

Investigasi Energi Termal pada Mesin Diesel Tipe SULZER ZAV 40S dengan Bahan Bakar *Marine Fuel Oil* (MFO)

Marcelina¹, Syahrul Khairi², Eddy Kurniawan³, dan Kristina Desideria P Yolanda⁴

^{1, 2, 4}Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura, Jl. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi Pontianak 78124, Indonesia

³Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura, Jl. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi Pontianak 78124, Indonesia

¹ marcelina@teknik.untan.ac.id

² syahrul.khairi@untan.ac.id

³ eddy_kurniawan@teknik.untan.ac.id

⁴ kristina.desideria2@gmail.com

Abstrak. Studi kinerja pembangkit listrik pada mesin diesel tipe Sulzer ZAV 40S menggunakan bahan bakar *Marine Fuel Oil* (MFO) dapat mempengaruhi proses pembakaran mesin karena adanya perubahan energi kimia dari bahan bakar menjadi kerja internal. Energi panas yang dihasilkan di dalam mesin diesel dimana proses penyalanya saat piston mendekati titik mati kemudian dilanjutkan ke bahan bakar yaitu MFO. Bahan bakar tersebut akan disemprotkan melalui nozel ke dalam ruang bakar. Hal ini akan terjadi proses pembakaran sempurna dimana komposisi massa udara dan bahan bakar di dalam silinder akan menimbulkan panas karena suhu yang tinggi. Karakteristik dari variabel kinerja mesin pembakaran internal pada mesin diesel dievaluasi. Hasil penelitian perhitungan dari variabel data kinerja mesin beroperasi selama 24 jam. Dari hasil tersebut, berdasarkan perbandingan jumlah konsumsi secara teoritis menunjukkan bahwa dalam satu hari produksi listrik diperoleh sebanyak 7.265,28 L/hari dengan menghasilkan daya (Ni) sekitar 78.930,9 kWh sedangkan data hasil lapangannya sebanyak 22.817 L/Hari massa MFO dan dayanya (Ni) sekitar 87.204 kWh. Selain itu perbandingan nilai panas (Q) yang dihasilkan secara teoritis dan data dilapangan yaitu 808,33 dan 893,059 Kcal. Hal ini menandakan bahwa perfoma mesin Sulzer ZAV 40 S mengalami penurunan dalam kinerja operasinya untuk menghasilkan sumber listrik yang optimum sehingga mengakibatkan pemborosan bahan bakar MFO.

Kata kunci: *Marine Fuel Oil* (MFO), Nilai energi, energi termal

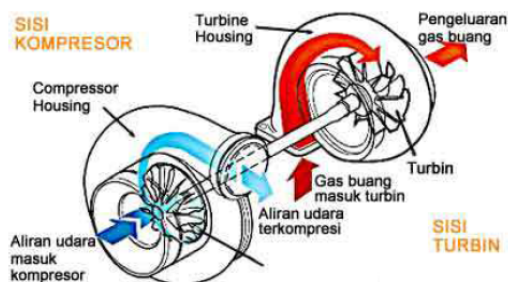
Abstract. The study of the performance of the power plant on the Sulzer ZAV 40S diesel engine using *Marine Fuel Oil* (MFO) can affect the engine combustion process because of the change in chemical energy from fuel to internal work. The heat energy generated in the diesel engine where the ignition process when the piston approaches the dead point is then continued to the fuel, namely MFO. The fuel will be sprayed through the nozzles into the combustion chamber. This will result in a complete combustion process where the composition of the mass of air and fuel in the cylinder will generate heat due to the high temperature. The characteristics and performance variables of internal combustion engines in diesel engines were evaluated. The evaluation of this study presents the calculation results of the variable engine performance data for 24 hours of operation. From these results, based on a comparison of the amount of consumption theoretically, it shows that in one day electricity production is obtained as much as 7,265.28 L/day by producing a power (Ni) of around 78,930.9 kWh while the data from the field results are 22,817 L/day of MFO mass and power (Ni) about 87,204 kWh. In addition, the comparison of the heat value (Q) produced theoretically and the data in the field is 808.33 and 893.059 Kcal. This indicates that the performance of the Sulzer ZAV 40 S engine has decreased in its operating performance to produce an optimum power source, resulting in a waste of MFO fuel.

