

Analisis Eksergi Turbin Gas Setelah *Overhaul Combustor* Blok 4 Di Pt. X

Ahmad Althof Tjoteng¹, Dianta Mustafa Kamal², dan Belyamin³

^{1,2} Program Studi Pembangkit Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI Depok, 16424

³ Magister Terapan Rekayasa Teknologi Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI Depok, 16424

E-mail address: ahmad.althoftjoteng.tm19@mhs.w.pnj.ac.id

Abstrak

Salah satu cara untuk meningkatkan kembali efisiensi dan kinerja sistem turbin gas pada pembangkit tenaga listrik adalah dengan melakukan pemeliharaan. Jenis pemeliharaan yang dilakukan ialah combustor inspection yang dimana dilakukan overhaul pada area combustor. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh combustor inspection terhadap eksergi dan performa turbin gas. Parameter yang digunakan untuk menganalisis pengaruh combustor inspection adalah heat rate, efisiensi termal, specific fuel consumption, efisiensi eksergi dan kehancuran eksergi tiap komponen. Oleh karena itu, penulis berusaha untuk menghitung serta menganalisis performa dan eksergi turbin gas pada aktivitas combustor inspection. Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini adalah data operasi turbin gas berdasarkan beban 170 MW selama bulan Februari 2022 - Januari 2023. Hasil analisis heat rate mengalami penurunan terendah 2902,08 Kcal/kWh pada bulan Desember 2022, efisiensi termal terbesar pada bulan Desember 2022 sebesar 37,48%, konsumsi bahan bakar (specific fuel consumption) terendah pada bulan Desember 2022 sebesar 0,1804 kg/kWh, efisiensi eksergi terbesar pada bulan Desember 2022 sebesar 38,41%, kehancuran eksergi pada kompresor, combustor dan turbin mengalami penurunan terbesar pada bulan Desember 2022 sebesar 127857,67 KW, 232420,96 KW dan 134187,11 KW. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa combustor inspection dapat mempengaruhi performa pada sistem turbin gas.

Kata kunci: Eksergi, combustor inspection, heat rate, efisiensi termal, specific fuel consumption.

Abstract

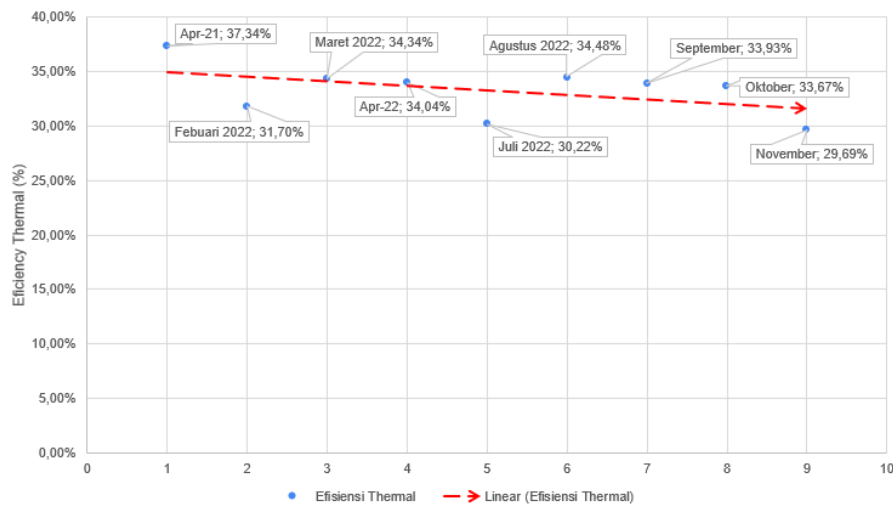
One way to improve the efficiency and performance of gas supply systems in power plants is to perform maintenance. The type of maintenance carried out is combustor inspection which is overhauled in the combustor area. This study aims to determine the effect of combustor inspection on the exergy and performance of gas turbines. The parameters used to analyze the effect of combustor inspection are heat rate, thermal efficiency, specific fuel consumption, exergical efficiency and exergical destruction of each component. Therefore, the author seeks to calculate and analyze the performance and exergy of gas turbines in combustor inspection activity. The secondary data used in this study is gas turbine operation data based on a load of 170 MW during February 2022 - Januari 2023. The results of the heat rate analysis experienced the lowest decrease of 2902.08 Kcal/kWh in December 2022, the largest thermal efficiency in December 2022 of 37.48%, the lowest specific fuel consumption in December 2022 of 0.1804 kg/kWh, the largest exergical efficiency in the month December 2022 amounted to 38.41%, the exergical destruction in kompresor, combustor and turbin experienced the largest decrease in December 2022 of 127857.67 KW, 232420.96 KW and 134187.11 KW. From this study, it can be concluded that combustor inspection can affect the performance of gas turbine systems.

