

Analisa Pengaruh Variasi Beda Fluktuasi Beban Terhadap Unjuk Kerja Sistem Turbin Gas Di PLTGU Grati Pasuruan

Lukman Hakim, Mohammad Effendi

¹²Universitas Yudharta Pasuruan

Email: *lukkman.bakim1212@gmail.com, mohammad.effendi@yudharta.ac.id*

Abstrak

PT Indonesia power Grati Pasuruan merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang ketenagalistrikan atau Pembangkitan. Pada unit Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap atau biasa yang dikenal PLTGU sering mengalami perubahan beban atau fluktuasi beban sesuai dengan kebutuhan listrik yang diminta. Perubahan beban kerja dari pembangkit juga akan mempengaruhi efisiensi dan konsumsi bahan bakar dari pembangkit tersebut. Analisis pengaruh fluktuasi beban terhadap unjuk kerja sistem turbin gas di PLTGU Grati Pasuruan menjadi fokus penelitian ini. Metode kuantitatif digunakan untuk mengukur dan menganalisis data operasional yang dikumpulkan dari sistem turbin gas, dengan fokus pada berbagai tingkat beban. Data operasional yang terkait dengan performa turbin gas, termasuk efisiensi kerja turbin, dan konsumsi bahan bakar, dianalisis secara rinci untuk memahami respons sistem terhadap perubahan beban. Dari hasil proses perhitungan properties pada masing-masing titik pada tiap beban berbeda pada blok 2 PLTGU Grati, selanjutnya dapat dihitung entalpi pada tiap titik atau kondisi, konsumsi bahan bakar, dan efisiensi turbin. Kemudian setelah mengetahui nilai efisiensi dan konsumsi bahan bakar kemudian dilakukan perhitungan rata-rata selama 5 hari dalam 1 minggu yang diambil selama bulan juni yang artinya ada 4 minggu dan 4 hasil atau rata-rata nilai dari efisiensi, bahan bakar, fluktuasi beban dan beban kerja. Setelah dilakukannya perhitungan, dapat disimpulkan bahwa minggu ke-3 adalah nilai keseluruhan yang terbaik dengan nilai rata-rata efisiensi 97,87%, nilai konsumsi bahan bakar 4.88 kg/s, beban 66 MW dan Fluktuasi beban 35 MW, yang artinya keseluruhan data atau nilai pada minggu ke-3 memiliki nilai yang stabil atau terbaik dibandingkan dengan minggu lainnya.

Kata Kunci: Turbin Gas, Fluktuasi Beban, Efisiensi, Bahan bakar

Abstract

PT Indonesia power Grati Pasuruan is one of the companies engaged in electricity or power generation. In Gas and Steam Power Plant units or commonly known as PLTGU, they often experience load changes or load fluctuations according to the requested electricity needs. Changes in the workload of the plant will also affect the efficiency and fuel consumption of the plant. The analysis of the effect of load fluctuations on the performance of the gas turbine system at the Grati Pasuruan PLTGU is the focus of this research. Quantitative methods are used to measure and analyze operational data collected from gas turbine systems, focusing on various load levels. Operational data related to the performance of gas turbines, including turbine operating efficiency, and fuel consumption, are analyzed in detail to understand the system's response to load changes. From the results of the calculation process of properties at each point at each different load in block 2 of the Grati PLTGU, then the enthalpy at each point or condition, fuel consumption, and turbine efficiency can be calculated. Then after

knowing the efficiency and fuel consumption then an average calculation is carried out for 5 days in 1 week taken during the month of June which means there are 4 weeks and 4 results or average values of efficiency, fuel, load fluctuations and load. After the calculations, it can be concluded that the 3rd week is the best overall value with an average efficiency value of 97.87%, a fuel consumption value of 4.88 kg/s, a load of 66 MW and a load fluctuation of 35 MW, which means that the overall data or value in the 3rd week has a stable or best value compared to other weeks.

Keywords: *Gas Turbine, Load Fluctuations, Efficiency, Fuel*

Pendahuluan

Pada era modern, kebutuhan akan listrik menjadi esensial bagi kehidupan manusia dan terus mengalami peningkatan dari waktu ke waktu. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, pembangunan pembangkit listrik menjadi prioritas utama di berbagai negara, termasuk Indonesia. Salah satu program besar yang dijalankan Indonesia adalah percepatan pembangunan pembangkit listrik sebesar 35.000 MW, yang mencakup pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) berbahan bakar gas. PT. Indonesia Power Grati, Pasuruan, telah berpartisipasi dalam program ini dengan membangun blok baru PLTGU berkapasitas 450 MW pada tahun 2016. PLTGU ini terdiri dari beberapa komponen utama seperti kompresor, turbin gas, combustor, dan generator. Turbin gas adalah salah satu komponen penting yang berperan dalam mengubah energi panas dari pembakaran gas menjadi energi mekanik yang kemudian diubah menjadi energi listrik. Salah satu tantangan utama dalam pengoperasian PLTGU adalah menjaga efisiensi dan performa sistem di tengah fluktuasi permintaan listrik yang terus berubah-ubah. Variasi beban yang terjadi menyebabkan perubahan suplai bahan bakar dan udara pembakaran, serta fluktuasi gas buang. Hal ini berdampak pada efisiensi siklus termodinamika turbin gas dan keseluruhan sistem pembangkit listrik.

Fluktuasi beban dapat menyebabkan turbin gas bekerja pada kondisi yang berbeda-beda, yang pada gilirannya mempengaruhi kinerja komponen seperti turbin dan kompresor. Untuk memahami dampak fluktuasi ini, diperlukan analisis yang mendalam mengenai bagaimana variasi beban dan kondisi operasi mempengaruhi unjuk kerja sistem turbin gas. Dengan mengetahui pengaruh variasi beban terhadap efisiensi dan performa turbin gas, kita dapat mengidentifikasi kondisi operasi yang optimal. Hal ini tidak hanya membantu dalam meningkatkan efisiensi pembangkit listrik, tetapi juga dalam menekan biaya operasional dan memperpanjang umur pakai komponen. Fluktuasi permintaan listrik dari konsumen yang berubah-ubah memaksa pembangkit untuk sering melakukan penyesuaian beban produksi. Setiap perubahan beban ini mengharuskan perubahan suplai bahan bakar dan udara pembakaran, yang pada gilirannya menyebabkan perubahan dalam efisiensi sistem pembangkit. Oleh karena itu, memahami bagaimana perubahan beban mempengaruhi performa turbin gas menjadi sangat penting.