Keywords: *Marine Fuel Oil* (MFO), Energy value, Thermal energy

I. Pendahuluan

PLTD merupakan instalasi pembangkit listrik dimana instalasi ini terdiri dari sarana dan unit-unit pembangkit yang berfungsi untuk sumber energi listrik. Biasanya mesin diesel digunakan dalam pembangkit listrik untuk penggerak utama (*prime mover*) (Syahrir Habiba *et al.*, 2017). Pembangkit listrik ini juga memiliki beberapa komponen untuk menciptakan sumber energi panas, yaitu mesin diesel, sistem mesin pendingin, generator, sistem kontrol. Selain itu peralatan bantu seperti: sistem air pendingin, sistem bahan bakar, sistem proses, sistem pelumasan dan sistem gas buang. Adapun dari komponen utama dalam proses ini adalah mesin diesel yang berfungsi penggerak generator untuk menghasilkan energi termal kemudian keluar sebagai sumber listrik (Padilla *et al.*, 2019).

Mesin diesel jenis Sulzer ZAV 40S merupakan motor bakar empat langkah yang terdiri dari *intake* (langkah hisap), *compression* (langkah kompresi), *expansion* (langkah kerja) dan *Exhaust* (langkah buang) dimana mesin diesel ini memerlukan dua putaran *rankshaft* (poros engkol) per siklus. Mesin ini juga dilengkapi dengan *turbocharger* sehingga alat ini memperoleh tenaga tinggi dan memiliki rendah emisi (Alfalah *et al.*, 2017). Adapun Mekanisme kerja *turbocharger* dapat dilihat pada Gambar 1.

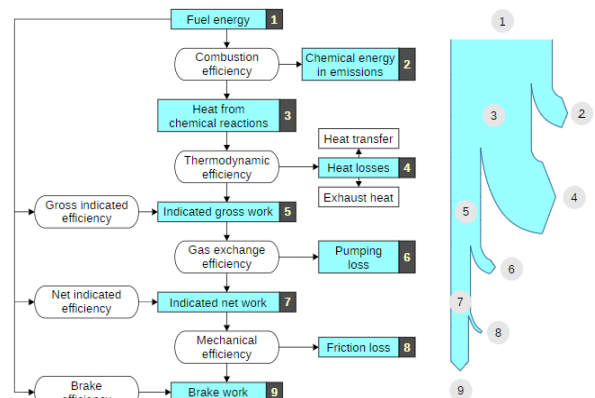


Gambar 1. Mekanisme Kerja Turbocharger Di Dalam Mesin Diesel (Alfalah *et al.*, 2017)

Mesin ini juga disebut motor pembakaran atau *Compressed Ignition Engine*, dimana cara penyalanya terjadi secara spontan (Li *et al.*, 2018). Hal ini karena adanya injeksi di dalam silinder oleh udara bertekanan tinggi sehingga mengalami perubahan bentuk dari energi kimia menghasilkan energi mekanis. Dimana energi kimia akan mengalami reaksi kimia yaitu bahan bakar (solar, MFO dll.) akan terjadi proses pembakaran dan di dalam ruang bakar silinder terjadi oksider (udara). Adanya kenaikan suhu campuran antara bahan bakar dan udara pada proses pembakaran mengakibatkan tercapainya suhu nyala pada kompresi terhadap torak (Isermann, 2017).

Proses pembakaran dari bahan bakar yang terkonversi menjadi energi sehingga menghasilkan kerja untuk digunakan di dalam mesin pembakaran internal. Namun proses ini menyebabkan beberapa faktor kerugian. Salah satunya adalah kehilangan

energi kimia dalam emisi, kehilangan panas dari mesin dan melalui gas buang, dan kerugian saat pemompaan gas dan gesekan di mesin (Vipavanich *et al.*, 2018 dan Indarto & Fajarsari, 2020). Efisiensi energi ini memberikan pengaruh dalam menghasilkan listrik. Salah satunya adalah proses konversi bahan bakar menjadi energi kimia untuk kerja internal (Yao *et al.*, 2019 dan Ding *et al.*, 2018). Dengan demikian, efisiensi termal *brake* keseluruhan pada mesin merupakan produk dari pembakaran, termodinamika, pertukaran gas, dan efisiensi mekanis. Gambaran proses kerugian konversi energi ini dapat dilihat pada Gambar.2 (Jääskeläinen, 2020).



Gambar 2. Konsep Kehilangan Energi di Dalam Mesin Diesel (Jääskeläinen, 2020)

Marine Fuel Oil (MFO) merupakan bahan bakar untuk mesin diesel jenis Sulzer ZAV 40S dimana bahan bakar ini merupakan jenis residu dari produk destilasi yang memiliki tekstur warna hitam dan viskositas yang tinggi daripada minyak diesel. Bahan bakar jenis ini juga banyak digunakan pada industri-industri besar sebagai *stem power station*. Namun dalam penggunaannya perlu proses *treatment* untuk menurunkan viskositas dan keseragaman ukuran partikelnya sehingga mesin diesel bekerja secara optimal (Salsabila, 2019).