Keywords: Exergy, combustor inspection, heat rate, thermal efficiency, specific fuel consumption.

1. PENDAHULUAN

Salah satu jenis pembangkit listrik yang paling umum adalah pembangkit listrik *thermal*. Pembangkit listrik *thermal* menggunakan panas untuk menggerakkan turbin gas yang menghasilkan listrik. Namun, pembangkit listrik *thermal* juga menghadapi berbagai masalah dalam mempertahankan kinerja dan performa turbin gas. Untuk mencegah kerusakan, kecelakaan, atau penurunan kualitas turbin gas, perlu dilakukan perawatan secara berkala. Jenis perawatan yang dapat dilakukan adalah *preventive maintenance*, *predictive maintenance*, dan *overhaul* [1].

Pada kondisi lapangan ditemukan penurunan performa pada sistem turbin gas yang signifikan dengan indikator yang digunakan efisiensi termal, temuan ini didapatkan dari *performance test* pada tahun 2022, efisiensi termal yang rendah menunjukkan bahwa pembangkit membutuhkan banyak bahan bakar untuk menghasilkan listrik, sehingga semakin besar kerugian yang ditimbulkan dalam sistem operasi [2].



Gambar 1. *Performance test* sistem turbin gas di PT. X tahun 2022

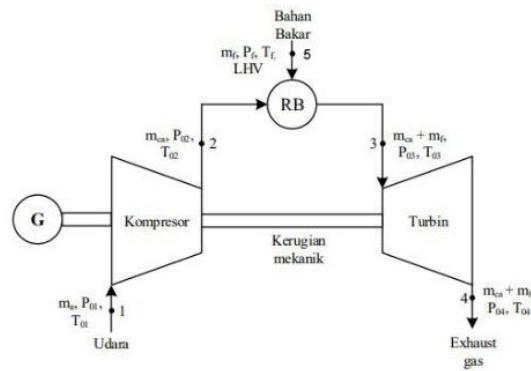
Pada gambar 1 terdapat *performance test* pada tahun 2022 yang menunjukkan efisiensi termal pada sistem turbin gas di PT. X secara tren mengalami penurunan yang signifikan, hingga pada bulan November turun sebesar 29,70% dibandingkan dengan tahun 2021 setelah *overhaul* terakhir kali dilakukan nilai efisiensi sebesar 37,34%.

Menurut Boyce (2001), Efisiensi termal yang ideal berkisar antara 30%-46%, kapasitas beban sistem unit (*Gas Turbine Generator*) GTG dapat mencapai 3 MW sampai 480 MW [3]. Oleh karena itu perlu dilakukan untuk mengembalikan performa sistem turbin gas dengan melakukan *combustor inspection* karena sudah melewati 12.000 EOH (*Equivalent Operation Hours*) dengan melakukan *overhaul* pada *combustor* di sistem turbin gas. *Combustor inspection* adalah inspeksi yang dilakukan bagian ruang bakar (*combustor area*) untuk memeriksa komponen ruang bakar : *Fuel nozzels*, *Cross-flame tubes*, *Igniter*, *Transition pieces*, biasanya memerlukan *shutdown* jangka pendek yang dimana komponen-komponen ini memerlukan pemeriksaan secara berkala karena kerja turbin secara terus menerus [4]

Penelitian ini dilakukan pada sistem turbin gas di PLTG PT X dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh dari *combustor inspection* terhadap performa dari turbin gas dan penurunan dari kerugian energi pada sistem turbin gas, dengan menggunakan dua pendekatan yaitu pendekatan energi berdasarkan hukum termodinamika 1 dan untuk pendekatan eksergi berdasarkan hukum termodinamika ke-2

