan permukaan, maka total eksergi sistem dianggap konstan [6]. Dalam kajian ini, eksergi kinetik dan potensial diabaikan karena kontribusinya relatif kecil dibandingkan komponen lainnya. Eksergi fisik berkaitan dengan perbedaan suhu, tekanan, dan volume antara sistem dan lingkungan sekitarnya [6]. Pada titik acuan (state 1), nilai eksergi fisik dianggap nol karena kondisinya setara dengan kondisi lingkungan. Eksergi fisik pada lima titik keadaan dihitung menggunakan kondisi gas ideal metana (CH_4) yang ditunjukkan pada persamaan 10 dan 11 [6]. Kehancuran eksergi pada tiap komponen ditunjukkan pada persamaan 12 hingga persamaan 14 [8]. Efisiensi eksergi siklus ditunjukkan pada persamaan 15.

$$E_{PH} = \dot{m}\{(h_k - h_0) - T_0(S_k - S)\} \quad (9)$$

$$E_{PH} = \dot{m} \frac{R}{M} T_0 \ln \frac{P_k}{P_0} \quad (10)$$

$$E_{CH} = \dot{m}_f e \frac{CH}{M} \quad (11)$$

Kompresor:

$$E_d = E_1^{tot} + \dot{W}_C - E_2^{PH} \quad (12)$$

Combustor:

$$E_d = E_5^{tot} + E_2^{tot} - E_3^{tot} \quad (13)$$

Turbin:

$$E_d = E_3^{tot} - (E_4^{tot} + \dot{W}_T - \dot{W}_C) \quad (14)$$

$$\mu_{ek} = \frac{W_t - W_c}{E_5^{tot}} \times 100\% \quad (15)$$

3. Hasil dan pembahasan

Pada bagian ini akan dijelaskan hasil perhitungan dari performa turbin gas dengan periode waktu 10 bulan. Kondisi sebelum dan sesudah dilakukan combustor inspection dengan overhaul dilakukan pada area combustor pada bulan Desember, dengan beban sebesar 170 MW.

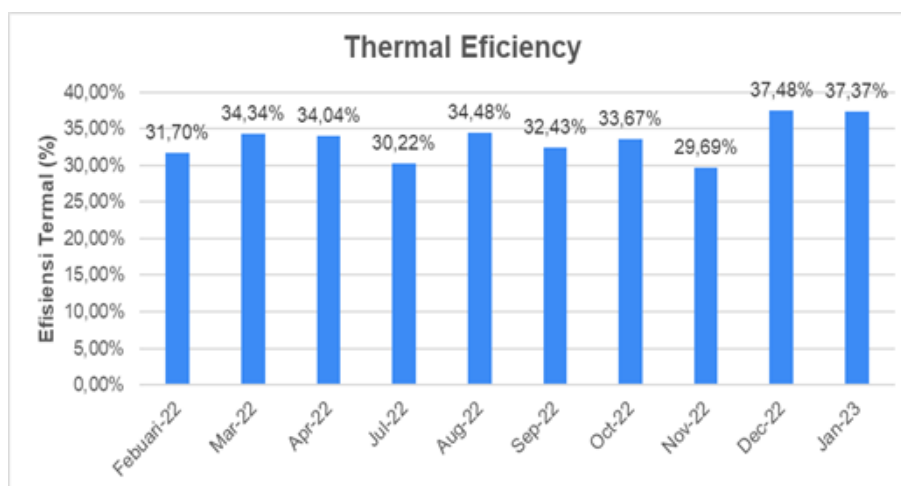
Tabel 1. Hasil Perhitungan Kerja kompresor, Kerja turbin, Kerja netto, Kalor bahan bakar, Laju aliran bahan bakar

Bulan	W kompresor (kj/s)	W turbin (kj/s)	Wnetto (kj/s)	Qin (kj/s)	Mfuel (kg/s)
Februari	250.402,06	445.912,12	195.510,06	531.092.514,8	11,24
Maret	241.899,40	443.300,50	201.401,10	505.177.366,6	11,03
April	241.363,23	442.279,72	200.916,49	508.359.884,2	10,75
Juli	247.186,58	440.603,90	193.417,32	551.209.202,9	11,73
Agustus	240.352,73	443.510,25	203.157,52	507.509.371,3	10,71
September	251.107,00	443.346,89	192.239,89	510.497.965,6	11,09
Oktober	245.030,39	443.843,63	198.813,24	505.346.133,0	11,10
November	243.690,18	438.296,70	194.606,52	564.778.533,0	11,96
Desember	237.986,03	447.876,35	209.686,54	481.830.887,6	10,51
Januari	238.788,22	447.139,70	209.295,12	482.362.114,4	10,55