Dalam studi ini, peneliti akan mempelajari performa mesin diesel dalam memproduksi listrik PT PLN (PERSERO) sektor Kapuas ULPLTU/D Sei Raya, Kalimantan Barat. Jenis mesin Sulzer ZAV 40S dan MFO sebagai bahan bakarnya. Hal ini menarik dilakukan untuk mengetahui kinerjanya. Adapun variabel seperti jumlah massa konsumsi bahan bakar mesin Sulzer ZAV 40S, daya yang dihasilkan serta nilai energi panas/termal (Q). Dari hasil perhitungan ini akan dibandingkan dengan unjuk kerja dari mesin diesel tersebut terhadap konsumsi massa MFO, daya dan nilai energi panas sebenarnya dilapangan.

II. Metode

Pelaksanaan penelitian ini di ULPLTU/D Sungai Raya PT PLN Kabupaten Kuburaya, Kalimantan Barat. Adapaun prosedur pengambilan data penelitian yaitu studi literatur dan memperoleh data saat mesin diesel beroperasi. Kemudian data yang diperoleh dianalisis untuk mengetahui hubungan

bahan bakar mesin menurut (Uloli *et al.*, 2018 dan Ramadhani, 2019) dapat mengetahui berapa banyak nilai kalor yang dihasilkan oleh mesin diesel dengan banyaknya jumlah massa bahan bakar solar dan udara di dalam silinder motor.

Alat dan Bahan

Alat dalam penelitian ini menggunakan mesin jenis SULZER ZAV 40 S dengan spesifikasi mesin sebagai berikut:

Tabel 1. Spesifikasi Mesin SULZER ZAV 40 S

No.	Spesifikasi	Nilai
1	Diameter Silinder	400 mm
2	Panjang Langkah Piston	560 mm
3	Jumlah Silinder	12 silinder
4	Putaran mesin permenit	500 rpm
5	Nilai kalor MFO	9700 kkal/kg
6	Output Generator	7600 MW
7	Bahan Bakar	MFO

Sumber: cheapower.com

Penelitian ini menggunakan bahan bakar jenis MFO. Adapun data spesifikasi MFO dapat dilihat pada Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2. Data Spesifikasi Bahan Bakar MFO

No.	Jenis Analisis	Satuan	Batasan IFO 1		Uji ASTM
			Min.	Max.	
1	Nilai kalor	MJ/Kg	41,87	-	D240
2	Densitas	Kg/m ³	-	991	D1298
3	Viskositas kinematic (50 °C)	mm ³ /dt	-	180	D445
4	Kandungan Sulfur	wt%	-	3,5	D1552/ D2622
5	Titik Tuang	°C	-	50	D97
6	Titik Nyala	°C	60	-	D93
7	Residu karbon	wt%	-	16	D189
8	Kandungan abu	wt%	-	0,10	D482
9	Sedimen Total	wt/vol %	-	0,10	D473
10	Kandungan Air	vol%	-	0,75	D95

Sumber: Pratamei.com

Prosedur Percobaan

Cara Kerja

Metode pengambilan data dalam penelitian ini yaitu mengkaji unjuk kerja dari mesin diesel tersebut terhadap konsumsi massa MFO, daya dan nilai energi panas secara aktual dilapangan dengan perhitungan matematis secara teoritis. Adapun parameternya

adalah konsumsi bahan bakar, daya dan jumlah panas/termal yang dihasilkan. Setelah itu melakukan pengumpulan dan analisis data untuk mencari kesimpulan tentang konsumsi bahan bakar yang diperlukan untuk menentukan nilai energi termal selama mesin beroperasi. Dari hasil observasi lapangan diperoleh data primer yaitu jumlah massa bahan bakar MFO, daya yang dihasilkan oleh generator, nilai kalor yang dihasilkan oleh MFO pada mesin diesel dan spesifikasi bahan bakar MFO dan mesin Sulzer ZAV 40 S. Mesin diesel pembangkit listrik tersebut digunakan untuk melaksanakan penelitian ini. Sumber-sumber data teoritis diperoleh dari berbagai macam referensi pustaka yaitu artikel/jurnal, buku dan data-data hasil tahunan laporan instansi yang sesuai dengan kajian dalam penelitian ini. Adapun data yang diambil dan diolah secara perhitungan matematis. Hasil analisis ini akan dibandingkan dengan data yang diambil dilapangan tanggal 01 Febuari 2021 di ULPLTU/D Sungai Raya PT PLN (PERSERO), Kalimantan Barat.

