

KAJIAN BAHAN BAKAR HSD, MFO, LNG TERHADAP BIAYA DAN DAYA LISTRIK YANG DIHASILKAN DI PLTG PEMARON

Putu Satria Abdi Wicaksana¹, Anak Agung Gede Maharta Pemayun², I Nyoman Setiawan³

¹Energi dan Sistem Tenaga Listrik, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

²Energi dan Sistem Tenaga Listrik, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

Jl. Raya Kampus Unud No.88, Jimbaran

satriaaw7@gmail.com, maharta.pemayun@unud.ac.id, setiawan@ee.unud.ac.id

ABSTRAK

Dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik maka diperlukannya langkah-langkah untuk meningkatkan produksi energi listrik dan salah satunya adalah pengkajian bahan bakar PLTG. Pengkajian bahan bakar PLTG bertujuan untuk menganalisis perbandingan daya listrik yang dihasilkan dan biaya bahan bakar terhadap daya yang dihasilkan PLTG. Manfaat yang didapat dari pengkajian ini adalah diketahuinya seberapa besar perbandingan daya dan biaya bahan bakar terhadap daya yang dihasilkan, sehingga dapat dijadikan referensi untuk menentukan bahan bakar mana yang cocok untuk digunakan. Dengan metode analisis deskriptif kuantitatif dimana data kualitatif dari hasil perhitungan akan dijabarkan secara deskriptif sehingga dapat diketahui kelebihan, kekurangan dan perbedaan dari ketiga bahan bakar. Melalui perhitungan SFC hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa bahan bakar LNG memiliki nilai SFC yang paling rendah yaitu sebesar 0,13 kg/kWh sedangkan untuk HSD sebesar 0,33 kg/kWh dan MFO sebesar 0,43 kg/kWh. Dengan keadaan jumlah bahan bakar yang setara daya yang dihasilkan LNG masih lebih tinggi dari dua bahan bakar lainnya yaitu sebesar 40,48 kWh, disusul dengan HSD yaitu sebesar 25,77 kWh dan MFO sebesar 22,63 kWh. Jika dilihat dari sisi ekonomi bahan bakar LNG juga menjadi bahan bakar yang paling murah dengan harga Rp. 33.639,02,-, sedangkan MFO sedikit lebih murah dari HSD yaitu sebesar Rp. 194.000,00 dan untuk bahan bakar HSD yaitu sebesar Rp. 223.500,00,-.

Kata kunci : PLTG, Daya Listrik, Biaya, Bahan bakar, SFC.

ABSTRACT

With the increasing demand for electrical energy, steps are needed to increase the production of electrical energy and one of them is the study of PLTG fuel. The PLTG fuel study aims to analyze the ratio of the generated electric power and fuel costs to the power generated by the PLTG. The benefit of this study is to know how much the ratio of power and fuel costs to the power produced, so that it can be used as a reference to determine which fuel is suitable for use. With a quantitative descriptive analysis method where the qualitative data from the calculation results will be described descriptively so that the advantages, disadvantages and differences of the three fuels can be identified. Through SFC calculations the results of this study show that LNG fuel has the lowest SFC value of 0.13 kg/kWh while for HSD it is 0.33 kg/kWh and MFO is 0.43 kg/kWh. With the same amount of fuel, the power produced by LNG is still higher than the other two fuels, which is 40.48 kWh, followed by HSD, which is 25.77 kWh, and MFO, which is 22.63 kWh. When viewed from an economic perspective, LNG is also the cheapest fuel, with a price of IDR 33,639.02, -, while MFO is slightly cheaper than HSD, which is IDR 194,000.00 and for HSD fuel, which is IDR 223,500.00,-.

Key Words : PLTG, Electric Power, Cost, Fuel, SFC.

1. PENDAHULUAN

Energi listrik adalah salah satu kebutuhan masyarakat yang sangat penting

terutama sebagai sumber daya ekonomis yang utama. Karena energi listrik yang dibangkitkan tidak dapat disimpan dalam skala besar, maka energi ini harus disediakan pada saat yang dibutuhkan. Akibatnya timbul masalah yaitu bagaimana suatu sistem pembangkit listrik dioperasikan agar dapat memenuhi permintaan daya yang selalu berubah-ubah. Faktor yang mempengaruhi penyaluran daya listrik yang optimal pada pembangkit listrik adalah beroperasinya generator secara efisien, biaya bahan bakar yang murah dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi. Banyak generator dapat beroperasi secara efisien tetapi tidak menjamin biaya operasionalnya secara minimum dikarenakan biaya bahan bakar yang kadang terlalu tinggi.

Pembangkit Listrik Tenaga Gas atau PLTG adalah pembangkit yang menggunakan jenis bahan bakar cair dan gas. Dimana bahan bakar tersebut dibutuhkan dalam proses pembakaran yang mana hasil dari proses pembakaran tersebut dibutuhkan untuk menggerakkan turbin yang satu poros dengan generator, pada saat turbin berputar maka generator juga akan berputar yang kemudian generator tersebut menghasilkan energi listrik. PLTG Pamaron yang terletak di daerah Buleleng, tepatnya di jalan Seririt-Singaraja adalah salah satu dari pembangkit yang terdapat di daerah kabupaten Buleleng yang langsung memberi pasokan energi listrik ke kota Singaraja dan sekitarnya. Tentu untuk saat ini PLTG Pamaron masih sanggup untuk memberikan pasokan energi, namun dalam waktu dekat pemerintah akan melakukan pembangunan besar-besaran di daerah Buleleng yang mana salah satunya adalah membangun sebuah bandara udara. Dengan adanya bandara udara akan mengakibatkan daerah Buleleng menjadi salah satu pusat destinasi wisata di Bali, sehingga pembangunan demi meningkatkan pariwisata pun akan dilakukan oleh pemerintah. Dengan demikian PLTG pamaron tentu akan dituntut untuk dapat memberikan pasokan energi yang mencukupi bukan hanya untuk bandara udara saja, namun untuk semua penduduk yang ada di kota Singaraja dan sekitarnya.