Turbin gas, sebagai salah satu komponen utama dalam PLTGU, sangat dipengaruhi oleh perubahan dalam parameter operasi seperti tekanan, suhu, dan laju aliran fluida. Variasi dalam parameter ini dapat menyebabkan perubahan dalam efisiensi isentropik dan output daya. Dalam situasi ini, turbin harus mampu menyesuaikan diri dengan cepat dan efisien terhadap perubahan beban untuk menjaga kinerja optimal. Dalam konteks ini, analisis termodinamika

menjadi alat penting untuk mengevaluasi performa turbin gas di bawah berbagai kondisi beban. Dengan menggunakan siklus Brayton sederhana, kita dapat menghitung efisiensi termal dan specific fuel consumption (SFC) pada berbagai tingkat beban. Ini membantu dalam menentukan beban optimal yang memberikan efisiensi tertinggi dan penggunaan bahan bakar yang paling ekonomis. Penting untuk memahami bagaimana variasi atau beda fluktuasi saat kenaikan beban mempengaruhi unjuk kerja sistem turbin gas. Analisis ini mencakup pengukuran perubahan efisiensi termal dan specific fuel consumption (SFC) pada berbagai tingkat beban. Dengan menggunakan data observasi dari operasi nyata turbin gas di PT. Indonesia Power Grati, Pasuruan, kita dapat menghitung dan membandingkan efisiensi serta SFC pada beban 30 MW, 50 MW, 75 MW, dan 100 MW. Dalam notasi matematika, "delta" (Δ) sering digunakan untuk menyatakan perubahan atau variasi suatu variabel. Dalam konteks delta beban atau variasi beban pada pembangkit listrik, kita dapat menggunakan simbol ini untuk menggambarkan perubahan dalam jumlah daya yang diproduksi.

Dinyatakan delta beban sebagai perbedaan antara jumlah daya pada berbagai tingkat beban P_{30} , P_{50} , P_{75} , dan P_{100} sebagai jumlah daya pada beban masing-masing 30 MW, 50 MW, 75 MW, dan 100 MW.

Maka, delta beban pada masing-masing perubahan beban dapat diungkapkan sebagai berikut:

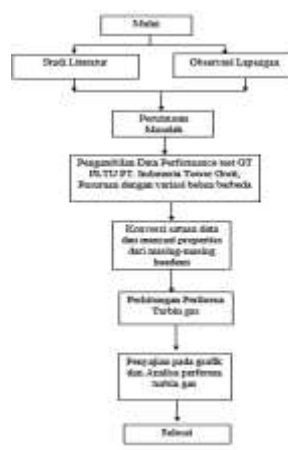
- $\Delta P_{30-50} = P_{50} - P_{30}$
- $\Delta P_{50-75} = P_{75} - P_{50}$
- $\Delta P_{75-100} = P_{100} - P_{75}$

Delta beban ΔP_{30-50} akan menunjukkan perubahan dalam jumlah daya saat beban meningkat dari 30 MW menjadi 50 MW. Demikian pula, ΔP_{50-75} akan menunjukkan perubahan dalam jumlah daya saat beban meningkat dari 50 MW menjadi 75 MW, dan ΔP_{75-100} akan menunjukkan perubahan saat beban meningkat dari 75 MW menjadi 100 MW. Dengan menggunakan data observasi dari operasi turbin gas di PT. Indonesia Power Grati, Pasuruan, kita dapat menghitung nilai-nilai ini dan menganalisis bagaimana perubahan dalam delta beban mempengaruhi efisiensi dan specific fuel consumption (SFC) dari sistem turbin gas. Dari analisis ini, kita dapat menentukan kondisi operasi yang paling efisien dan memberikan rekomendasi praktis untuk optimasi operasional.

Metode Penelitian

3.1 Kerangka konsep pemikiran

Kerangka konsep pemikiran dari penelitian yang akan di laksanakan sebagai berikut ::



Gambar 3.1 Kerangka Pemikiran

(Sumber: Hasil Pemikiran,2024)

3.2 *Diagram Alur Penelitian*

Penelitian yang akan di laksanakan secara keseluruhan di gambarkan dalam bentuk diagram alir di bawah ini :



Gambar 3.2 Diagram Alur Penelitian

(Sumber: Hasil Pemikiran, 2024)

3.3 *Observasi Lapangan*

Pertama-tama, observasi dan identifikasi lapangan dilakukan untuk memahami masalah utama yang kemudian akan menjadi fokus penelitian yang akan dianalisis sebagai topik tugas akhir. Topik analisis dalam tugas akhir ini adalah turbin gas, yang akan diteliti kinerjanya dan operasinya secara termodinamika.

Studi Literature

Setelah melalui tahap observasi dan identifikasi lapangan, topik penelitian selanjutnya dipertimbangkan kembali untuk memastikan relevansinya sebagai subjek tugas akhir. Pengkajian literatur dilakukan untuk mendalami topik tugas akhir yang telah diidentifikasi sebelumnya melalui observasi lapangan.

Studi literatur ini mencakup penelaahan berbagai sumber yang berkaitan dengan turbin gas, seperti buku "Gas Turbine" oleh V. Ganesan, "Fundamental of Engineering Thermodynamics" oleh Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro, "Fundamental of Thermodynamics" oleh Claus Borgnakke dan Richard E. Sonntag, serta beberapa referensi lainnya. Selain itu, juga dilakukan analisis berdasarkan penelitian terdahulu yang relevan dengan topik tersebut.

3.4 *Perumusan Masalah*

Setelah melakukan observasi di PLTGU PT. Indonesia Power Grati, Pasuruan, dan merujuk berbagai studi literatur, langkah selanjutnya adalah merumuskan masalah penelitian terkait dengan turbin gas di PLTGU tersebut. Tugas akhir ini bertujuan untuk membandingkan kinerja turbin gas dan efisiensi siklusnya secara termodinamika dengan variasi beban yang berbeda.

3.5 Pengumpulan Data

Pada tahap ini, data dikumpulkan dari berbagai sumber informasi, termasuk studi literatur, terkait dengan kinerja GT di PLTGU PT. Indonesia Power Grati, Pasuruan.

3.6 Konversi dan Perhitungan Properties

Pada tahap ini, data yang telah terkumpul diubah ke dalam satuan yang umum digunakan untuk memudahkan proses perhitungan. Kemudian, perhitungan termodinamika dilakukan pada setiap titik (stage) untuk mendapatkan data properti yang akan digunakan dalam perhitungan unjuk kerja turbin gas pada subbab berikutnya.

3.7 Perhitungan Performa Turbin

Setelah data properti diperoleh untuk setiap titik, langkah berikutnya adalah melakukan perhitungan kinerja turbin gas dengan menggunakan data tersebut. Perhitungan kinerja ini mencakup kerja turbin, kerja kompresor, kerja bersih, konsumsi bahan bakar, efisiensi turbin gas, efisiensi kompresor, dan efisiensi siklus.

3.8 Pengeplotan Pada Grafik dan Analisa

Setelah memperoleh data kinerja turbin gas, langkah selanjutnya adalah menyajikan data tersebut dalam bentuk tabel dan grafik. Presentasi ini bertujuan untuk mempermudah pembacaan serta analisis perbandingan kinerja turbin gas pada berbagai beban.