Cara Analisis Data

Data konsumsi MFO pada mesin SULZER ZAV 40 S untuk mengetahui jumlah nilai energi dalam 1 jam produksi. Metode perhitungan ini mengacu pada (Uloli *et al.*, 2018) dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

1. Perhitungan analisis bahan bakar

a. Kebutuhan udara praktis (nyata):

$$L_p = \lambda \cdot L_o \quad (1)$$

Dimana:

$\lambda = 1,4 - 1,8$ (faktor kelebihan udara)

L_p = Kebutuhan udara praktis (nyata)

L_o = Kebutuhan udara teoritis

b. Efisiensi Volumetrik Mesin Sulzer ZAV 40S

$$\eta_{ch} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1} \frac{P_a}{P_{sup}} \frac{T_{sup}}{T_a(1 + \gamma_r)} \quad (2)$$

Dimana:

η_{ch} = efisiensi volumetrik

ε = Perbandingan kompresi

P_a = Tekanan udara pada awal langkah kompresi

T_{sup} = Suhu udara sebelum masuk ke *supercharger*

P_{sup} = Tekanan sesudah *supercharger* 1,20 – 1,35 atm abs

T_a = Suhu awal pada langkah kompresi

γ_r = Koefisien gas residu 0,03 – 0,04

2. Kebutuhan massa udara di dalam silinder

Jumlah udara segar ($V_{u,c}$) di dalam silinder motor saat awal langkah kompresi dapat diperoleh persamaan di bawah ini:

$$V_{u,c} = V_s + V_c - V_{sc}, m^3 \quad (3)$$

Dimana:

$V_{u,c}$ = Volume udara pada awal langkah

kompresi, m³
 V_s = Volume langkah torak, Cm³
 V_c = Volume akhir langkah kompresi, m³
 V_{sc} = Volume silinder sebelum terjadi kompresi, m³

Jumlah berat udara (G) awal langkah kompresi dalam 1 silinder:

$$G = V_{u.c} \cdot P_a \cdot \frac{273,15 + 0}{273,15 + T_a} \cdot 1,3 \text{Kg} \quad (4)$$

Dimana:

G = Jumlah Massa udara, Kg
 $V_{u.c}$ = Volume udara pada awal langkah kompresi, m³
 P_a = Tekanan udara pada awal langkah kompresi, Kg/Cm²
 T_a = Suhu awal pada langkah kompresi, K

3. Perhitungan kebutuhan MFO sesuai udara di dalam mesin diesel

Persamaan bahan bakar

$$G_{MFO \text{ persiklus}} = \frac{G_{udara}}{25 \text{Kg udara segar}} \quad (5)$$

Persamaan jumlah panas proses (Q) hasil pembakaran antara MFO dengan O₂ di dalam silinder dapat dilihat di bawah ini:

$$Q_{motor \text{ per detik}} = \frac{G_{MFO \text{ perjam}}}{3600} \times \text{Nilai kalor MFO} \quad (6)$$

Sehingga daya (N_i) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

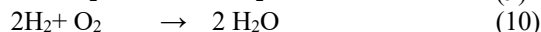
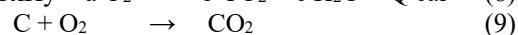
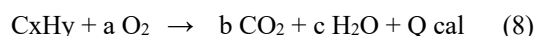
$$N_i = Q_{motor \text{ per detik}} \times 427 \text{ Kg} \times 75 \text{ Kg.m/detik} \quad (7)$$

III. Hasil dan Pembahasan

1. Perhitungan Analisis Bahan Bakar

a. Kebutuhan udara praktis

Proses pembakaran jika material yang terkandung teroksidasi sempurna, dimana seluruh karbon teroksidasi menjadi gas karbon (CO₂) dan unsur hidrogen menjadi uap (H₂O). Persamaan stokiometri proses pembakaran sempurna menurut Speight, (2019) ditunjukkan sebagai berikut :



Dimana Persamaan 8 untuk motor diesel memiliki bahan bakar dengan unsur perbandingan senyawa hidrokarbon terdiri dari berat unsur karbon (C) sekitar 86 % dan hidrogen (H) sekitar 14 %. Jika pembakaran sebanyak 12 Kg C maka O₂ diperlukan sebanyak 1 Kmole. Untuk suhu 0 °C (kondisi standar) maka Volume gas adalah 1 Kmole = 760 mm Hg = 22,41 Nm³

Jika motor diesel memiliki 1 Kg bahan bakar maka diasumsikan masing-masing massanya

komponen adalah unsur atom C = 0,85 Kg, H = 0,12 Kg dan sisa-sisa unsur S, O, N₂ totalnya 0,03 Kg.

Sehingga banyaknya udara diperlukan untuk 1 Kg bahan bakar secara teoritis adalah:

$$L_o = \ell (\alpha C + \beta H)$$

Udara terdiri dari 79% gas Nitrogen (N₂) dan 21% gas Oksigen (O₂).