Sehingga pengkajian bahan bakar pada PLTG Pamaron dapat dijadikan sebagai salah satu bentuk dalam peningkatan produksi energi listrik di pulau Bali khususnya di daerah Buleleng. Dengan menggunakan analisis nilai Specific Fuel

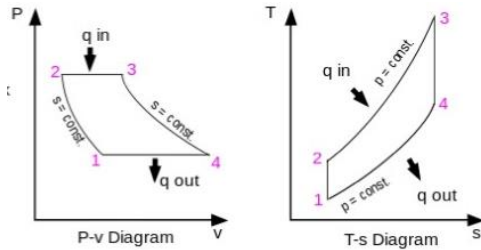
Consumption (SFC) pada mesin pembangkit listrik merupakan salah satu penentu biaya produksi khususnya biaya bahan bakar yang diperlukan dalam pembangkit. Dengan mengetahui konsumsi spesifik bahan bakar dapat menjelaskan seberapa optimal kinerja mesin untuk meningkatkan daya pembangkitan dan meminimalisir pemborosan bahan bakar sehingga tercipta peluang penghematan biaya produksi. Adapun penelitian yang sudah dilakukan terkait dengan analisis SFC pada PLTG diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Partogi dkk [1] di PT. Indonesia Power Unit Pembangkitan Bali didapatkan bahwa analisis SFC dari penggunaan bahan bakar LNG adalah sebesar 500-700 Rp/kWh lebih murah dari menggunakan bahan bakar HSD dan dengan daya yang terbangkitkan secara teoritis sebesar 41,76 MW pada HSD yang sedikit lebih besar dari daya yang dibangkitkan dengan LNG yaitu sebesar 41,70 MW. Penelitian yang terkait dengan analisis SFC juga dilakukan oleh Adikumoro dkk [2] di PT. Indonesia Power UBP Bali Unit Pesanggaran, dengan menggunakan analisis yang sama didapatkan bahwa penggunaan bahan bakar HSD dapat menghemat biaya sebesar Rp. 31.902.873.575 dari pada menggunakan bahan bakar MFO.

Dengan bercermin dari kedua penelitian yang sudah dilakukan tersebut, jurnal ini akan menganalisis 3 bahan bakar sekaligus yaitu HSD, MFO dan LNG yang nantinya akan berfokus pada seberapa besar daya yang dihasilkan dan seberapa besar perbandingan biaya operasional dari ketiga bahan bakar tersebut.

2. METODE PENGKAJIAN

2.1 Prinsip Kerja PLTG

Pembangkit listrik tenaga gas adalah pembangkit listrik yang memakai gas bertemperatur dan bertekanan tinggi untuk menggerakkan turbin gas yang 1 poros dengan generator sehingga energi listrik dapat dihasilkan. Udara dan bahan bakar yang saling bereaksi kemudian menjadi gas yang akan menghasilkan energi gerak kemudian dikonversi menjadi energi listrik [3].



Gambar 1. P-v & T-s Diagram siklus Brayton

Gambar 1 diatas adalah gambar dari diagram siklus Brayton yang mana siklus Brayton adalah siklus yang paling ideal dalam sistem PLTG, siklus-siklus tersebut memiliki 4 proses adalah sebagai berikut [3]:

(a) (1-2) Proses Kompresi Isentropik

Kompresi isentropik, adalah proses udara yang masuk ke dalam turbin gas melalui bagian inlet kompresor. Kemudian udara di kompres sampai pada tekanan tertentu. Dalam proses ini tidak terjadinya perubahan entropi pada gas [4].

$$W_K = m_{udara}(h_2 - h_1) \quad (1)$$

Karena nilai mudara dibutuhkan dalam perhitungan kerja kompresor, maka persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut [5]:

$$m_{udara} = A/F \times m_{bb} \quad (2)$$

$$m_{bb} = Q_{bb} \times \rho_{bb} \quad (3)$$

Sedangkan untuk perhitungan entalpi pada titik 1 dan 2 menggunakan persamaan sebagai berikut [6]:

$$\frac{T_{atas}-T_{bawah}}{T_1-T_{bawah}} = \frac{h_{atas}-h_{bawah}}{h_1-h_{bawah}} \quad (4)$$

$$\frac{T_{atas}-T_{bawah}}{T_2-T_{bawah}} = \frac{h_{atas}-h_{bawah}}{h_2-h_{bawah}} \quad (5)$$

Karena pada titik 2 terjadinya kompresi isentropik, maka menggunakan persamaan sebagai berikut [5]:

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (6)$$

$$\frac{T_{atas}-T_{bawah}}{T_1-T_{bawah}} = \frac{Pr_{atas}-Pr_{bawah}}{Pr_1-Pr_{bawah}} \quad (7)$$

$$Pr'_2 = Pr_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (8)$$

$$\frac{Pr_{atas}-Pr_{bawah}}{Pr'_2-Pr_{bawah}} = \frac{h_{atas}-h_{bawah}}{h_{2s}-h_{bawah}} \quad (9)$$

(b) (2-3) Proses Pembakaran Isobarik

Pembakaran isobarik, adalah proses udara hasil kompresi masuk ke ruang bakar yang kemudian diinjeksikan bahan bakar. Proses pembakaran tersebut menghasilkan gas bertemperatur tinggi, dimana gas yang dihasilkan dari proses pembakaran tidak mengalami perubahan tekanan karena gas langsung menuju ke bagian inlet turbin [3].