Table 3.1 Rencana dan Jadwal Penelitian

No.	Kegiatan	Estimasi Waktu (2024)																	
		Januari			Februari			Maret			April			Mei					
1.	Permohonan Judul	■	■																
2.	Pengumpulan Data			■	■	■	■	■	■	■									
3.	Penyusunan Proposal								■	■	■	■	■	■					
4.	Bimbingan Proposal														■	■	■	■	
5.	Seminar Proposal																	■	■

Bab ini menyajikan hasil perhitungan dan analisa mengenai pengaruh variasi fluktuasi beban terhadap efisiensi turbine dan konsumsi bahan bakar turbin gas di PLTGU Grati, Pasuruan. Analisa dilakukan pada beban 30 MW, 50 MW, 75 MW, dan 100 MW.

Perhitungan pada beban 30,50,75 dan 100 berdasarkan pada data pengoperasian PLTG pada bulan juni 2024 dengan total 5 hari dalam 1 minggu.

Tabel 4.1 Data pengperasian PLTG bulan juni

Sumber :Data hasil konversi pribadi, 2024

Tanggal	Beban (MW)	Tanggal	Beban (MW)
3	30 MW	17	75 MW
4	50 MW	18	100 MW
5	75 MW	19	50 MW
6	100 MW	20	30 MW
7	50 MW	21	75 MW
10	30 MW	24	100 MW
11	75 MW	25	50 MW
12	100 MW	26	30 MW
13	50 MW	27	75 MW
14	30 MW	28	100 MW

4.1 Perhitungan Performa Turbin Gas PLTGU PT. Indonesia Power Grati, Pasuruan dengan Variasi Beban Berbeda.

Pada sub bab ini akan dijabarkan cara perhitungan performa turbin gas PLTGU PT. Indonesia Power Grati,Pasuruan. Data yang digunakan dalam contoh perhitungan adalah data operasi PLTGU, pada bulan juni 2024 pada variasi beban 50 MW

4.1.1 Perhitungan Properties Pada Tiap Titik.

Untuk mempermudah dalam melakukan perhitungan, sebaiknya kita mengetahui properties di tiap-tiap titik pada skema turbin gas. Adapun skema turbin gas itu sendiri serta data pengoperasiannya adalah sebagai berikut:

Metode perhitungan didasarkan pada beberapa asumsi untuk menyederhanakan perhitungan, asumsi sebagai berikut:

1. Setiap komponen yang dianalisa dalam keadaan *steady state*
2. Proses yang terjadi pada turbin dan kompresor merupakan proses isentropik
3. Energi kinetik dan energi potensial diabaikan
4. Proses yang terjadi di dalam turbin gas tidak dijabarkan secara detail karena mengacu pada data operasi atau *performance test sheet* yang ada.
5. Perhitungan performa turbin gas didasarkan pada kalor yang masuk dan keluar pada sistem saja, tidak menghitung perpindahan panas yang terjadi pada setiap state yang ada di dalam turbin gas.

Perhitungan peforma turbin gas dipengaruhi oleh komposisi bahan bakar yang menentukan C_p *combustion product*. Untuk mengetahui C_p *combustion product* didapat dari mengkalikan nilai C_p tiap komponen dengan presentasinya kemudian dijumlahkan [7] seperti table berikut.

Table 4.2 Data Komposisi,Presentase dan Specific Heat Bahan Bakar Gas

Nama gas	Presentase kandungan (%)	Nilai C_p standar	Hasil (KJ/Kg.K)

		(KJ/Kg.K)	
Methane	94,3	2,22	2,09346
Nitrogen	0,27	14,32	0,038664
CO2	1,26	0,844	0,0106344
Ethane	1,18	1,75	0,02065
Propane	1,37	1,67	0,022879
I-butane	0,42	1,67	0,007014
n-butane	0,46	1,675	0,007705
I-pentane	0,23	0,228	0,0005244
N-pentane	0,13	0,167	0,0002171
jumlah (Cp combustion product) (KJ/Kg.K)			2,2023089

Sumber : Control system PLTG, 2024

Harga properties bahan bakar (*natural gas*) dan udara yang digunakan pada perhitungan ini, dapat dilihat pada tabel 4.3

Table 4.3 Data properties natural gas dan udara

Input	k	P	Cp	Cv
Udara	1,4	1,2	1,01	0,718
Natural Gas	1,3	0,9	2,34	1,85
Unit		Kg/m ³	kJ/kg.K	kJ/kg.K

Sumber : Control system PLTG, 2024

Data harga properties tersebut diambil pada sumber *Engineering Toolbox 2013*, untuk lebih detailnya dapat dilihat pada lampiran.

Untuk properties yang diketahui pada beban 50 MW setelah turbine inspection bisa dilihat pada tabel di bawah ini. Dari tabel tersebut kita bisa mencari *properties* untuk setiap *state* yang dibutuhkan dalam perhitungan performa turbin gas.

Table 4.4 Data Operasi PLTGU

Input	Value	Unit
Daya (W)	50	MW
Daya sebenarnya (W actual)	49,7	MW
Laju aliran bahan bakar (Q)	19,63	kNm ³ /h
Efisiensi generator	99	%
Temperatur masuk kompresor (T1)	27,5	C

Tekanan masuk kompresor (P1)(abs)	1,02	Kgf/cm ²
Temperatur keluar kompresor (T2)	398,9	C
Tekanan keluar kompresor (P2)	10,94	Kgf/cm ²
Temperatur keluar turbin (T4)	369,8	C
Tekanan keluar turbin (P4)(abs)	1,04	Kgf/cm ²
LHV	9660	Kcal/Nm ³
Specific heat combustion product	2,2023	KJ/Kg.K

Sumber : Control system PLTG, 2024

Untuk mempermudah dalam perhitungan, maka dilakukan konversi terlebih dahulu ke dalam suatu baku *metric units* dan mengubah tekanan-tekanan yang diketahui (tekanan *gauge*) menjadi tekanan absolut, sebagai berikut:

Table 4.5 Data Operasi Konversi

Input	Value	Unit
Daya (W)	50	MW
Daya sebenarnya (Correct W)	49,7	MW
Laju aliran bahan bakar (Q)	19,63	kNm ³ /h
Efisiensi generator	99	%
Temperatur masuk kompresor (T1)	300,65	K
Tekanan masuk kompresor (P1)(abs)	100,03	kPa
Temperatur keluar kompresor (T2)	671,9	K
Tekanan keluar kompresor (P2) (abs)	1174,16	kPa
Temperatur keluar turbin (T4)	642,8	K
Tekanan keluar	101,98	kPa

turbin (P4) (abs)		
LHV	40444,2	kJ/m ³
Specific heat combustion product	2,2023	KJ/Kg.K

Sumber : Control system PLTG, 2024

a. *Kondisi 1*

Pada kondisi pertama, udara yang masuk ke kompresor diperoleh dari lingkungan (udara atmosfer) melalui *air inlet*. Nilai P₁ adalah tekanan atmosfer yang diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan barometer yang tertera pada lampiran.