Maka udara sebanyak :

1 m³ terdiri dari N₂ = 0,79 m³ dan O₂ = 0,21 m³

1 Kg terdiri dari N₂ = 0,77 Kg dan O₂ = 0,23 Kg

Jadi, nilai ℓ diperoleh dengan asumsi 1 Kg O₂ mengandung 1/023 = 4,31 udara pembakaran sempurna.

Nilai β diperoleh dengan asumsi pembakaran terjadi sempurna sehingga reaksi yang terjadi dapat dilihat pada Persamaan 10 sehingga diperoleh 1 Kg H mengandung 32/4 = 8 Kg

Nilai α diperoleh dengan asumsi pembakaran terjadi sempurna sehingga reaksi yang terjadi dapat dilihat pada Persamaan 9 sehingga diperoleh 1 Kg C mengandung 32/12 = 2,67 Kg

Dari proses pembakaran sempurna antara MFO dengan O₂ diperoleh komposisi sebagai berikut:

$$\ell = 4,31 \text{ Kg}$$

$$\alpha = 2,67 \text{ Kg}$$

$$\beta = 8 \text{ Kg}$$

$$C = 0,844 \text{ Kg}$$

$$H = 0,115 \text{ Kg}$$

Sehingga:

$$L_o = 4,31 ((2,67 \times 0,84) + (8,0 \times 0,12))$$

$$= 13,8 \text{ Kg udara/Kg (wt)}$$

$$= \sim 14 \text{ Kg udara/Kg (wt)}$$

Kebutuhan udara praktis (nyata):

$$L_p = \lambda \cdot L_o$$

Dimana:

$$\lambda = 1,4 - 1,8 \text{ (faktor kelebihan udara)}$$

Menurut Ramadhani, (2019) bila nilai λ kurang dari 1,1 maka terjadi peningkatan kadar asap dalam gas buang karena udara berkurang atau penggunaan bahan bakar berlebih. Faktor kelebihan udaranya dipilih $\lambda = 1,8$ dengan asumsi supaya motor diesel menghasilkan daya optimum.

Jadi, kebutuhan udara praktis (nyata) adalah:

$$L_p = 1,8 \times 14 = \sim 25 \text{ Kg udara/Kg (wt)}$$

b. Perhitungan Udara pada Mesin Sulzer ZAV 40S

Kebutuhan udara di dalam mesin diesel dapat dihitung seperti:

Tekan Udara pada Awal Pengisian

- Tekanan udara sebelum masuk ke *supercharger* (P_{o'})

Persamaan tekanan udara sebelum masuk ke *supercharger* (P_{o'}) dapat dilihat dibawah ini:

$$P_{o'} = P_o - P_{o1} \text{ , Kg/Cm}^2$$

dimana:
 P_{o1} = Kerugian tekanan pada pipa pemasukan sebelum supercharger (0,03 – 0,05)
 P_o = Tekanan udara luar 1 atm abs

Jadi, $P_o' = 1 - (0,04) \cdot 1$
 $= 0,96 \text{ Kg/Cm}^2$

• **Suhu udara sesudah supercharger (T_{sup})**
 Persamaan suhu udara sebelum masuk ke supercharger (T_{sup}) dapat dilihat dibawah ini:

$$T_{sup} = T_o \left[\frac{P_{sup}}{P_o} \right]^{\frac{n-1}{n}}$$

dimana:

T_o = Suhu udara luar (30 °C)
 $= 273,15 + 30$
 $= 303,15 \text{ K}$
 P_{sup} = Tekanan sesudah supercharger
 $= 1,20 - 1,35 \text{ atm abs}$
 (putaran rendah)
 $= 1,25 \times 1$
 $= 1,25 \text{ Kg/cm}^2$
 n = Eksponen polytorik udara atmosfer
 $= 1,7 - 2,0$ (centrifugal supercharger)
 $= 1,75$ (diambil)

Dari persamaan diatas maka suhu udara sesudah supercharger adalah:

$$T_{sup} = 303,15 \left[\frac{1,35}{0,95} \right]^{\frac{2-1}{2}}$$

$$T_{sup} = 361,38 \text{ K}$$

• **Tekanan Udara pada awal langkah kompresi (P_a)**

Perhitungan P_a dapat dilihat dari persamaan berikut ini:

$$P_a = 0,9 - 0,95 P_{sup}, \text{ Kg/Cm}^2$$

dipilih 0,95
 $= 0,95 \times P_{sup}$
 $= 0,95 \times 1,25$
 $= 1,19 \text{ Kg/Cm}^2$

• **Suhu awal pada langkah kompresi (T_a)**

$$T_a = \frac{T_{sup} + t_w + \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r}$$

Dimana:

T_r = Suhu residu gas 640,17 K
 t_w = Kenaikan suhu udara di dalam silinder karena bersentuhan dengan saluran pengisian, katub, kepala silinder, kepala torak dan silinder yang panas