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini berdasarkan data sekunder operasi pada sistem turbin gas selama periode waktu 10 bulan untuk beban yang sama 170 MW, dengan menganalisis kinerja turbin gas menggunakan dua metode pendekatan analisis energi dan analisis eksergi. Analisis energi berdasarkan pada hukum pertama termodinamika, yang menghitung perbedaan antara energi masuk dan keluar dari sistem. Analisis eksergi berdasarkan pada hukum kedua termodinamika, yang menghitung kerugian entropi dan kualitas energi [5]. Dengan menggunakan kedua metode ini, kita dapat mengetahui performa turbin gas secara detail, termasuk efisiensi, kerugian, dan faktor kualitas.



Gambar 2. Blok Diagram Turbin Gas

Pengolahan data dilakukan secara manual dengan menganalisis 5 titik kondisi pada gambar 2 Blok Diagram Turbin Gas, untuk siklus yang digunakan siklus Brayton secara ideal dengan laju aliran yang digunakan *steady state*. Untuk menghitung efisiensi *thermal*, *heat rate* serta *specific fuel consumption* didapatkan formula tersebut di ASME PTC 22 (*American Society of Mechanical Engineers Performance Test Codes*) dan data yang didapatkan akan digunakan untuk melakukan perhitungan untuk menentukan nilai entalpi, laju aliran massa bahan bakar serta performa, eksergi pada turbin gas

Dengan hasil data perhitungan tersebut disajikan dalam bentuk grafik kolom yang menunjukkan variasi data dalam rentang waktu 10 bulan.

Pendekatan Energi

Pendekatan energi berdasarkan hukum termodinamika pertama adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem pembangkit listrik tenaga gas. Metode ini mengasumsikan bahwa sistem beroperasi dalam keadaan *steady state* dan mengikuti siklus bryton ideal. Dengan demikian, pemodelan matematis dapat dilakukan dengan menggunakan kesetimbangan energi pada tiap komponen utama, yaitu kompresor, kamar bakar, dan turbin [6].

Dengan mengetahui nilai-nilai parameter operasi seperti tekanan, temperatur, dan laju alir massa pada tiap komponen, maka dapat dihitung efisiensi termal, daya keluaran, dan konsumsi bahan bakar system [6]:

Kerja kompresor

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

Kerja turbin

$$\dot{W}_{Turbin\ gas} = (\dot{m}_{udara} + \dot{m}_{bahan\ bakar})(h_3 - h_4) \quad (2)$$

Laju aliran masa bahan bakar

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

Kalor masuk

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

Laju aliran massa gas

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

Sedangkan untuk efisiensi *thermal*

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

Spesific fuel consumption

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

Heat rate

$$HR = \frac{Q_{in}}{W_{nett}} \quad (8)$$

Pendekatan eksergi

Pendekatan eksergi adalah metode yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja suatu sistem termodinamika berdasarkan hukum termodinamika kedua. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi sumber-sumber irreversibilitas, kerugian energi, dan ketidak efisienan yang terjadi dalam system. Eksergi adalah ukuran kualitas energi yang dapat digunakan untuk melakukan kerja.

Eksergi memiliki empat komponen, yaitu eksergi fisik, eksergi kinetik, eksergi potensial, dan eksergi kimia. Asalkan tidak ada efek-efek nuklir, magnetik, elektrikal, dan tegangan permukaan, jumlah total eksergi sistem adalah konstan [5]. Dengan eksergi kinetik dan eksergi potensial diabaikan

Eksergi fisik eksergi yang terkait dengan perbedaan temperatur, tekanan, dan volume antara sistem dan lingkungan [5] dengan titik 1 dianggap nol karena sama dengan kondisi lingkungan.