Tabel 2. Efisiensi Eksergi per bulan

BULAN	EFISIENSI EKSERGI
FEBRUARI 2022	33,49%
MARET 2022	35,14%
APRIL 2022	35,84%
JULI 2022	31,74%
AGUSTUS 2022	36,01%
SEPTEMBER 2022	34,63%
OKTOBER 2022	34,49%
NOVEMBER 2022	31,32%
DESEMBER 2022	38,41%
JANUARI 2023	38,20%

3.1. Analisis performa pada sistem turbin gas Efisiensi termal



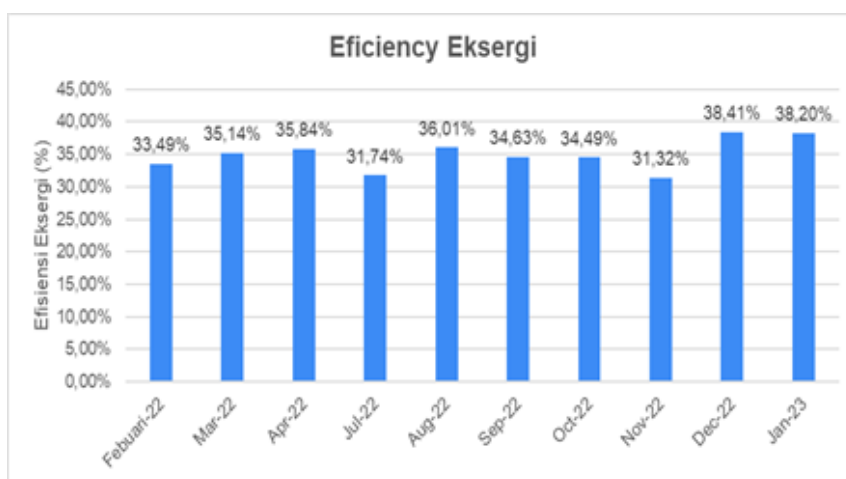
Gambar 2. Efisiensi Termal

Pada Gambar 2 menunjukkan grafik efisiensi termal setelah overhaul combustor. Dari gambar tersebut terlihat bahwa terjadi peningkatan efisiensi termal mencapai 7,79% dengan efisiensi termal terendah 29,69% dan terbesar 37,48%. Hal

ini dipengaruhi oleh perubahan daya netto turbin gas dan kalor bahan bakar masuk pada turbin, dengan nilai perbandingan daya netto turbin terbesar pada bulan November dengan bulan Desember, dengan daya netto turbin gas yang meningkat dari 194.606 KJ/s menjadi 209.686 KJ/s sementara kalor bahan bakar masuk pada turbin gas mengalami penurunan dari 655.771 KJ/s menjadi 559.459 KJ/s.