$= 10 - 15 \text{ }^\circ\text{C}$ untuk motor 4 langkah dengan supercharger
 $= 15 \text{ }^\circ\text{C}$ (diambil)
 γ_r = Koefisien gas residu
 0,03 – 0,04 (motor empat tak)
 0,04 (diambil)

Dari persamaan maka T_a adalah:

$$T_a = \frac{361,38 + 15 + (0,04 \times 640,17)}{1 + 0,04}$$

$$T_a = 392,08 \text{ K}$$

Efisiensi Volumetrik (η_{ch})

Persamaan efisiensi volumetrik (η_{ch}) dengan menggunakan perbandingan kompresi (ϵ) = 13,9 dapat dilihat dibawah ini:

$$\eta_{ch} = \frac{\epsilon}{\epsilon + 1} \frac{P_a}{P_{sup}} \frac{T_{sup}}{T_a (1 + \gamma_r)}$$

$$\eta_{ch} = \frac{13,9}{13,9 + 1} \frac{1,25}{1,25} \frac{361,38}{392,08(1 + 0,04)}$$

$$\eta_{ch} = 0,94$$

2. Massa Udara di Dalam Silinder

Metode perhitungan mengacu pada Uloli et al., (2018) menggunakan perbandingan kompresi $\epsilon = 19$, dengan data primer di lapangan seperti Diameter silinder motor (D) = 0,4 m dan panjang langkah torak (S) = 0,56 m, sehingga jumlah udara segar ($V_{u.c}$) di dalam silinder motor saat awal langkah kompresi dapat diperoleh persamaan di bawah ini:

$$V_{u.c} = V_s + V_c - V_{sc}, \text{ m}^3$$

dimana:

V_s = Volume langkah torak, Cm^3
 $V_s = \pi/4 \cdot D^2 \cdot S$
 $= 3,14/4 \cdot 0,4^2 \cdot 0,56$
 $= 0,07 \text{ m}^3$
 V_c = Volume akhir langkah kompresi, m^3
 $V_c = V_s / (\epsilon - 1)$
 $= 0,07 / (13,9 - 1)$
 $= 0,0055 \text{ m}^3$

$V_{s.c}$ merupakan volume silinder sebelum terjadinya kompresi dimana volume saat torak bergerak dari TMB sampai terjadinya kompresi, katub isap mulai tertutup sekitar 45 derajat putaran engkol setelah TMB. Adapun persamaannya dapat dilihat dibawah ini:

$$V_{s.c} = \pi/4 \cdot D^2 \cdot (r - r \cdot \cos \theta), \text{ m}^3$$

$$TMA = (\pi/4) \times 0,4^2 \times (0,28 - 0,28 \cdot \cos 45^\circ)$$

$$TMB = 0,01 \text{ m}^3$$

dimana:

R = radius engkol
 $= S/2 = 0,56/2 = 0,28$
 Θ = Sudut antara pipi engkol dengan TMB yaitu 45°

Jadi, Jumlah udara tertampung di dalam motor satu silinder saat awal langkah kompresi, yaitu:

$$\begin{aligned} V_{u.c} &= 0,07 + 0,01 - 0,0055 \\ &= 0,066 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Perhitungan berat awal langkah kompresi dalam motor satu silinder adalah:

Jumlah massa udara (G) awal langkah kompresi dalam 1 silinder:

$$\begin{aligned} &= V_{u.c} \cdot P_a \cdot \frac{273,15 + 0}{273,15 + T_a} \cdot 1,3 \text{ Kg} \\ &= 0,066 \cdot 1,28 \cdot \frac{273,15 + 0}{273,15 + 392,08} \cdot 1,3 \text{ Kg} \\ &= 0,043 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Sehingga, jumlah massa udara satu siklus kerja motor untuk 12 buah silinder adalah:

$$\begin{aligned} G_{udara} &= 12 \times 0,043 \text{ Kg} \\ &= 0,52 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Jadi, motor memerlukan udara untuk 1 menit (500 putaran) sebanyak:

$$\begin{aligned} G_{udara \text{ per menit}} &= 0,5 \cdot 500 \cdot 0,52 \\ &= 130 \text{ Kg} \end{aligned}$$

3. Perhitungan Kebutuhan MFO sesuai Udara di Dalam Mesin Diesel

Diketahui perhitungan sebelumnya, 1 Kg MFO dalam proses pembakaran sempurna diperlukan udara segar sebanyak 25 Kg.