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

Eksergi fisik state 5 dengan menggunakan methana (CH_4) kondisi gas ideal [5]

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

Eksergi Kimia eksergi yang terkait dengan perbedaan temperatur, tekanan, dan volume antara sistem dan lingkungan [5] pada titik 1 dan 2 dianggap nol karena tidak ada reaksi kimia dari sisi kompresor dan turbin.

$$E^{CH} = \frac{\dot{m}_{feCH}}{M} \quad (11)$$

Kehancuran eksergi pada tiap komponen [7]

$$1. \text{ Kompresor} \quad E_d = E_1^{tot} + \dot{W}_c - E_2^{PH} \quad (12)$$

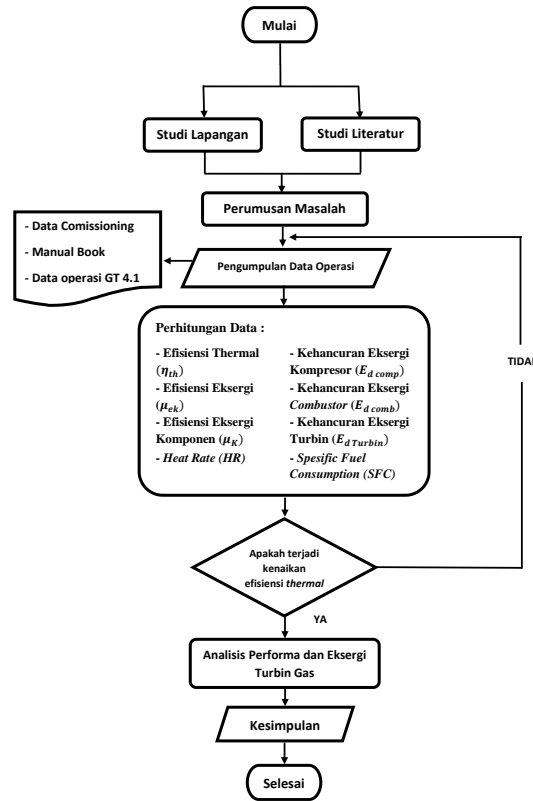
$$2. \text{ Combustor} \quad E_d = E_5^{tot} + E_2^{tot} - E_3^{tot} \quad (13)$$

$$3. \text{ Turbin} \quad E_d = E_3^{tot} - (E_4^{tot} + \dot{W}_T - \dot{W}_c) \quad (14)$$

Efisiensi eksergi siklus

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

Diagram Alir dapat memudahkan pembaca dalam memahami metodologi penelitian yang digunakan dan menjelaskan tahapan proses penelitian dari awal sampai akhir pada gambar 3:



Gambar 3. Diagram Alir

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

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

Hasil perhitungan data

Tabel 1. 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)
Febuari	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 tiap bulan

Bulan	Efisiensi Eksergi
Febuari	33,49%
Maret	35,14%
April	35,84%
Juli	31,74%

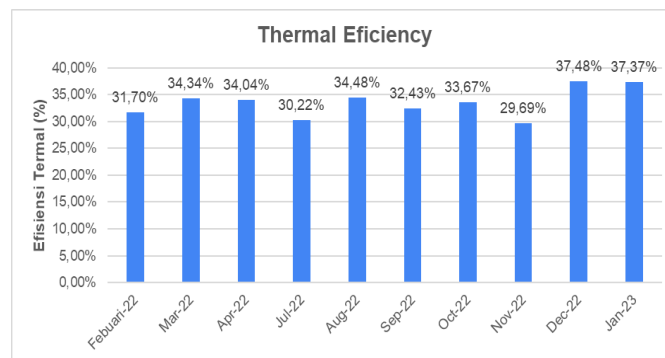
Agustus	36,01%
September	34,63%
Oktober	34,49%
November	31,32%
Desember	38,41%
Januari	38,20%

Tabel 3. Laju aliran eksergi total pada tiap titik

	Februari	Maret	April	Juli	Agustus	September	Oktober	November	Desember	Januari
Etot 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Etot 2	71539,8	71330,6	70638,2	72033,7	70394,2	74924,9	71767,6	71237,2	69903,9	69724,3
Etot 3	472115,6	466021,9	465444,3	462745,8	467296,1	467163,9	467443,6	460149,1	475185,9	474038,0
Etot 4	137368,3	134478,4	134493,4	133045,4	135288,1	135475,6	135112,2	131355,5	139713,1	139547,8
Etot 5	583716,5	573204,9	558523,0	609464,6	556455,6	555140,8	576458,0	621332,9	545852,2	547895,1