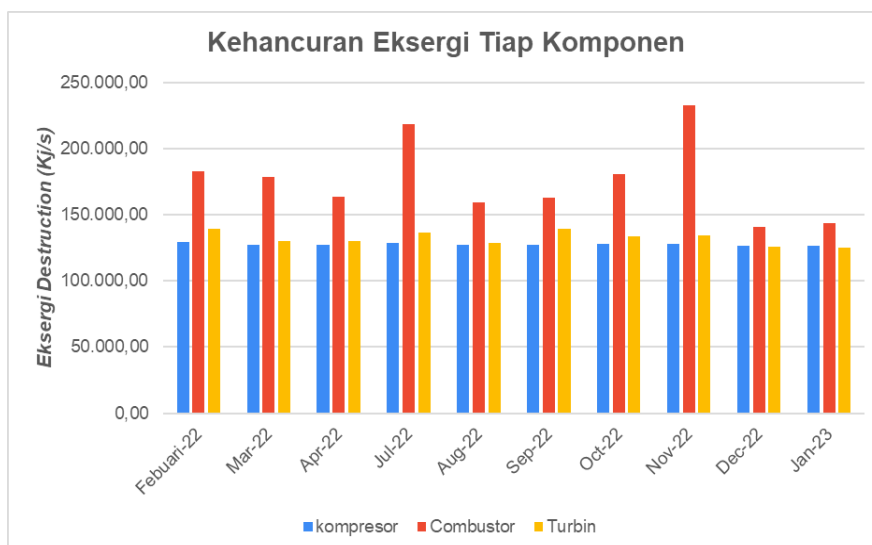
3.2. Efisiensi eksergi

Pada Gambar 3 di bawah, menunjukkan bahwa efisiensi eksergi mengalami peningkatan setelah combustor inspection di bulan Desember. Hal ini disebabkan oleh faktor yang mempengaruhi kenaikan efisiensi eksergi adalah kerja netto turbin gas meningkat dari 438.296 KJ/s pada bulan November 2022 menjadi 447.876 KJ/s pada bulan berikutnya setelah inspeksi combustor. Pada saat bersamaan terjadi penurunan kerja kompresor dari 243.690 KJ/s menjadi 237.986 KJ/s. Hal ini membuktikan bahwa dengan memperbaiki dan membersihkan komponen combustor inspection seperti fuel nozzles, combustor basket, dan transition pieces mampu meningkatkan proses pembakaran bahan bakar secara signifikan.



Gambar 3. Efisiensi eksergi

3.3. Kehancuran eksergi dan efisiensi tiap komponen

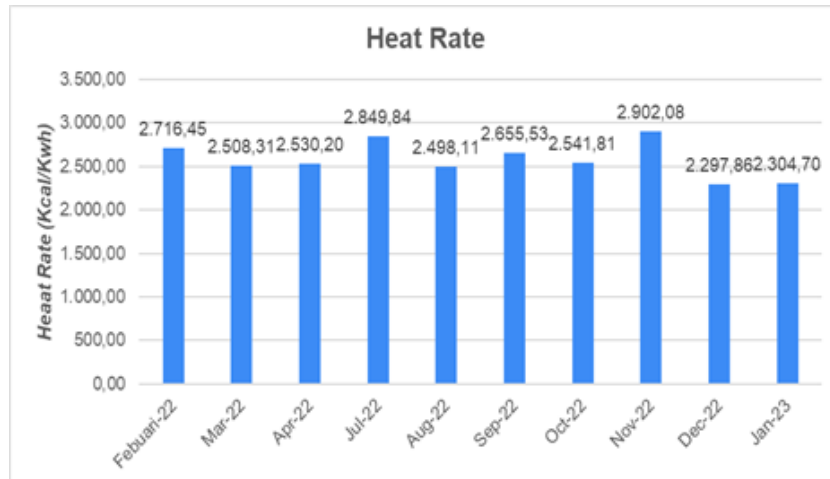


Gambar 4. Kehancuran eksergi

Gambar 4 menunjukkan adanya penurunan kehancuran eksergi pada setiap komponen setelah dilakukan inspeksi combustor. Kehancuran eksergi terbesar pada combustor di bulan November 2022 dengan nilai 232.421 kJ/s dan menurun

pada bulan Desember menjadi 140.570 kJ/s dengan penurunan sebesar 91.851 kJ/s. Penurunan ini dipengaruhi oleh nilai eksergi total. Faktor yang mempengaruhi yaitu penggantian pada combustor basket dan fuel nozzle.