Sehingga, banyaknya MFO yang dibutuhkan untuk massa udara saat awal langkah kompresor satu siklus kerja motor sebesar 0,516 Kg adalah:

$$\begin{aligned} G_{MFO \text{ per siklus}} &= 0,516 : 25 \\ &= 0,02 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Jika MFO digunakan selama 1 menit dan dioperasikan 500 rpm secara kontinu maka jumlah bahan bakar yang digunakan adalah:

$$\begin{aligned} G_{MFO \text{ per menit}} &= 0,5 \cdot 500 \cdot 0,02 \\ &= 5 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Jadi, jumlah MFO yang dibutuhkan selama 1 jam beroperasi dengan 500 rpm sebanyak:

$$\begin{aligned} G_{MFO \text{ per jam}} &= 5 \cdot 60 \\ &= 300 \text{ Kg (302,72 L)} \end{aligned}$$

Jika 1 Kg MFO mengandung nilai kalori sebesar 9.700 Kcal. Maka banyaknya panas yang dihasilkan pada proses pembakaran antara MFO dan udara di dalam silinder motor selama 1 jam adalah:

$$\begin{aligned} Q_{motor \text{ per detik}} &= (G_{MFO \text{ per detik}} \cdot H_1) / 3600 \\ &= (300 \cdot 9700) / 3600 \\ &= 808,33 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

Daya motor (Ni) yang dihasilkan sebesar:

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{Q_{motor \text{ per det}} \cdot 427 \text{ Kg.m}}{75 \text{ Kg.m/det}} \\ &= \frac{808,33 \text{ Kcal} \cdot 427 \text{ Kg.m}}{75 \text{ Kg.m/det}} \\ &= 4.602,09 \text{ PK (78.930,9 kWh)} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan massa konsumsi MFO pada mesin Sulzer ZAV 40 S di PT PLN (PERSERO) sektor Kapuas ULPLTU/D Sei Raya, Kalimantan Barat berdasarkan teoritis adalah sekitar 7.265,28 L/hari dan daya yang dihasilkan sekitar

78.930,9 kWh sedangkan data lapangan MFO yang digunakan sebanyak 22.871 L/hari dan daya yang dihasilkan sekitar 87.204,5 kWh. Selain itu, perbandingan energi panas yang dihasilkan berdasarkan teoritis dengan data di lapangan adalah 808,33 dan 893,059 Kcal. Perbandingan massa konsumsi (G), daya (Ni) dan energi panas (Q) yang dihasilkan antara perhitungan teoritis dan hasil data lapangan terdapat perbedaan yang sangat jauh. Adapun perbedaan hasil analisis parameter ini menyebabkan penggunaan bahan bakar MFO berlebihan dan sistem proses produksi sumber energi panas yang dihasilkan tidak optimal karena kinerja pada komponen-komponen pembangkit listrik ini yang kurang optimal dan efisien.

Adapun penyebab penggunaan bahan bakar yang berlebihan, daya yang dihasilkan kecil dan energi panas kecil dibandingkan dengan perhitungan teoritis yaitu karena memiliki suhu udara luar yang tinggi disekitar motor diesel penggerak generator sehingga diasumsikan nilai λ (faktor kelebihan udara) kurang dari 1,1 yang berdampak pada konsumsi bahan bakar berlebih dan udara berkurang sehingga menimbulkan asap pada gas buang, suhu keluaran pendingin udara dari *turbo charging (air cooler)* terlalu tinggi sehingga berdampak pada penurunan kinerja mesin karena tekanan udara berkurang dan kebocoran pada pipa bahan bakar sehingga menyebabkan pemborosan pada putaran mesin. Selain itu umur pembangkit listrik yang sudah tua yaitu sekitar 28 tahun sejak berdirinya ULPLTU/D ini.

IV. Kesimpulan

Kesimpulan dari hasil analisis ini berdasarkan perbandingan data lapangan dan perhitungan teoritis menunjukkan bahwa pembangkit listrik dengan menggunakan mesin Sulzer ZAV 40 S di PT PLN (PERSERO) sektor Kapuas ULPLTU/D Sei Raya mengalami penurunan kinerja dalam menghasilkan energi panas/termal untuk memproduksi sumber listrik. Hal ini dapat dilihat dari analisis observasi lapangan yang menunjukkan daya (Ni) yang dihasilkan sekitar 87.204,5 kWh dengan menggunakan bahan bakar MFO sebanyak 22.871 L/hari. Sedangkan hasil perhitungan teoritis menghasilkan daya sekitar 78.930,9 kWh dengan penggunaan bahan bakarnya sekitar 7.265,28 L/hari. Selisih nilai hasil perbandingan massa MFO secara teoritis dengan data di lapangan yaitu 3:1, hal ini menunjukkan bahwa daya sangat pengaruh pada output mesin diesel yang dihasilkan untuk pembangkit listrik. Selain itu nilai efisiensi termal tergantung pada besarnya daya yang dihasilkan oleh mesin diesel, jumlah konsumsi MFO dan nilai kalor. Semakin besar nilai kalor yang dihasilkan maka efisiensi termal pembangkit yang dihasilkan akan semakin besar. Namun pada penelitian ini diperoleh data perbandingan lapangan diperoleh nilai kalornya sekitar 893,059 Kcal sedangkan menurut hasil analisis perhitungan secara teori diperoleh nilai kalornya sekitar 808,33 Kcal. Hal ini menunjukkan pengaruh