Jumlah kalor yang dimasukkan pada proses pembakaran tergantung pada jumlah

massa bahan bakar dan efisiensi dari ruang bakar tersebut. Maka diperoleh persamaan sebagai berikut [5]:

$$Q_{in} = \frac{LHV_{bahan\ bakar}}{\rho_{bb}} \times m_{bb} \quad (10)$$

Sedangkan untuk perhitungan entalpi pada titik 3 menggunakan persamaan sebagai berikut [5]:

$$h_3 = Cp_{combustion\ product} \times T_3 \quad (11)$$

Karena pada proses ini kadang terjadinya gangguan atau kesalahan dalam pengukuran suhu atau T3, maka dapat menggunakan persamaan sebagai berikut [5]:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (12)$$

(c) (3-4) Proses Ekspansi Isentropik

Ekspansi isentropik, adalah proses dari gas bersuhu tinggi yang mengalir menuju turbin gas, dimana turbin gas berfungsi sebagai pengkonversi dari energi termal menjadi energi gerak. Energi gerak yang dihasilkan kemudian digunakan turbin untuk memutar generator dan kompresor dengan tujuan membangkitkan energi listrik [3].

$$W_T = (m_{ud} + m_{bb})(h_3 - h_4) \quad (13)$$

Sedangkan untuk perhitungan entalpi pada titik 4 menggunakan persamaan sebagai berikut [5]:

$$h_4 = Cp_{combustion\ product} \times T_4 \quad (14)$$

Karena pada titik 2 terjadinya kompresi isentropik, maka menggunakan persamaan sebagai berikut [5]:

$$\frac{T_{4s}}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (15)$$

$$h_{4s} = Cp_{combustion\ product} \times T_{4s} \quad (16)$$

(d) (4-1) Proses Pembuangan Panas

Pelepasan kalor, adalah proses pembuangan gas limbah PLTG kembali ke atmosfer. Karena gas pada siklus Brayton ideal tertutup masih menyisakan energi panas pada saat keluar dari sisi outlet turbin, maka gas yang keluar dari turbin disirkulasikan kembali melalui heat exchanger [3].

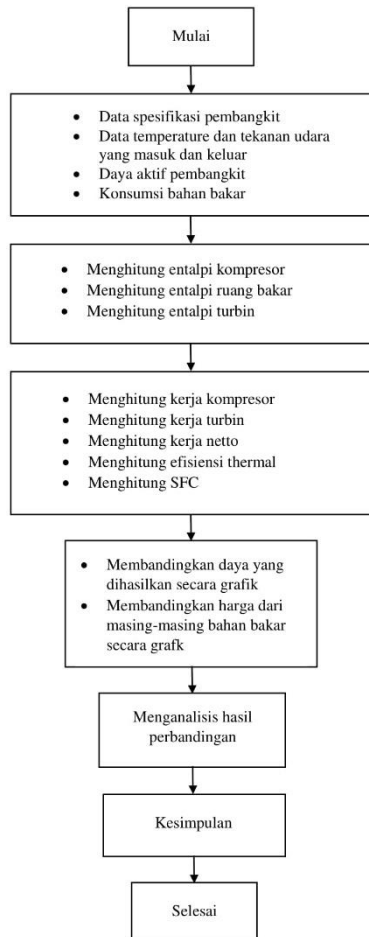
2.2 Specific Fuel Cosumption

SFC adalah banyaknya bahan bakar yang digunakan untuk membangkitkan besaran daya dalam besaran waktu. SFC dalam kondisi terbaik pada saat nilainya kecil dan nilai SFC akan menurun dengan cepat dalam kondisi suhu dingin [7].

$$SFC = \frac{m_{bb}}{W_{nett}} \quad (17)$$

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di PLTG Indonesia Power Pemaron Jalan Seririt-Singaraja, Kecamatan Buleleng, Kabupaten Buleleng, Bali dengan waktu penelitian dari bulan Januari 2022 – Juli 2022. Analisis Data dapat dilihat pada Gambar 3:



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Berikut penjelasan pada Gambar 2:

Langkah 1. Pengumpulan Data

Penelitian kajian bahan bakar diawali dengan pengumpulan data, yaitu data spesifikasi pembangkit, daya aktif pembangkit, konsumsi bahan bakar, temperature dan tekanan udara yang masuk keluar dari kompresor ruang bakar dan turbin gas. Data tersebut diperoleh dari data pencatatan yang telah dilakukan di PLTG PT. Indonesia Power Pemaron pada tanggal 28 Desember 2013.

Langkah 2. Analisis Entalpi pada Kompresor, Ruang Bakar dan Turbin Gas

Analisis dilakukan untuk mengetahui entalpi yang dihasilkan dari titik-titik pengukuran yang divariasikan dengan 3 bahan bakar yaitu HSD, MFO dan LNG. Dengan diketahuinya entalpi dari ketiga bahan bakar maka proses analisis berikutnya dapat dilakukan.

Langkah 3. Analisis Kerja Kompresor, Turbin, Daya Netto, Efisiensi termal dan SFC.

Dalam analisis ini perhitungan laju massa aliran bahan bakar dari 3 jenis bahan bakar perlu dicari terlebih dahulu yang kemudian analisis akan berujung pada didapatkannya daya netto yang lalu diakhiri dengan analisis menggunakan perhitungan SFC untuk mendapatkan data dari masing-masing bahan bakar yang mana akan dijadikan sebagai dasar perbandingan.

Langkah 4. Membandingkan Daya yang dihasilkan dan Biaya yang diperlukan dari masing-masing bahan bakar.

Setelah didapatkannya nilai SFC dari masing-masing bahan bakar kemudian akan di bandingkan dari sisi daya yang dihasilkan dan biaya yang dikeluarkan dari masing-masing bahan bakar dengan tujuan untuk mengetahui mana bahan bakar yang terbaik.