Diketahui :

$$P_1 = 100,03 \text{ kPa}$$

$$T_1 = 27.5 \text{ }^\circ\text{C} = 300.65 \text{ K}$$

$$T_{atas} = 305 \text{ K}$$

$$T_{bawah} = 300 \text{ K}$$

$$h_{atas} = 305.22 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{bawah} = 300.19 \text{ kJ/kg}$$

Untuk mencari entalpi fluida kita menggunakan tabel termodinamika dari “Fundamental of Engineering Thermodynamics” 7th edition karangan Michael J. Moran dan Howard N. Saphiro pada bagian tabel A-22 *Ideal Gas Properties of Air*. (terdapat pada lampiran). Besar enthalpy didapatkan dengan menggunakan proses interpolasi

$$h_1 = \frac{(T_1 - T_{bawah})(h_{atas} - h_{bawah})}{(T_{atas} - T_{bawah})} + h_{bawah}$$

$$h_1 = \frac{(300.65 - 300)(305.22 - 300.19)}{(305 - 300)} + 300.19$$

$$h_1 = 300.84 \text{ kJ/kg}$$

Pada tabel termodinamika dari “Fundamental of Engineering Thermodynamics” 7th edition karangan Michael J. Moran dan Howard N. Saphiro pada bagian tabel A-22 *Ideal Gas Properties of Air* juga bisa digunakan untuk mencari Temperature jika pada table operasi tidak terdapat data temperature yang tertera, contoh rumus :

$$T_2 = \frac{(h_2 - h_{bawah})(T_{atas} - T_{bawah})}{(h_{atas} - h_{bawah})} + T_{bawah}$$

b. *Kondisi 2*

Pada titik ini udara yang masuk ke kompresor akan dikompresikan keluar menuju ke ruang bakar, dimana fluida udara tersebut mempunyai tekanan dan temperatur yang tinggi. Dari tabel operasi, didapatkan data yaitu:

$$T_2 = 671,9 \text{ K}$$

$$P_2 = 1174,16 \text{ KPa}$$

Untuk mencari entalpi fluida kita menggunakan tabel termodinamika dari “Fundamental of Engineering Thermodynamics” 7th edition karangan Michael J. Moran dan Howard N.

$$h_2 = 683,16 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Saphiro pada bagian tabel A-22 *Ideal Gas Properties of Air*. (terdapat pada lampiran). Besar enthalpy didapatkan dengan menggunakan proses interpolasi sehingga diperoleh: Karena pada state 2 ini berlangsung proses kompresi isentropik maka :

$$\begin{aligned} \frac{T_{2s}}{T_1} &= \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \\ T_{2s} &= T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \\ &= 300,1 K \left(\frac{1174,16 KPa}{100,03 KPa}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \\ &= 300,1 K \times 2,0211 \\ &= 606,54 K \end{aligned}$$

$$h_{2s} = 613 \frac{kJ}{kg} \quad \text{c. Kondisi 3}$$

Pada tahap ini terjadi proses pembakaran di dalam ruang bakar (*combustion chamber*) dan fluida bahan bakar natural gas diinjeksikan sehingga bercampur dengan udara dan terjadi proses pembakaran. *Fuel gas* yang sudah terbentuk dari pembakaran akan keluar dari ruang bakar menuju turbin.

Dari data *heat balance* pada kondisi pembebanan 50MW didapatkan data tekanan keluar kompresor sebesar 12 Kgf/cm²(abs) dan tekanan keluar ruang bakar sebesar 11,4 Kgf/cm²(abs) Sehingga *pressure drop* dapat dicari dengan cara berikut:

$$\begin{aligned} \text{Pressure drop} &= \left(1 - \frac{P_3}{P_2}\right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{11,4 Kgf/cm^2}{12 Kgf/cm^2}\right) \times 100\% \\ &= (1 - 0,95) \times 100\% \\ &= 5\% \end{aligned}$$

Setelah besar *pressure drop* diketahui, maka besar P_3 dapat dihitung dengan cara sebagai berikut. Setelah didapatkan nilai P_3 , serta dengan menggunakan nilai rasio spesifik, $k = 1,3$ yang diambil pada sumber *Engineering Toolbox 2013*, untuk lebih detailnya dapat dilihat pada lampiran, maka temperatur masuk turbin dapat dicari dengan cara sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Pressure drop} &= \frac{(P_2 - P_3)}{P_2} \\ 0,05 &= \frac{(1174,16 kPa - P_3)}{1174,16 kPa} \\ 0,05 \times 1174,16 kPa &= 1174,16 kPa - P_3 \\ 58,708 kPa &= 1174,16 kPa - P_3 \\ P_3 &= 1115,45 kPa \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{T_3}{T_4} &= \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} \\ T_3 &= T_4 \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} \\ &= 642,8 \text{ K} \left(\frac{1115,45 \text{ kPa}}{101,98 \text{ kPa}}\right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} \\ &= 642,8 \text{ K} \times 1,7368 \\ &= 1116,42 \text{ K} \end{aligned}$$

Dengan $C_{p\text{combustion product}} = 2,2023 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ dan $h = Cp \times T_3$ maka:

$$\begin{aligned} h_3 &= C_{p\text{combustion product}} \times T_3 \\ &= 2,2023 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times 1116,42 \text{ K} \\ &= 2458,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

d. Kondisi 4

Pada state ini terjadi ekspansi gas buang hasil pembakaran dari dalam turbin. Pada proses ini terjadi gesekan antara gas hasil pembakaran dengan sudu-sudu turbin, sehingga temperatur gas buang yang keluar dari turbin menjadi lebih tinggi dari gas ideal (isentropis).

$$T_4 = 642,8 \text{ K}$$

$$P_4 = 101,98 \text{ kPa}$$

Dengan $C_{p\text{combustion product}} = 2,2023 \text{ kJ/kgK}$ dan $h = Cp \times T_4$ maka:

$$h_4 = C_{p\text{combustion product}} \times T_4$$

$$\begin{aligned} &= 2,2023 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times 642,8 \text{ K} \\ &= 1415,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Karena pada state 4 ini berlangsung proses kompresi isentropis maka:

$$\begin{aligned} T_{4s} &= T_3 \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} \\ &= 1116,42 \text{ K} \left(\frac{101,98 \text{ kPa}}{1115,45 \text{ kPa}}\right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} \\ &= 1116,42 \text{ K} \times 0,5689 \\ &= 632,41 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 2,2023 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \\ &= 1391,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Dengan $C_{p\text{combustion product}} = 2,2023 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ dan

$$\begin{aligned} h &= Cp \times T_{4s} \\ h_{4s} &= C_{p\text{combustion product}} \times T_{4s} \end{aligned}$$

MW	Enthalpy (KJ/Kg)					
	State					
	1	2	2s	3	4	4s
30	299,69	673,13	603,7	2240,6	1303,3	1280,69
50	300,29	683,16	613	2458,7	1415,6	1391,05
75	301,09	694,17	624,7	2763,6	1568,7	1545,18
100	300,79	703,59	632	3056,6	1716	1691,05