tinggi/rendahnya nilai efisiensi termal dipengaruhi oleh nilai kalor suatu bahan bakar dan jumlah konsumsi massa MFO terhadap kinerja mesin diesel tersebut.

Daftar Pustaka

- Alfalah, W., Sulisty, E., & Ikhsan, R. (2017). Pengaruh Pemeliharaan *Overhaul Turbocharger* Terhadap Kinerja Mesin Unit VII PLTD Ampenan. *Sekolah Tinggi Teknik - PLN*, 5 (Power plant).
- Cheapower.com.(2021). Layanan. Diakses pada tanggal 20 Juni 2021, dari <http://www.cheapower.com/photos/000270f.pdf>.
- Ding, Y., Xiang, L., Li, J., Cui, H., & Zhang, Y. (2018). Modeling of Thermodynamic Properties of Diesel Fuel and In-Cylinder Gas for Diesel Engine Combustion Investigation. *Energy and Fuels*, 32(12), 12871–12883. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b02570>
- Indarto, A. & Fajarsari, A. D. (2020). Study on the Effect of Energy Losses on Diesel Power Plant Efficiency (Case Study at Diesel Power Plant at Human Resources Development Center for Electricity , New Renewable Energy and Energy Conservation). *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 9(1), 124–137.
- Isermann, R. (2017). Combustion Engine Diagnosis. In *Combustion Engine Diagnosis*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49467-7>
- Jääskeläinen, H., (2020). Engine Efficiency, (dieselnet.com) diakses tanggal 14 Juni 2021, dari URL website: https://dieselnet.com/tech/engine_efficiency.php
- Li, J., Jacobs, T. J., Bera, T., & Parkes, M. A. (2018). Comparison of diesel engine efficiency and combustion characteristics between different bore engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 140(10), 1–13. <https://doi.org/10.1115/1.4040092>
- Padilla, N., Subaer, S., & Muris, M. (2019). Analisis Penggunaan Bahan Bakar High Speed Diesel (Hsd) Dan Marine Fuel Oil (Mfo) Terhadap Parameter Titik Utama Siklus Kerja Dan Performa Mesin Diesel Mitsubishi Man Type 18V52/55a. *Jurnal Sains Dan Pendidikan Fisika*, 15(1), 8–15. <https://doi.org/10.35580/jspf.v15i1.9402>
- Pratamei.com.(2021) Layanan. Diakses pada tanggal 20 Juni 2021, dari <https://pratamei.com/layanan/>
- Ramadhani, S. (2019). Analisa perhitungan pembakaran pada motor diesel. *Jurnal Laminar*, 1(1), 1–7.
- Salsabila, G. H. H. (2019). Proses Treatment Marine Fuel Oil (Mfo) Sebagai Bahan Bakar Pada Mesin Diesel. *Jurnal Kompetensi Teknik*, 11(1), 30–35. <https://doi.org/10.15294/jkomtek.v11i1.19749>
- Speight, J. G. (2019). Chapter 3 - Hydrocarbons from crude oil. In *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128099230/handbook-of-industrial-hydrocarbon-processes>
- Syahrir Habiba, M., Darmulia, D., Efendi, R., & Irsal, I. (2017). Analisis Kinerja Mesin Diesel Terhadap Pemakaian Bahan Bakar Heavy Fuel Oil (Hfo) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (Pltd) Tallasa Kabupaten Takalar. *ILTEK: Jurnal Teknologi*, 12(02), 1790–1795. <https://doi.org/10.47398/iltek.v12i02.383>
- Uloli, H., Giu, J. D., & Sulaeman, A. (2018). Analisis Pemakaian Bahan Bakar pada Mesin MAK 8M453 Unit 5 PLTD Telaga. 16(1), 1–11.
- Vipavanich, C., Chuepeng, S., & Skullong, S. (2018). Heat release analysis and thermal efficiency of a single cylinder diesel dual fuel engine with gasoline port injection. *Case Studies in Thermal Engineering*, 12(April), 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.04.011>
- Yao, Z. M., Qian, Z. Q., Li, R., & Hu, E. (2019). Energy efficiency analysis of marine high-powered medium-speed diesel engine base on energy balance and exergy. *Energy*, 176, 991–1006. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.027>