Langkah 5. Menganalisis Hasil Perbandingan dengan menggunakan beberapa kondisi tambahan

Dengan membuat kondisi dimana jika daya yang dihasilkan adalah 10 kWh dan bahan bakar yang digunakan sebanyak 10 liter, maka akan didapatkan hasil yang lebih spesifik lagi untuk mengetahui mana bahan bakar yang terbaik

Langkah 6 Penarikan Kesimpulan

Berdasarkan langkah keempat dan kelima maka penarikan kesimpulana dapat dilakukan dengan harapan dapat memberikan penjelasan lebih mudah.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pencatatan

Pada tabel 1 adalah data yang didapat dari hasil pencatatan *logsheet* yang dilakukan di turbin gas unit 1 PLTG Pemaron pada tanggal 28 Desember 2013

Tabel 1. Data temperatur, tekanan gas dan laju massa aliran bahan bakar PLTG Pemaron yang sudah di konversi

Waktu (h)	T1 (K)	T2 (K)	T3 (K)	T4 (K)	P1=P4 (Psi)	P2=P3 (Psi)	m _{bb} (kg/s)	Beban (MW)
00.00	300,92	592,59	-	701,48	14,69	123,6	3,52	40
01.00	299,26	591,48	-	689,15	14,69	124,2	3,54	40
02.00	298,70	589,26	-	695,37	14,69	124,4	3,54	40
03.00	297,59	588,70	-	693,70	14,69	124,8	3,53	40
04.00	297,03	587,03	-	693,15	14,69	124,5	3,51	40
05.00	297,03	588,15	-	697,03	14,69	124,1	3,49	40
06.00	296,48	585,37	-	692,59	14,69	124,4	3,52	40
07.00	300,37	590,92	-	700,92	14,69	123,4	3,52	40
08.00	302,03	593,70	-	703,70	14,69	123,1	3,54	40
09.00	303,15	595,37	-	712,03	14,69	122,5	3,54	40
10.00	304,26	597,59	-	709,26	14,69	121,9	3,54	40
11.00	303,70	598,15	-	708,70	14,69	122,9	3,54	40
12.00	303,70	595,92	-	705,37	14,69	121,8	3,54	40
13.00	304,26	597,03	-	711,48	14,69	122,3	3,52	40
14.00	304,26	597,59	-	708,70	14,69	122,5	3,51	40
15.00	304,26	595,37	-	712,03	14,69	122	3,55	40
16.00	303,70	595,37	-	708,70	14,69	122,6	3,54	40
17.00	303,15	592,59	-	702,59	14,69	123,1	3,55	40
18.00	303,15	595,37	-	708,70	14,69	122,6	3,49	40
19.00	302,59	593,15	-	708,70	14,69	121,8	3,53	40
20.00	300,37	589,81	-	700,37	14,69	122,6	3,54	40
21.00	299,81	593,15	-	708,70	14,69	121,8	3,53	40
22.00	299,26	590,92	-	693,70	14,69	123,2	3,53	40
23.00	300,27	592,03	-	700,37	14,69	128,8	3,54	40
24.00	299,26	588,70	-	700,92	14,69	123,5	3,54	40

Adapun keterangan pada data tabel 4.2 Sebagai berikut:

- T₁= Temperatur udara masuk kompresor (K)
- T₂= Temperatur udara keluar kompresor (K)
- T₃= Temperatur udara masuk turbin (K)
- T₄= Temperatur udara keluar turbin (K)
- P₁=P₄= Tekanan udara luar (Psi)
- P₂=P₃= Tekanan udara setelah proses kompresi (Psi)
- m_{bb}= Laju aliran massa bahan bakar (kg/s)
- Beban= Beban yang diberikan (MW)

4.2 Analisis Daya Pembangkit

Contoh perhitungan yang dignakan adalah data pada jam 07.00

(a) Titik pengukuran kondisi ke-1

Dari tabel logsheet didapatkan data temperatur udara atau T₁ sebesar 300,37 K, dengan menggunakan tabel termodinamika dari "Fundamentals of Engineering Thermodynamics" 8th edition karangan Michael J. Moran, Howard N. Saphiro, dkk pada tabel A-22 Ideal Gas Properties of Air [8], didapatkan data sebagai berikut:

Temperatur bawah sebesar 300 K, dengan h sebesar 300,19 kJ/kg

Temperatur atas sebesar 305 K, dengan h sebesar 305,22 kJ/kg

Besar entalpi h₁ didapat dengan menggunakan persamaan 4 sebagai berikut:

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

$$h_1 = \frac{(300,37 K-300 K)(305,22 kJ/kg-300,19 kJ/kg)}{305 K-300 K} + 300,19 kJ/kg$$

$$h_1 = 300,56 kJ/kg$$

(b) Titik pengukuran kondisi ke-2

Dari tabel logsheet didapatkan data temperatur udara atau T₂ sebesar 590,93 K, sama seperti titik pengukuran kondisi ke-1 didapatkan data sebagai berikut:

Temperatur bawah sebesar 590 K, dengan h sebesar 596,52 kJ/kg

Temperatur atas sebesar 600 K, dengan h sebesar 607,02 kJ/kg

Besar entalpi h₂ didapat dengan menggunakan persamaan 5 sebagai berikut:

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

$$h_2 = \frac{(590,93 K-590 K)(607,02 kJ/kg-596,52 kJ/kg)}{600 K-590 K} + 596,52 kJ/kg$$

$$h_2 = 597,49 kJ/kg$$

Terjadinya proses kompresi isentropik pada kondisi ke-2, maka T_{2s} dan P_{r1} dapat dihitung dengan persamaan 6 berikut:

Diketahui:

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{2s} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{2s} = 300,37 K \left(\frac{123,4 Psi}{14,6959 Psi}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}$$

$$T_{2s} = 551,69 K$$

Untuk mendapatkan P_{r1} digunakan persamaan 7 sebagai berikut:

$$Pr_1 = \frac{T_{atas}-T_{bawah}}{T_{atas}-T_{bawah}} \frac{Pr_{atas}-Pr_{bawah}}{Pr_1-Pr_{bawah}} + Pr_{bawah}$$

$$Pr_1 = \frac{(300,37 K-300 K)(1,4686-1,386)}{305 K-300 K} + 1,386$$

$$Pr_1 = 1,392$$

Dengan didapatkannya nilai Pr₁, maka nilai dari Pr'₂, dapat dihitung dengan persamaan 8 berikut:

$$Pr'_2 = Pr_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

$$Pr'_2 = 1,392 \left(\frac{123,4 \text{ Psi}}{14,6959 \text{ Psi}} \right)$$

$$Pr'_2 = 11,6897$$

Dengan didapatkannya nilai Pr'_2 , maka besar entalpi isentropik h_{2s} didapat dengan menggunakan persamaan 9 sebagai berikut:

$$\frac{Pr_{atas}-Pr_{bawah}}{Pr'_2-Pr_{bawah}} = \frac{h_{atas}-h_{bawah}}{h_{2s}-h_{bawah}}$$

$$h_{2s} = \frac{(Pr'_2-Pr_{bawah})(h_{atas}-h_{bawah})}{Pr_{atas}-Pr_{bawah}} + h_{bawah}$$

$$h_{2s} = 557,33 \text{ kJ/kg}$$

(c) Titik pengukuran kondisi ke-3

Diketahui suhu udara yang keluar dari turbin atau T_4 adalah sebesar 700,93 K. Dengan asumsi $P_3 = P_2$ dan $P_4 = P_1$ dimana $P_2 = 123,4 \text{ Psi}$ dan $P_1 = 14,6959 \text{ Psi}$, maka temperatur udara masuk ke turbin dapat dihitung dengan persamaan 12 berikut:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_3 = T_4 \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_3 = 700,93 \text{ K} \left(\frac{123,4 \text{ Psi}}{14,6959 \text{ Psi}} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}$$

$$T_3 = 1145,33 \text{ K}$$

Dengan didapatkannya nilai T_3 dan nilai $Cp_{combustion \ product}$ sebesar 2,1 kJ/kg.K untuk HSD, maka nilai entalpi h_3 dapat dihitung dengan persamaan 11 sebagai berikut:

$$h_3 = Cp_{combustion \ product} \times T_3$$

$$h_3 = 2,1 \text{ kJ/kg.K} \times 1145,33 \text{ K}$$

$$h_3 = 2405,198 \text{ kJ/kg}$$

(d) Titik pengukuran kondisi ke-4

Dari tabel *logsheet* didapatkan data temperatur udara atau T_4 sebesar 700,93 K dan nilai $Cp_{combustion \ product}$ sebesar 2,1 kJ/kg.K untuk HSD, maka nilai entalpi h_4 dapat dihitung dengan persamaan 14 sebagai berikut:

$$h_4 = Cp_{combustion \ product} \times T_4$$

$$h_4 = 2,1 \text{ kJ/kg.K} \times 700,93 \text{ K}$$

$$h_4 = 1471,95 \text{ kJ/kg}$$

Terjadinya proses kompresi isentropik pada kondisi ke-4, maka T_{4s} dapat dihitung dengan persamaan 15 sebagai berikut:

$$\frac{T_{4s}}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{4s} = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{4s} = 2245,33 \text{ K} \left(\frac{14,6959 \text{ Psi}}{123,4 \text{ Psi}} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}$$

$$T_{4s} = 623,59 \text{ K}$$

Dengan didapatkannya nilai T_{4s} dan nilai $Cp_{combustion \ product}$ sebesar 2,1 kJ/kg.K untuk HSD, maka nilai entalpi h_{4s} dapat dihitung dengan persamaan 16 sebagai berikut:

$$h_{4s} = Cp_{combustion \ product} \times T_{4s}$$

$$h_{4s} = 2,1 \text{ kJ/kg.K} \times 623,59 \text{ K}$$

$$h_{4s} = 1309,53 \text{ kJ/kg}$$

(e) Perhitungan kerja kompresor

Nilai dari m_{bb} dapat dihitung dengan persamaan 3 berikut:

$$m_{bb} = Q_{bb} \times \rho_{bb}$$

Dimana:

$$\rho_{bb} = SG \times \rho_{udara}$$

$$\rho_{bb} = 0,87 \times 1,2$$

$$\rho_{bb} = 1,044 \text{ kg/m}^3$$

Maka besar Q_{bb} dapat diketahui dari *logsheet* sebesar 15100 l/h menjadi 13137 kg/h, maka nilai dari m_{bb} dapat diperoleh sebagai berikut:

$$m_{bb} = Q_{bb} \times \rho_{bb}$$

$$m_{bb} = 13137 \text{ kg/h} \times 1,044 \text{ kg/m}^3 \times \frac{h}{3600}$$

$$m_{bb} = 3,80 \text{ kg/s}$$

Untuk mendapatkan nilai m_{udara} , nilai AFR dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$W_{nett} = (W_T - W_K)$$

$$\frac{W_{actual}}{\eta_{gen}} = (m_{bb} + m_{udara}) - (h_3 - h_4) - m_{udara}(h_2 - h_1)$$

$$40500 \text{ kW} = \left[1 + \left(\frac{A}{F} \right) \right] 3546,34 \text{ kJ/s} - \left(\frac{A}{F} \right) 1128,33 \text{ kJ/s}$$

$$40500 \text{ kW} = 3546,34 \text{ kJ/s} + 2418,01 \text{ kJ/s} \times \left(\frac{A}{F} \right)$$

$$\left(\frac{A}{F} \right) = 15,29$$

Dengan didapatkannya nilai AFR, maka nilai dari m_{udara} dapat diperoleh dengan persamaan 3 sebagai berikut:

$$m_{udara} = \frac{A}{F} \times m_{bb}$$

$$m_{udara} = 15,29 \times 3,8 \text{ kg/s}$$

$$m_{udara} = 58,66 \text{ kg/s}$$

Kemudian nilai kerja kompresor W_K dapat dicari dengan persamaan 1 sebagai berikut:

$$W_K = m_{udara}(h_2 - h_1)$$

$$W_K = 58,66 \text{ kg/s} (597,49 \text{ kJ/kg} - 300,56 \text{ kJ/kg})$$

$$W_K = 17419,57 \text{ kJ/s}$$

(f) Perhitungan kerja turbin

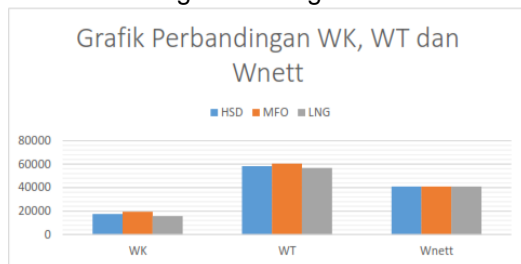
Untuk melakukan perhitungan pada daya turbin gas, dapat menggunakan persamaan 13 sebagai berikut:

$$W_T = (m_{udara} + m_{bb})(h_3 - h_4)$$

$$W_T = (58,66 \text{ kg/s} + 3,8 \text{ kg/s}) (2405,198 \text{ kJ/kg} - 1471,95 \text{ kJ/kg})$$

$$W_T = 58328,66 \text{ kJ/s}$$

Untuk mempermudah penelitian data hasil perhitungan dari kerja kompresor (W_K) dan kerja turbin (W_T) akan ditampilkan dalam bentuk grafik sebagai berikut:



Gambar 4. Grafik perbandingan daya kompresor, daya turbin dan daya netto

Dari hasil perbandingan gambar grafik 4 menunjukkan bahwa W_{nett} yang dimiliki ketiga bahan bakar sama, hal ini terjadi karena data daya aktual, efisiensi generator dan temperatur kompresor menggunakan data yang sama. Sehingga berapa besarpun kerja turbin atau W_t yang dihasilkan akan tetap sama ketika dikurangi kerja kompresor atau W_k . Sedangkan pada kerja turbin dan kerja kompresor MFO terlihat

menghasilkan daya yang paling besar yaitu 60.881,79 kW untuk W_t dan 19.609,06 kW untuk W_k , hal ini terjadi karena jumlah bahan bakar yang diperlukan MFO untuk menghasilkan daya bersih atau W_{nett} yang setara dengan HSD dan LNG lebih banyak. Sehingga pada kerja turbin dan kerja kompresor daya yang dihasilkan sangat besar, namun karena kerja kompresor yang terlalu besar mengakibatkan *losis* yang terlalu besar juga pada sistem pembangkitan dengan bahan bakar MFO.

(g) Perhitungan Specific Fuel Consumption

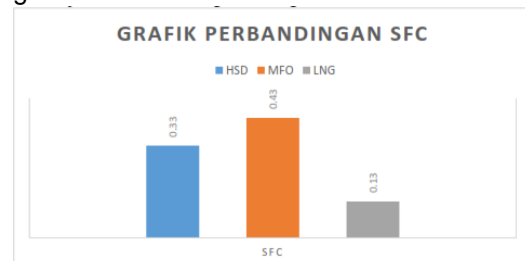
Untuk dapat menghitung seberapa besar konsumsi bahan bakar yang digunakan pada turbin gas, dapat menggunakan persamaan 17 sebagai berikut:

$$SFC = \frac{m_{bb}}{W_{nett}}$$

$$SFC = \frac{m_{bb}}{(W_T - W_K)}$$

$$SFC = 0,33 \text{ kg/kWh}$$

Untuk mempermudah penelitian, data hasil perhitungan SFC dari ketiga bahan bakar akan di tampilkan dalam bentuk grafik berikut:



Gambar 5. Grafik perbandingan SFC pada tiap bahan bakar

Dari hasil perbandingan gambar grafik 5 menunjukkan bahwa SFC pada bahan bakar LNG memiliki jumlah yang paling rendah yaitu sebesar 0,13 kg/kWh, disusul oleh bahan bakar HSD yang memiliki jumlah SFC sebesar 0,33 kg/kWh dan bahan bakar MFO yang memiliki jumlah SFC sebesar 0,43 kg/kWh. Dengan hasil ini dapat disimpulkan bahwa efektifitas penghasil daya terbaik adalah bahan bakar LNG karena hanya dengan 0,13 kg bahan bakarnya saja sudah dapat membangkitkan daya sebesar 1 kWh dan MFO adalah bahan

bakar yang paling boros dengan 0,43 kg nya hanya dapat menghasilkan 1 kWh dan HSD yang menggunakan bahan bakar 0,33 kg untuk menghasilkan daya 1 kWh.

4.3 Analisis Biaya dan Daya Yang Dihasilkan Dari Masing-masing Bahan Bakar

Dengan mengacu pada data hasil perhitungan massa aliran bahan bakar atau m_{bb} pada bahan bakar HSD yaitu sebesar 3,8 kg/s, maka jumlah bahan bakar yang diperlukan untuk membangkitkan daya kurang lebih 40 MW dalam waktu 1 jam adalah:

$$\text{Jumlah bahan bakar} = m_{bb} \times 3600$$

Namun karena satuan dari m_{bb} adalah satuan berat, maka m_{bb} akan di konversikan ke satuan liter dengan diketahui massa jenis dari bahan bakar HSD adalah 870 kg/m³ yang mana sama dengan 0,87 kg/l adalah sebagai berikut:

$$\text{Jumlah bahan bakar} = \left(\frac{3,8 \text{ kg/s}}{0,87 \text{ kg/l}} \right) \times 3600 \text{ s}$$

$$\text{Jumlah bahan bakar} = 15868,8 \text{ l}$$

Diketahuinya jumlah bahan bakar yang digunakan, maka biaya yang dikeluarkan dapat dicari dengan asumsi harga pada bahan bakar HSD yaitu Rp. 22.350 per liter pada periode 15-30 Agustus 2022, maka:

$$\text{Biaya Bahan Bakar} = \text{Jumlah bahan bakar} \times 22350$$

$$\text{Biaya Bahan Bakar} = 15868,8 \times 22350$$

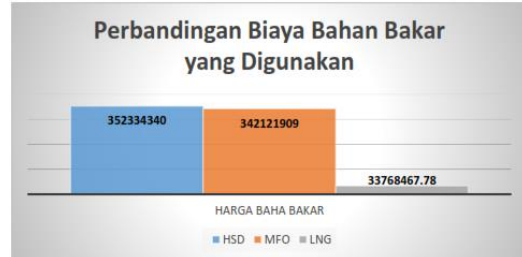
$$\text{Biaya Bahan Bakar} = 354667680$$