4.2 Hasil Perhitungan Properties tiap titik dengan Variasi Beban dalam Bentuk Tabel

sama seperti sub bab C, hasil perhitungan properties pada tiap titik dan perhitungan performa untuk variasi beban yang berbeda dapat disederhanakan dalam bentuk tabel untuk mempermudah dalam pembacaan dan perbandingan. Perhitungan properties dan performa turbin gas dengan variasi beban berbeda dapat dilihat pada tabel Dengan mengacu pada data operasi maka kita menerapkan cara yang berikut:

Tabel 4.6 Hasil perhitungan Temperatur dan Pressure tiap beban

Sumber : Hasil perhitungan penulis, 2024

Beban seting (MW)	Temperatur (°K)					Tekanan (KPa) abs				
	state					state				
	1	2	2s	3	4	4s	1	2	3	4
30	299,5	662,5	597,1	1017,3	591,8	582,24	100,05	1123,17	1067,01	101,98
50	300,1	671,9	606,5	1116,4	642,8	632,41	100,05	1174,16	1115,45	101,98
75	300,9	682,2	617,1	1254,8	712,3	702,48	100,05	1235,94	1186,5	101,98
100	300,6	691,5	624,6	1387,9	779,2	768,8	100,05	1293,73	1244,35	101,98

Tabel 4.7 Hasil perhitungan entalpi tiap titik di berbagai beban

Sumber : Hasil perhitungan penulis, 2024

4.3 Perhitungan Efisiensi Turbin tiap minggu

Dengan data diatas, dapat untuk menghitung menghitung efisiensi turbin yang pada data pengoperasian terdapat 4 variasi beban selama 1 bulan, yatu pada beban 30 MW, 50 MW, 75 MW, dan 100 MW, kita akan menghitung entalpi untuk setiap beban dan kemudian menentukan efisiensi berdasarkan perhitungan yang telah diberikan.

$$\eta_{\text{turbin}} = \frac{h_3 - h_{4s}}{h_3 - h_4} \times 100\%$$

Beban 30 MW:

Dari tabel sebelumnya:

$$h_3 = 2240.6 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 1303.3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{4s} = 1280.69 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{turbin, 30 MW}} = \frac{2240.6 - 1303.3}{2240.6 - 1280.69} \times 100\% = \frac{937.3}{959.91} \times 100\% \approx 97.10\%$$

Beban 50 MW:

Dari tabel sebelumnya:

- $h_3=2458.7\text{kJ/kg}$
- $h_4=1415.63\text{ kJ/kg}$
- $h_{4s}=1391.05\text{ kJ/kg}$

$$\eta_{\text{turbin, 50 MW}} = \frac{2458.7 - 1415.63}{2458.7 - 1391.05} \times 100\% = \frac{1043.07}{1067.65} \times 100\% \approx 97.69\%$$

Beban 75 MW:

Dari tabel sebelumnya:

- $h_3=2763.6\text{ kJ/kg}$
- $h_4=1568.7\text{ kJ/kg}$
- $h_{4s}=1545.18\text{ kJ/kg}$

$$\eta_{\text{turbin, 75 MW}} = \frac{2763.6 - 1568.7}{2763.6 - 1545.18} \times 100\% = \frac{1194.9}{1218.42} \times 100\% \approx 98.11\%$$

Beban 100 MW:

Dari tabel sebelumnya:

- $h_3=3056.6\text{ kJ/kg}$
- $h_4=1716.0\text{ kJ/kg}$
- $h_{4s}=1691.05\text{ kJ/kg}$

$$\eta_{\text{turbin, 100 MW}} = \frac{3056.6 - 1716.0}{3056.6 - 1691.05} \times 100\% = \frac{1340.6}{1365.55} \times 100\% \approx 98.36\%$$

Tabel 4.8 Efisiensi Turbin

Beban (MW)	h_3 (kJ/kg)	h_4 (kJ/kg)	h_{4s} (kJ/kg)	Efisiensi Turbin (%)
30	2240.6	1303.3	1280.69	97.10
50	2458.7	1415.63	1391.05	97.69
75	2763.6	1568.7	1545.18	98.11
100	3056.6	1716.0	1691.05	98.36

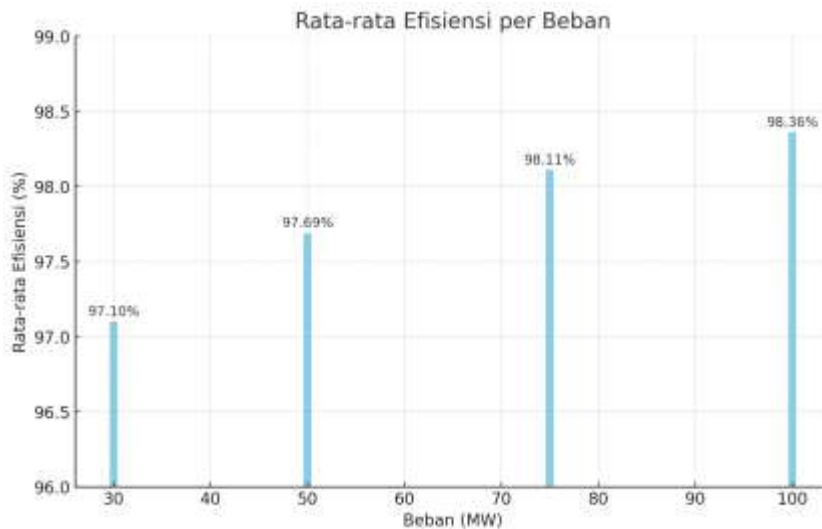
Sumber : Hasil perhitungan penulis, 2024

Dengan menggunakan rumus yang sama, kita dapat melihat fluktuasi efisiensi turbin pada berbagai beban operasi. Perhitungan ini menunjukkan bahwa efisiensi turbin sedikit meningkat seiring dengan peningkatan beban dari 30 MW ke 100 MW.

Gggdbcjd

Gambar 4.1 Grafik Efisiensi turbin gas diberbagai beban

Sumber : penulis, 2024



rbin untuk beban 50 MW. Mari kita hitung efisiensi turbin untuk beban 30 MW, 75 MW, dan 100 MW.

4.4. Perhitungan Konsumsi Bahan Bakar tiap minggu

Untuk menghitung konsumsi bahan bakar, kita menggunakan data laju aliran bahan bakar yang sudah diberikan. Berikut adalah cara menghitung konsumsi bahan bakar per beban berdasarkan data yang diberikan.

Langkah-langkah Perhitungan

1. Menentukan Laju Aliran Bahan Bakar (Fuel Flow) Laju aliran bahan bakar (Q) sudah diberikan dalam satuan m³/s untuk setiap beban. Ini adalah volume bahan bakar yang mengalir per detik.
2. Menggunakan Specific Gravity (SG) untuk Menghitung Massa Jenis Bahan Bakar Specific Gravity (SG) dari bahan bakar natural gas adalah 0.6124 pada kondisi standar (14,7 Psia). Massa jenis bahan bakar (ρ) dapat dihitung menggunakan hubungan antara specific gravity dan massa jenis udara standar (ρ_{air}):

$$\rho = SG \times \rho_{air}$$

Dengan massa jenis udara standar (ρ_{air}) adalah sekitar 1.225 kg/m³.