Analisis Performa pada sistem turbin gas

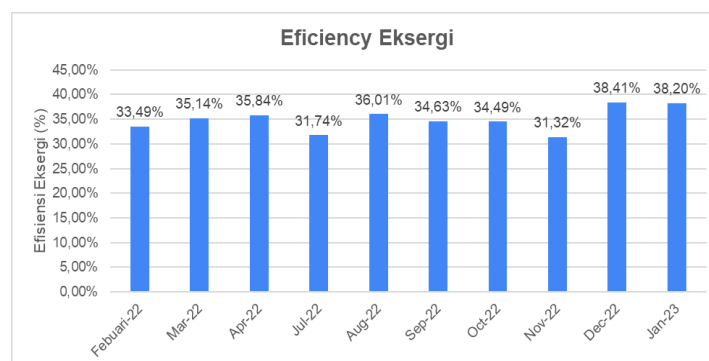
1. Efisiensi termal



Gambar 4. Grafik Efisiensi Termal

Pada grafik yang ditunjukkan gambar 4 setelah melakukan overhaul *combustor* efisiensi termal meningkat pada beban yang sama sebesar 170 MW. Pada analisis ini 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 194.606,52 kj/s menjadi 209.686,54 kj/s sementara kalor bahan bakar masuk pada turbin gas mengalami penurunan dari 655770,63 kj/s menjadi 559459,2 kj/s

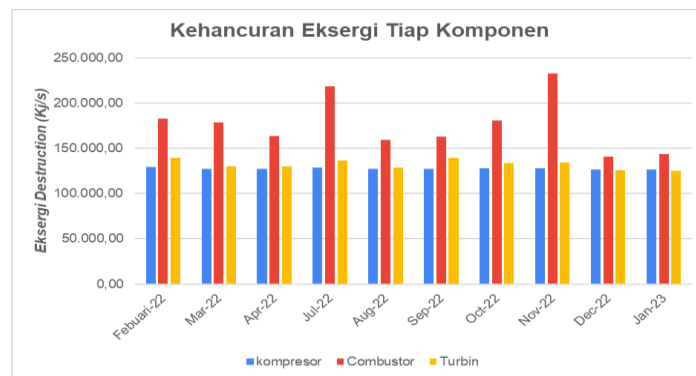
2. Efisiensi eksergi



Gambar 5. Efisiensi eksergi

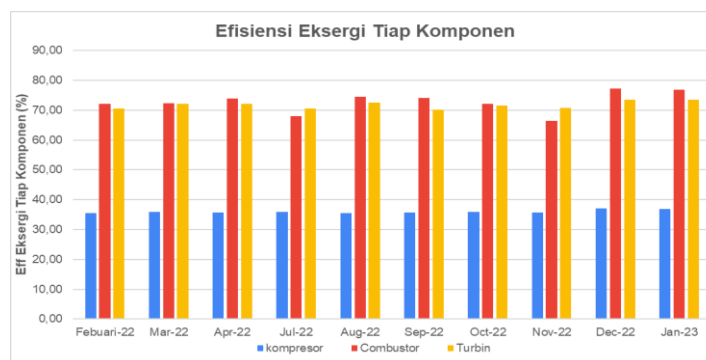
Pada gambar 5 grafik di atas, kita dapat melihat bahwa efisiensi eksergi mengalami peningkatan setelah *combustor inspection* di bulan Desember. Hal ini disebabkan oleh faktor yang mempengaruhi kenaikan efisiensi eksergi adalah kerja netto turbin gas meningkat dikarenakan setelah inspeksi *combustor*, ini terjadi karena penurunan kerja kompresor terbesar pada bulan Desember 2022 menyentuh 237986,03 KJ/s dari bulan sebelumnya sebesar 243690,18 KJ/s untuk laju aliran eksergi total *state 5* menurun. Hal ini dipengaruhi *combustor inspection* dengan memperbaiki dan membersihkan *fuel nozzles*, *combustor basket*, dan *transition pieces* yang berperan dalam proses pembakaran bahan bakar.