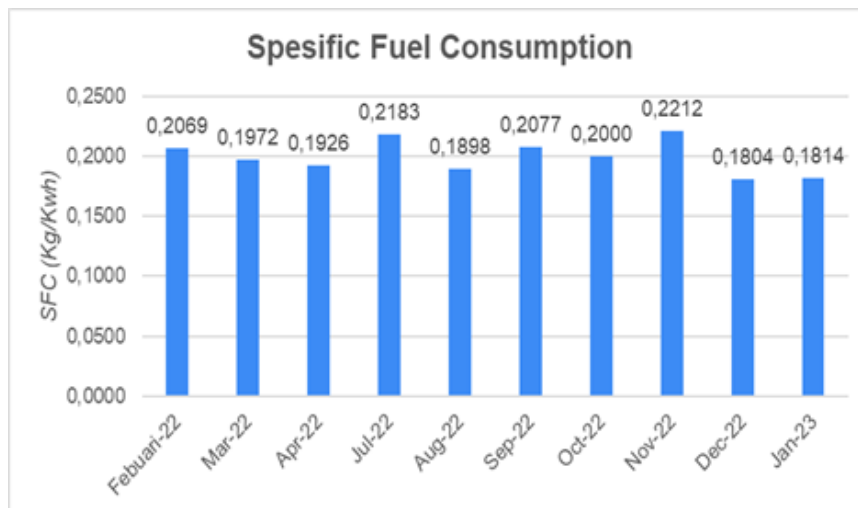
3.4. Heat Rate



Gambar 5. Heat rate

Gambar 5 menunjukkan perubahan energi yang diperlukan untuk menghasilkan satu kWh listrik dari turbin gas sepanjang tahun. Terlihat bahwa pada bulan November terjadi lonjakan energi yang signifikan sebesar 2.902 Kcal/kWh. Setelah melewati proses *combustor inspection* yang dilakukan pada sistem turbin gas, pada bulan Desember energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu kWh listrik menurun menjadi 2.298 Kcal/kWh dipengaruhi daya netto turbin gas dan kalor bahan bakar masuk pada turbin, dengan nilai perbandingan daya netto turbin.

3.5. Specific Fuel Consumption (SFC)



Gambar 6. Specific fuel consumption

Konsumsi bahan bakar per kWh listrik untuk menghasilkan daya 170 MW berkurang setelah dilakukan combustor inspection. Hal ini menunjukkan bahwa overhaul berpengaruh terhadap efisiensi bahan bakar. Konsumsi bahan bakar tertinggi terjadi pada bulan November sebesar 0,2212 kg/kWh dan terendah pada bulan Desember sebesar 0,1804 kg/kWh.

Penurunan sebesar 0,0408 kg/kWh disebabkan oleh peningkatan daya netto yang dihasilkan oleh turbin gas dan penghematan bahan bakar.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis eksperimental, dapat disimpulkan bahwa tindakan overhaul pada area combustor secara signifikan meningkatkan kinerja termodinamika sistem turbin gas. Efisiensi eksergi meningkat sebesar 7,09%, efisiensi termal sebesar 7,79%, sementara heat rate dan konsumsi bahan bakar masing-masing menurun sebesar 87,07 Kcal/kWh dan 0,0408 kg/kWh. Hal ini selaras dengan prinsip termodinamika kedua yang menyatakan bahwa pengurangan irreversibilitas sistem akan meningkatkan efisiensi konversi energi.

Daftar Pustaka

- [1] T. H. M. Sunarwo, "Analisa Efisiensi Turbin Gas Unit 1 Sebelum dan Setelah Overhaul Combustor Inspection di PT PLN (Persero) Sektor Pembangkitan PLTGU Cilegon," *J.Tek. Energi*, vol. 12, no. 2, pp. 50–57, 2016.
- [2] S. K. ARIF, "Analisis Termodinamika Unjuk Kerja Turbin Gas Pltgu Gt 2 . 3 Di Pt Pjb Up Gresik Sebelum Dan Setelah Combustion Inspection Analisis Termodinamika Unjuk Kerja Turbin Gas Pltgu Gt 2 . 3 Di Pt Pjb Up Gresik Sebelum Dan Setelah Combustion Inspection," 2018.
- [3] I. Yogaswara, Supari, and Harmini, "Analisis Efisiensi Operasional Sistem Pltgu Unit Gtg 2.3 Di Pt Indonesia Power Semarang Power Generation Unit," *Tek. Mesin*, vol. Vol 890- 93, pp. 1–10, 2020.
- [4] R. Prasetyo, P. Bismantolo, and A. Suandi, "MAINTENANCE PADA COMBUSTION SECTION TURBIN GAS UNIT 2 PLTGU Maintenance on the Combustion Section Gas Turbine of Unit 2 Gas & Steam Power Plant PLTGU," vol. 5, no. 2, pp. 9–18, 2021.
- [5] H. N. S. Michael J Moran, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, West Sussex: John & Sons, Inc, 2014.
- [6] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. Moran, "Thermal Design and Optimization-John Wiley & Sons." pp. 1–542, 1996.
- [7] M. J. Moran and H. N. SHAPIRO, "Fundamentals of Engineering Thermodynamics. [sl] John Wiley & Sons." Inc, 2006.
- [8] I. Shanti, G. Nugroho, and Sarwono, "Analisa Termoekonomi Pada Sistem Kombinasi Turbin Gas – Uap PLTGU PT PJB Unit Pembangkitan Gresik," *J. Tek. Pomits*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2012.