Menghitung Konsumsi Bahan Bakar (m³bb)

Konsumsi bahan bakar dapat dihitung dengan mengalikan laju aliran bahan bakar dengan massa jenis bahan bakar:

$$m_{bb} = Q \times \rho$$

Contoh Perhitungan

Mari kita hitung konsumsi bahan bakar untuk masing-masing beban.

Beban 30 MW

- Laju aliran bahan bakar (Q) = 4.3556 m³/s
- Specific Gravity (SG) = 0.6124
- Massa jenis udara standar (ρ_{air}) = 1.225 kg/m³
- Massa jenis bahan bakar (ρ) = 0.6124 × 1.225 = 0.75019 kg/m³

- Konsumsi bahan bakar (m_{bb}) = $4.3556 \text{ m}^3/\text{s} \times 0.75019 \text{ kg/m}^3 = 3.26 \text{ kg/s}$

Beban 50 MW

- Laju aliran bahan bakar (Q) = $5.4528 \text{ m}^3/\text{s}$
- Specific Gravity (SG) = 0.6124
- Massa jenis udara standar (ρ_{air}) = 1.225 kg/m^3
- Massa jenis bahan bakar (ρ) = $0.6124 \times 1.225 = 0.75019 \text{ kg/m}^3$
- Konsumsi bahan bakar (m_{bb}) = $5.4528 \text{ m}^3/\text{s} \times 0.75019 \text{ kg/m}^3 = 4.10 \text{ kg/s}$

Beban 75 MW

- Laju aliran bahan bakar (Q) = $7.0556 \text{ m}^3/\text{s}$
- Specific Gravity (SG) = 0.6124
- Massa jenis udara standar (ρ_{air}) = 1.225 kg/m^3
- Massa jenis bahan bakar (ρ) = $0.6124 \times 1.225 = 0.75019 \text{ kg/m}^3$
- Konsumsi bahan bakar (m_{bb}) = $7.0556 \text{ m}^3/\text{s} \times 0.75019 \text{ kg/m}^3 = 5.30 \text{ kg/s}$

Beban 100 MW

- Laju aliran bahan bakar (Q) = $8.5889 \text{ m}^3/\text{s}$
- Specific Gravity (SG) = 0.6124
- Massa jenis udara standar (ρ_{air}) = 1.225 kg/m^3
- Massa jenis bahan bakar (ρ) = $0.6124 \times 1.225 = 0.75019 \text{ kg/m}^3$
- Konsumsi bahan bakar (m_{bb}) = $8.5889 \text{ m}^3/\text{s} \times 0.75019 \text{ kg/m}^3 = 6.44 \text{ kg/s}$

Konsumsi Bahan Bakar

Konsumsi bahan bakar per beban dapat dilihat dari tabel berikut:

Tabel 4.9 Hasil perhitungan konsumsi bahan bakar

Beban (MW)	Konsumsi bahan bakar (kg/s)
30	3.26
50	4.10
75	5.30
100	6.44

Sumber : Hasil perhitungan

4.5 Data hasil Perhitungan efisiensi, Bahan bakar, Fluktuasi beban dan Beban

Berikut adalah tabel data operasi selama 4 minggu dengan variasi beban 30 MW, 50 MW, 75 MW, dan 100 MW untuk melihat fluktuasi. Data setiap minggu terdiri dari 5 hari dengan beban yang bervariasi

Tabel 4.10 Perhitungan Minggu 1

Hari	Beban (MW)	Efisiensi(%)	Fluktuasi Beban (MW)	Konsumsi Bahan Bakar (kg)
1	30	97.10	-	3.26
2	50	97.69	20	4.10
3	75	98.11	25	5.30

4	100	98.36	25	6.44
5	50	97.69	50	4.10

Untuk menghitung rata-rata beban, efisiensi, dan fluktuasi sesuai tabel di atas, kita akan menggunakan rumus rata-rata aritmetika.

Rata-rata Beban

$$\text{Rata-rata Beban} = \frac{30 + 50 + 75 + 100 + 50}{5} = \frac{305}{5} = 61 \text{ MW}$$

Rata-rata Efisiensi

$$\text{Rata-rata Efisiensi} = \frac{97.10 + 97.69 + 98.11 + 98.36 + 97.69}{5} = \frac{488.95}{5} = 97.79\%$$

Rata-rata konsumsi bahan

Rata-rata Fluktuasi Beban

$$\text{Rata-rata Fluktuasi Beban} = \frac{20 + 25 + 25 + 50}{4} = \frac{120}{4} = 30 \text{ MW}$$

Tabel 4.11 Perhitungan Minggu 2

Hari	Beban (MW)	Efisiensi(%)	Fluktuasi Beban (MW)	Konsumsi Bahan Bakar (kg/s)
1	30	97.10	-	3.26
2	75	98.11	45	5.30
3	100	98.36	25	6.44
4	50	97.69	50	4.10
5	30	97.10	20	3.26

Rata-rata Beban

$$\text{Rata-rata Beban} = \frac{30 + 75 + 100 + 50 + 30}{5} = \frac{285}{5} = 57 \text{ MW}$$

Rata-rata Efisiensi

$$\text{Rata-rata Efisiensi} = \frac{97.10 + 98.11 + 98.36 + 97.69 + 97.10}{5} = \frac{488.36}{5} = 97.67\%$$

Rata-rata Fluktuasi Beban

$$\text{Rata-rata Fluktuasi Beban} = \frac{45 + 25 + 50 + 20}{4} = \frac{140}{4} = 35 \text{ MW}$$

	(MW)		Beban (MW)	Bahan Bakar (kg/s)
1	75	98.11	-	5.30
2	100	98.36	25	6.44
3	50	97.69	50	4.10

4	30	97.10	20	3.26
5	75	98.11	45	5.30

Rata-rata Beban

$$\text{Rata-rata Beban} = \frac{75 + 100 + 50 + 30 + 75}{5} = \frac{330}{5} = 66 \text{ MW}$$

Rata-rata Efisiensi

$$\text{Rata-rata Efisiensi} = \frac{98.11 + 98.36 + 97.69 + 97.10 + 98.11}{5} = \frac{489.37}{5} = 97.87\%$$

Rata-rata Fluktuasi Beban

$$\text{Rata-rata Fluktuasi Beban} = \frac{25 + 50 + 20 + 45}{4} = \frac{140}{4} = 35 \text{ MW}$$

Rata- rata Konsumsi Bahan Bakar = 4.88 kg/s

Tabel 4.13 Perhitungan Minggu 4

Hari	Beban (MW)	Efisiensi(%)	Fluktuasi Beban (MW)	Konsumsi bahan bakar (kg/s)
1	100	98.36	-	6.44
2	50	97.69	50	4.30
3	30	97.10	20	3.26
4	75	98.11	45	5.30
5	100	98.36	25	6.44