Dengan cara yang sama dilakukan perhitungan pada bahan bakar MFO dan LNG dengan asumsi harga pada masing-masing bahan bakar yaitu MFO Rp. 19.400 per liter pada periode 15-30 Agustus 2022 dan LNG Rp. 103.775 per mmbtu pada tanggal 25 Agustus 2022. Khusus untuk LNG, setelah didapatkan jumlah bahan bakar dalam satuan per liternya akan dikonversikan lagi ke mmbtu dengan dikalikan 0.0324 yang mana seatra dengan 1 liter. Hasil dari perhitungan dapat dilihat pada tabel 2 berikut:

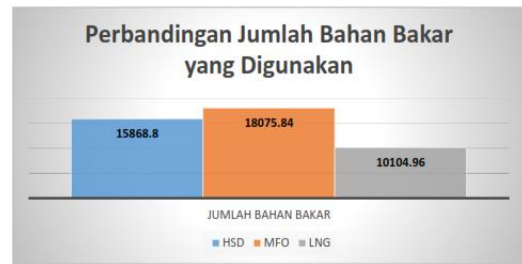
Tabel 2. Data hasil perhitungan jumlah dan biaya bahan bakar

Ket.	Jumlah bahan bakar (l/h)	Biaya bahan bakar (Rp)
HSD	15868,8	354.667.680,00
MFO	18075,84	344.387.617,05
LNG	10104,96	33.992.100,01

Untuk mempermudah penelitian maka data hasil dari tabel III akan di tampilkan dalam bentuk grafik sebagai berikut:



Gambar 6. Grafik perbandingan jumlah bahan bakar yang digunakan

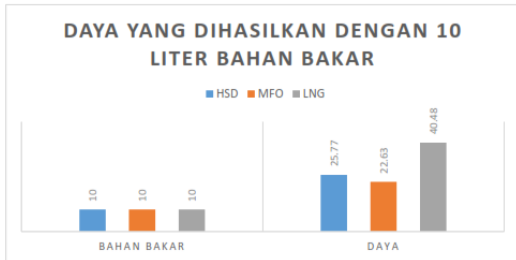


Gambar 7. Grafik perbandingan harga bahan bakar yang digunakan

Dari gambar grafik 7 dapat disimpulkan bahwa harga penggunaan LNG jauh lebih murah dibandingkan dengan penggunaan bahan bakar HSD dan MFO, dimana dalam waktu 1 jam penggunaan bahan bakar, biaya yang dikeluarkan adalah sebesar Rp. 33.992.100,01,- untuk LNG. Sedangkan untuk biaya penggunaan bahan bakar MFO sebesar Rp. 344.387.617,05,- dan untuk HSD sebesar Rp. 354.667.680,00,-. Dari gambar grafik 6 diketahui bahwa biaya operasional untuk bahan bakar MFO sedikit lebih murah dibandingkan dengan bahan bakar HSD, dimana MFO yang menggunakan bahan bakar sebanyak 18.075,84 liter per jam nya. Sedangkan HSD menggunakan bahan bakar sebanyak 15.868,8 liter per jam nya. Perhitungan efisiensi termis

Untuk memastikan mana bahan bakar yang paling banyak menghasilkan daya maka akan dibuat perbandingan daya yang dihasilkan jika ketiga bahan bakar hanya

menggunakan 10 liter bahan bakar, maka daya yang dihasilkan dari masing-masing bahan bakar dapat dilihat pada gambar 8 berikut:



Gambar 8. Grafik daya yang dihasilkan dari penggunaan 10 liter bahan bakar

Dari gambar grafik 8 dapat dilihat bahwa dengan jumlah bahan bakar yang sama LNG tetap menjadi bahan bakar yang paling banyak mengasilkan energi listrik, dan untuk pada bahan bakar MFO daya yang dihasilkan lebih kecil dari HSD. Namun jika dilihat dari sisi harga bahan bakar MFO masih lebih murah dari pada bahan bakar HSD yaitu sebesar Rp. 194.000,00,- sedangkan untuk bahan bakar HSD yaitu sebesar Rp. 223.500,00,- dan bahan bakar LNG menjadi yang termurah dengan harga Rp. 33.639,02,- per 10 liternya.

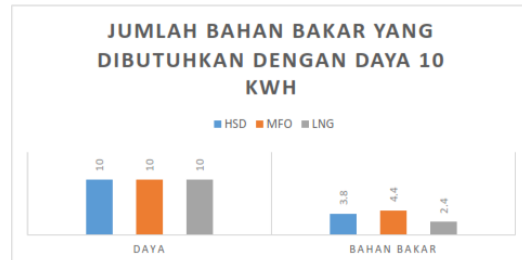
Kemudian untuk memastikan lebih dalam lagi maka dibuat perbandingan berdasarkan daya yang dibangkitkan

5. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan analisis performa turbin gas unit 1 dengan beban 40 MW yang di variasikan dengan jenis bahan bakar yang berbeda yaitu HSD, MFO dan LNG dapat diambil kesimpulan yang berkaitan dengan pengaruh variasi bahan bakar terhadap biaya dan daya listrik yang dihasilkan PLTG Pemaron PT. Indonesia Power:

1. Biaya yang paling rendah di keluarkan untuk membangkitkan energi listrik sebesar 40,9 MWh adalah dengan menggunakan bahan bakar LNG yang hanya menggunakan 10.104,96 liter per jam atau setara dengan 327,55 mmbtu per jam yang jika dirupiahkan menjadi Rp. 33.992.100,01,-. Sedangkan untuk HSD adalah yang paling banyak memakan biaya dengan jumlah bahan

dengan tujuan untuk melihat berapa bahan bakar yang dibutuhkan, maka jumlah bahan bakar yang dibutuhkan dapat dilihat pada gambar 9 berikut:



Gambar 9. Grafik jumlah bahan bakar yang dibutuhkan jika daya yang dibangkitkan 10 kWh

Dari gambar grafik 9 dapat dilihat bahwa bahan bakar LNG menjadi bahan bakar yang paling sedikit menggunakan bahan bakar untuk membangkitkan daya sebesar 10 kWh, sedangkan MFO menjadi bahan bakar yang paling boros yang disusul dengan bahan bakar HSD. Namun jika dilihat dari sisi harga bahan bakar MFO masih sedikit lebih murah dari bahan bakar HSD yaitu sebesar Rp. 85.719,65,- sedangkan bahan bakar HSD sebesar Rp. 86.696,54,- dan untuk bahan bakar LNG tetap menjadi yang termurah dengan harga sebesar Rp. 8.309,18,-.

bakar sebanyak 15.868,8 liter per jam yang jika dirupiahkan menjadi Rp. 354.667.680,00,-. Kemudian MFO adalah yang paling banyak memakai bahan bakar yaitu sebanyak 18.075,84 liter per jam, namun jika dirupiahkan biaya yang dikeluarkan sedikit lebih rendah dari penggunaan HSD yaitu sebesar Rp. 344.387.617,05,-.

2. Berdasarkan hasil dari perhitungan SFC menunjukkan bahwa daya listrik yang dihasilkan LNG lebih besar dari HSD dan MFO, dimana MFO baru bisa menghasilkan daya 1 kWh dengan menggunakan 0,43 kg bahan bakarnya dan HSD menggunakan 0,33 kg bahan bakarnya. Sedangkan untuk LNG untuk menghasilkan daya 1 kWh hanya perlu menggunakan 0,13 kg bahan bakarnya. Dalam keadaan jumlah bahan bakar

yang setara yaitu 10 liter, daya yang paling tinggi dihasilkan dari bahan bakar LNG yaitu sebesar 40,48 kWh, kemudian HSD sebesar 25,77 kWh dan MFO yang paling kecil menghasilkan daya yaitu sebesar 22,63 kWh.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Partogi, M. A., Kusuma, I. G. B. W., Astawa, K. 2018. Analisa Unjuk Kerja Sistem PLTG di PT Indonesia Power Unit Pembangkitan Bali. *METTEK*, 4(1), pp. 16-22.
- [2] Adikumoro, B., Novirani, D. & Fitria, L., 2014. Pengaruh Pembebanan Pembangkit Listrik Tenaga Gas Terhadap Efisiensi Biaya Pembangkitan Listrik (Studi Kasus di PT. Indonesia Power UBP Bali Unit Pesanggaran). *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional.*, Volume Vol. 2, p. No. 2.
- [3] Girsang, R. O. 2016. "Analisi Performa PLTGU PLN Sektor Keramasan Menggunakan Software Cycle Tempo". Surabaya: Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [4] Syammary, R., Hendri., Lukfianto. 2020. Analisis Efisiensi Turbin Gas Tipe V94.2 Sebelum dan Sesudah *Minor Inspection* Pada Blok 4 Unit 3 Pltgu Muara Tawar. *Jurnal Power Plant.*, Vol 8, No. 2, Hal 71-81.
- [5] Annur, M. N'. 2017. "Pengaruh Variasi Beban Terhadap Performa Turbin Gas Di PLTGU Blok GT 1.3 PT. Indonesia Power Grati, Pasuruan". Surabaya: Departemen Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [6] Yogaswara, I., Supari., Harmini. 2020. Analisis Efisiensi Operasional Sistem PLTGU Unit GTG 2.3 Di PT Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*. Semarang: Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Semarang.
- [7] Heywood, J. B., 1988. "Internal Combustion Engine Fundamentals. New York, United States of America: McGraw-Hill.
- [8] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., Bailey, M. B. 2014. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. New York, United States of America: Wiley, 8th edition.
- [9] Halimah, A. I., 2019. "Makalah Komputasi Teknik Kimia". Palembang: Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya.
- [10] Nurazmi., Prayuda, A. T. H., Khawair, N. A. M., Harni., 2020. Analisa Hubungan Jumlah Partikel Dengan Volume Menggunakan Model Teori Kinetik Gas. *Jurnal Pendidikan Fisika Universitas Muhammadiyah Makasar.*, Vol. 8, No. 1, Hal. 87-93.
- [11] Raihan., Maulis., Subekti, P., Suropto, H. 2022. *Article Review: Konsep Dasar Termodinamika. Jurnal Energi dan Inovasi Teknologi (ENOTEK).*, Vol. 1, No. 2, Hal. 25-27.
- [12] Rivai, N. I., Martin, A. 2019. Analisis Energi Pada Unit 2 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Teluk Lembu Kapasitas 21,6 MW. *Jom FTEKNIK*, 6(2).
- [13] Salsabila, G. H. H. 2019. "Proses Treatment Marine Fuel Oil (MFO) Sebagai Bahan Bakar Pada Mesin Diesel". Semarang: Teknik Kimia Universitas Negeri Semarang.
- [14] Santosa, B., Qosim, M. N., Ajiz, F. A. 2015. Efisiensi Pembebanan PLTGU PT. Krakatau Daya Listrik Dengan Perhitungan Specific Fuel Consumption Untuk Meminimalkan Biaya Produksi Listrik. *Jurnal Sutet.*, Vol. 5, No. 2, pp. 68-74.
- [15] Sanvia, F. S., Yoga, M., Dwiyanto, M. R., Saputro, N. A. 2011. Makalah Teknik Tenaga Listrik. Depok: Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [16] Sastrawan, H. K. 2018. Analisis Performansi PLTG Unit 2 PT. Indonesia Power Pamaran. Denpasar: Universitas Udayana.
- [17] Sembiring, K. M. 2004. "Turbin Gas Dan Instalasi Tubin Gas". e-USU Respository: Universitas Sumatera Utara.