3. Kehancuran eksergi dan efisiensi tiap komponen



Gambar 6. Kehancuran eksergi

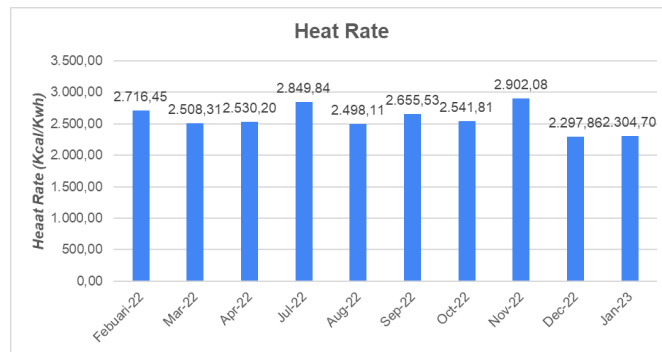
Grafik pada gambar 6 menunjukkan adanya penurunan kehancuran eksergi pada setiap komponen setelah dilakukan inspeksi *combustor*. Kehancuran eksergi terbesar pada *combustor* di bulan November dengan nilai 232420,96 kJ/s dan menurun pada bulan Desember menjadi 140570,14 kJ/s dengan penurunan sebesar 91.850,82 kJ/s. Penurunan ini dipengaruhi oleh eksergi total pada *state 2*, 3 dan 5 yang berhubungan dengan *combustor*. Faktor yang mempengaruhi yaitu dengan dilakukan perbaikan, mengganti dan membersihkan *combustor basket* dan *fuel nozzle*.



Gambar 7. Efisiensi eksergi tiap komponen

Grafik pada gambar 7 menunjukkan bahwa efisiensi eksergi meningkat setelah dilakukan pemeriksaan *combustor*, yang berarti kehancuran eksergi berkurang. Pada *Combustor* memiliki kehancuran eksergi tertinggi pada bulan November yaitu 232420,96 kJ/s, dengan efisiensi eksergi 66,44%. Sedangkan *combustor* memiliki kehancuran eksergi terendah pada bulan Desember yaitu 125786,31 kJ/s, dengan efisiensi eksergi 75,48% menandakan kehancuran eksergi yang rendah maka efisiensi eksergi yang dihasilkan tinggi didukung dengan hasil gambar grafik 3.3 dan 3.4. Hal ini dipengaruhi dengan menurunnya eksergi total pada titik 2 dan 5 dipengaruhi setelah dilakukan perbaikan, mengganti dan membersihkan *combustor basket* dan *fuel nozzle*.

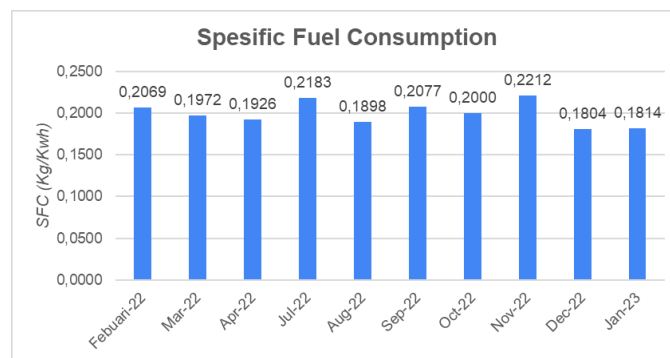
4. Heat Rate



Gambar 8. Heat rate

Grafik pada gambar 8 menggambarkan 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 2902,08 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 2297,86 Kcal/kWh dipengaruhi daya netto turbin gas dan kalor bahan bakar masuk pada turbin, dengan nilai perbandingan daya netto turbin.

5. *Specific fuel consumption*

Gambar 9. *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 kh/kWh disebabkan oleh peningkatan daya netto yang dihasilkan oleh turbin gas dan penghematan bahan bakar.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

1. *Overhaul* pada *combustor* berhasil meningkatkan efisiensi eksergi dan efisiensi *thermal* pada turbin gas sebesar 7,09%, 7,79 %.
2. *Overhaul* pada *combustor* berhasil menurunkan heat rate pada turbin gas sebesar 87,07 Kcal/Kwh.
3. *Overhaul* pada *combustor* berhasil menurunkan kerugian energi terutama pada *combustor* sebesar 91.850,82 kj/s
4. *Overhaul* pada *combustor* berhasil menurunkan konsumsi bahan bakar dengan menghemat sebesar 0,0408 kg/Kwh

REFERENSI

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. A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. Moran, “Thermal Design and Optimization-John Wiley & Sons.” pp. 1–542, 1996.
6. M. J. Moran and H. N. SHAPIRO, “Fundamentals of Engineering Thermodynamics. [sl] John Wiley & Sons.” Inc, 2006.
7. 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.