Rata- rata Konsumsi Bahan Bakar = 5.14 kg/s

Grafik average Fluktuasi Beban

Rata-rata Beban

$$\text{Rata-rata Beban} = \frac{100 + 50 + 30 + 75 + 100}{5} = \frac{355}{5} = 71 \text{ MW}$$

Rata-rata Efisiensi

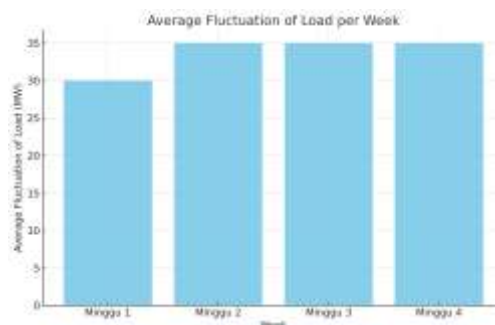
$$\text{Rata-rata Efisiensi} = \frac{98.36 + 97.69 + 97.10 + 98.11 + 98.36}{5} = \frac{489.62}{5} = 97.92\%$$

Rata-rata Fluktuasi Beban

$$\text{Rata-rata Fluktuasi Beban} = \frac{50 + 20 + 45 + 25}{4} = \frac{140}{4} = 35 \text{ MW}$$

Gambar 4.2 Grafik rata-rata fluktuasi beban

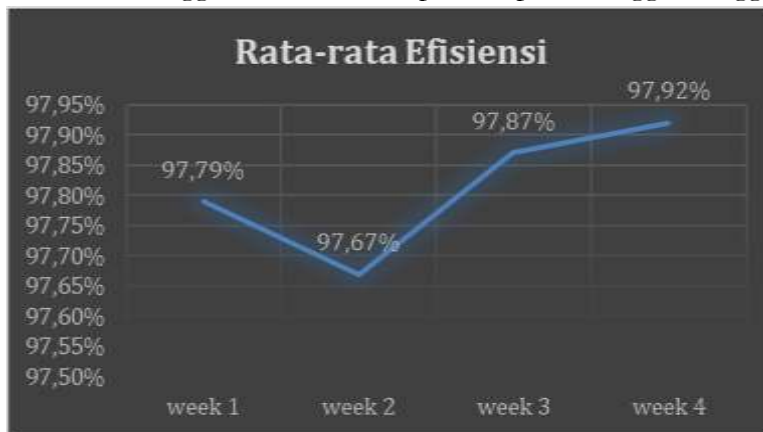
Sumber : Penulis, 2024



Berikut adalah grafik yang menunjukkan rata-rata fluktuasi beban (MW) dari minggu ke-1 sampai minggu ke-4. Grafik ini menggambarkan bagaimana fluktuasi beban berkisar pada nilai tertentu di setiap minggunya. Terlihat bahwa rata-rata fluktuasi beban adalah sebagai berikut:

- Minggu 1: 30 MW
- Minggu 2: 35 MW
- Minggu 3: 35 MW
- Minggu 4: 35 MW

Hal ini menunjukkan bahwa fluktuasi beban mengalami sedikit peningkatan dari minggu pertama ke minggu kedua, dan tetap stabil pada minggu-minggu berikutnya.



Gambar 4.3 Grafik rata-rata Efisiensi Turbin

Sumber : penulis

Berikut adalah grafik yang menunjukkan rata-rata efisiensi turbin (%) dari minggu ke-1 sampai minggu ke-4. Grafik ini menggambarkan bagaimana efisiensi turbin sedikit berfluktuasi setiap minggunya. Rata-rata efisiensi adalah sebagai berikut:

- Minggu 1: 97.79%
- Minggu 2: 97.67%
- Minggu 3: 97.87%
- Minggu 4: 97.92%

Grafik ini menunjukkan bahwa efisiensi turbin relatif stabil dengan sedikit peningkatan dari minggu kedua ke minggu keempat.



Gambar 4.4 Grafik rata-rata konsumsi bahan bakar

Sumber : penulis

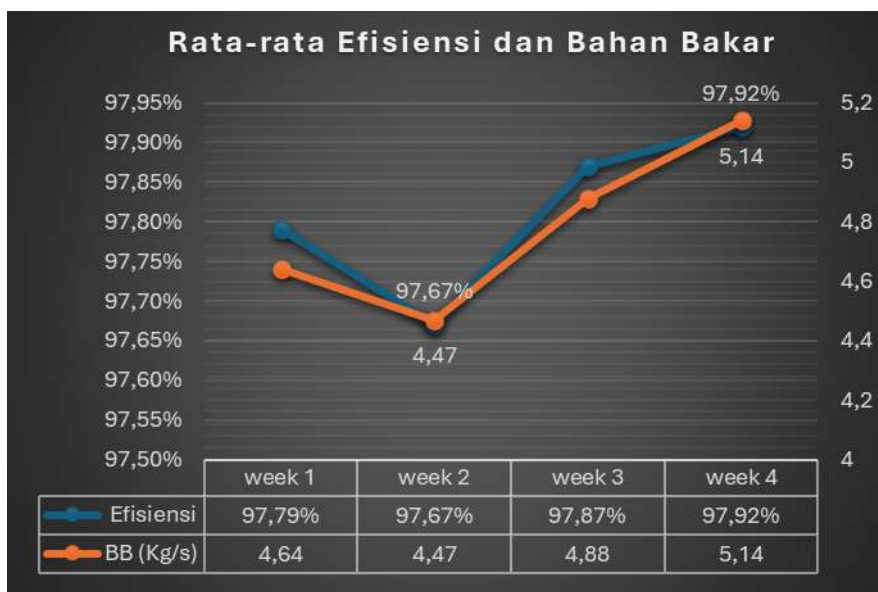
Berikut adalah grafik yang menunjukkan rata-rata konsumsi bahan bakar (L) dari minggu ke-1 sampai minggu ke-4. Grafik ini menggambarkan bagaimana konsumsi bahan bakar bervariasi setiap minggunya. Terlihat bahwa rata-rata konsumsi bahan bakar adalah sebagai berikut:

- Minggu 1: 4.64 kg/s
- Minggu 2: 4.47 kg/s
- Minggu 3: 4.88 kg/s
- Minggu 4: 5.14 kg/s

Grafik ini menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar mengalami sedikit penurunan dari minggu pertama ke minggu kedua, kemudian meningkat cukup signifikan pada minggu ketiga dan keempat.

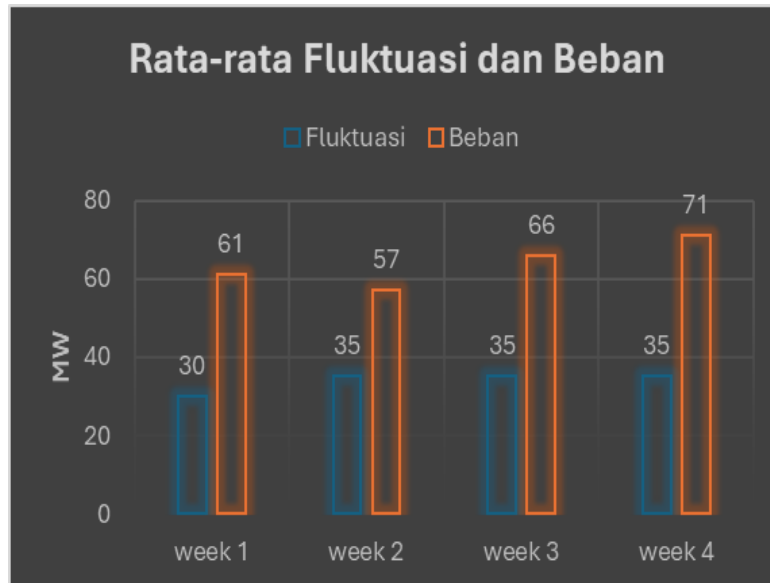
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan average Efisiensi dan Bahan bakar

Sumber : penulis, 2024



Efisiensi tertinggi diweek ke4 dengan hasil 97,90% dan terendah terdapat diweek ke 2 dengan hasil 97,67% sedangkan untuk bahan bakar sendiri tertinggi di week ke 4 dengan hasil 5,14 kg/s dan terendah diweek ke 2 dengan hasil 4,47kg/

Gambar 4.6 Grafik perbandingan average Fluktuasi dan Beban



Sumber : penulis, 2024 Untuk fluktuasi tertinggi dengan hasil yang sama terdapat di week 2, week 3 dan week 4 dengan hasil 35 terendah terdapat di week 1 dengan hasil 30 sedangkan untuk beban nilai tertinggi terdapat dalam week ke 4 dengan hasil 71 dan terendah pada week ke 2 dengan hasil 57

Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan analisis performa turbin gas dan data yang sudah diambil perhari selama bulan juni, dengan nilai fluktuasi yang bisa dikatakan stabil, maka bisa disimpulkan bahwa nilai efisiensi tidak ditentukan dari nilai fluktuasi, melainkan dari nilai beban. Dilihat dari nilai rata-rata efisiensi tertinggi pada bulan juni adalah pada week ke 4, tetapi nilai konsumsi bahan bakar cenderung yang tertinggi/boros, dan sebaliknya, konsumsi bahan bakar yang terendah ada pada week ke 2, tetapi kinerja turbine gas memiliki efisiensi terendah, maka bisa disimpulkan bahwa week ke 3 adalah nilai keseluruhan yang terbaik dengan nilai rata-rata efisiensi 97,87%, nilai konsumsi bahan bakar 4.88 kg/s, beban 66 MW dan Fluktuasi beban 35 MW, yang artinya keseluruhan data atau nilai pada minggu ke-3 memiliki nilai yang stabil atau terbaik dibandingkan dengan minggu lainnya.

- **Efisiensi dan Fukuasi Beban:** Dilihat diminggu pertama dengan minggu ketiga, dengan rata-rata nilai fluktuasi yang berbeda, antara 30 pada minggu pertama dan 35MW pada minggu ketiga, nilai efisiensi lebih baik pada fluktuasi beban 35 dengan efisiensi 97.87 berbanding 97.67 dengan fluktuasi beban yang lebih rendah.
- **Konsumsi Bahan Bakar dan Fluktuasi :** Konsumsi bahan bakar yang pada minggu pertama 4.64 kg/s mengalami penurunan pada minggu kedua dan terus meningkat pada

minggu ke3 hingga ke5 yang artinya tidak terpengaruh dengan nilai fluktuasi yang pada minggu pertama redah dan minggu kedua hingga ke4 stabil pada fluktuasi beban 35MW

- **Efisiensi dan Bahan bakar:** Efisiensi dan Bahan bakar berjalan lurus sebanding dengan nilai rata-rata Beban, tidak terpengaruh dengan nilai rata-rata Fluktuasi beban dengan efisiensi tertinggi diweek ke4 dengan hasil 97,90% dan terendah terdapat diweek ke 2 dengan hasil 97,67% sedangkan untuk bahan bakar sendiri tertinggi di week ke 4 dengan hasil 5,14 kg/s dan terendah diweek ke 2 dengan hasil 4,47kg/s
- **Rata-rata Fluktuasi Beban (MW):**Delta beban terendah tercatat pada Minggu ke-1, dan kemudian meningkat pada Minggu ke-2, Setelah penurunan tersebut, delta beban tetap relatif stabil dari Minggu ke-2 hingga Minggu ke-4

Daftar Pustaka

- Aji, I. (2019). Analisa pengaruh variasi beban terhadap unjuk kerja sistem turbin gas di PT. Riau Power - Pekanbaru (Other thesis). Universitas Islam Riau.
- Annur, M. N. (2017). Pengaruh variasi beban terhadap performa turbin gas di PLTGU Blok GT 1.3 PT. Indonesia Power Grati, Pasuruan.
- Dewi, D. K. (2018). Perhitungan Unjuk Kerja Turbin Gas SOLAR SATURN Pada Unit Pembangkit Daya Joint Operating Body PERTAMINA – PETROCHINA East Java (JOB P-PEJ).
- Engineering Toolbox. (2017). Specific Heat Capacity of Gases. Diakses dari https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-gases-d_159.html
- Hasan, M. H. (2018). Analisis Termodinamika pada Sistem Turbin Gas di Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) Grati Pasuruan. Universitas Indonesia.
- Martin, A., Miswandi, Prayitno, A., Kurniawan, I., & Romy. (2019). Exergy analysis of gas turbine power plant 20 MW in Pekanbaru-Indonesia. *International Journal of Technology*, 7(5), 921–927.
- Maulana, R. S. (2018). Analisis pengaruh variasi beban turbin gas terhadap kinerja siklus gabungan PLTGU Blok 1 di PT. Indonesia Power UJPP Perak Grati Pasuruan.
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2009). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (Edisi ke-7). John Wiley & Sons Inc.
- Naryono, L. B., Ir. (2021). Analisis efisiensi turbin gas terhadap beban operasi PLTGU Muara Tawar Blok 1. *Sintek*, 7(2), 78–94.
- Saragih, H. S., & Prabowo, H. T. (2020). Efisiensi dan Performa Sistem Turbin Gas pada Berbagai Tingkat Beban: Studi Kasus PLTGU Grati Pasuruan. *Jurnal Teknik Energi*, 10(2), 78-87.
- Setiawan, B., & Wibowo, A. (2019). Analisis Pengaruh Variasi Beban Terhadap Efisiensi dan Unjuk Kerja Sistem Turbin Gas di PLTGU Grati Pasuruan. *Jurnal Teknik Mesin Universitas Diponegoro*, 8(1), 45-52.
- Turbomachinery Magazine. (2017). Choosing Gas Turbines: Single vs. Two Shaft. Diakses dari <https://www.turbomachinerymag.com/choosing-gas-turbines-single-vs-two-shaft>