

Analisis Efisiensi Boiler Menggunakan Metode *Direct* dan *Indirect* pada PLTU Jeneponto 2×135 MW

Musdholifah Habibuddin¹, Muhammad Anshar², dan Firman³

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar 90245, Indonesia
* musdhalifahhabibuddin@gmail.com¹, muh_anshar@poliupg.ac.id², dan firman@poliupg.ac.id³

Abstract: *One of the industrial machines whose role is very important is the boiler. Boilers in this company is a very important asset for the company, if there is a problem with the boiler system, the smooth flow of steam will be disrupted so that the boiler efficiency will decrease, therefore it is very necessary to review the performance of the machine so that there is no waste of energy. The main object of this research is the Boiler PLTU Jeneponto 2 × 135 MW. The method used to determine boiler efficiency is the direct method and the indirect method. direct method is the energy obtained from the working fluid (water and steam) compared to the energy contained in the boiler fuel, while the indirect method is the efficiency which is the difference between heat loss and the incoming energy. This research aims to find out how much the boiler efficiency decreases. Based on the results of research with the direct method, the boiler efficiency in 2021 and 2022 is 42.63% and 64.11%, while with the indirect method, boiler efficiency before and after overhaul is 80.09% and 80.71%. The value of heat loss (Heat Losses) due to dry flue gas (L_{dg}) before and after overhaul is 6.40% and 5.87%. Heat losses due to evaporation of water formed by the presence of H_2 in the fuel (L_H) is 6.25% and 6.21%. Heat loss due to evaporation of moisture content in the fuel (L_{mf}) is 5.50% and 5.48%. Heat loss due to moisture content in air (L_{ma}) has the same value of 0.26%, and heat loss due to radiation and other unaccounted losses (L_{uc}) is 1.5%.*

Keywords: *Boilers; Efficiency; Direct; Indirect; Heat losses.*

Abstrak : Salah satu mesin industri yang perannya sangat penting yaitu boiler. Boiler dalam perusahaan ini merupakan asset yang sangat penting bagi perusahaan, apabila terjadi masalah pada sistem boiler, maka kelancaran steam (uap) akan terganggu sehingga efisiensi boiler akan mengalami penurunan, oleh karena itu sangat diperlukan untuk mengkaji ulang kinerja mesin agar tidak terjadi pemborosan energi. Objek utama pada penelitian ini ialah Boiler PLTU Jeneponto 2 × 135 MW. Metode yang digunakan untuk menentukan efisiensi boiler yaitu metode langsung (*Direct Method*) dan metode tak langsung (*Indirect Method*). metode langsung (*Direct Method*) yaitu energi yang didapat dari fluida kerja (air dan steam) dibandingkan dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar boiler, sedangkan metode tak langsung (*Indirect Method*) yaitu efisiensi merupakan perbedaan antara kehilangan panas (*Heat loss*) dan energi yang masuk. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar penurunan efisiensi boiler. Berdasarkan hasil penelitian dengan metode langsung (*Direct Method*) efisiensi boiler di tahun 2021 dan 2022 yaitu 42,63 % dan 64,11 % sedangkan dengan metode tak langsung (*Indirect Method*) efisiensi boiler sebelum dan sesudah overhaul yaitu 80,09 % dan 80,71 %. Nilai kehilangan panas (*Heat Losses*) karena gas buang yang kering (L_{dg}) sebelum dan sesudah overhaul sebesar 6,40 % dan 5,87 %. Kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk oleh adanya H_2 dalam bahan bakar (L_H) sebesar 6,25 % dan 6,21 %. Kehilangan panas karena penguapan kadar air dalam bahan bakar (L_{mf}) sebesar 5,50 % dan 5,48 %. Kehilangan panas karena kadar air dalam udara (L_{ma}) memiliki nilai yang sama yaitu 0,26 % , dan kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan lain yang tak terhitung (L_{uc}) sebesar 1,5 % .

Kata kunci : *Boiler; Efisiensi; Langsung; Tak langsung; Kehilangan panas.*

I. PENDAHULUAN

Industri pada saat ini mengalami kemajuan yang pesat, perkembangan yang terjadi tersebut tentunya akan menimbulkan persaingan yang ketat antara perusahaan, sehingga sangat diperlukan untuk mengkaji ulang kinerja mesin agar tidak terjadi pemborosan energi. Salah satu mesin industri yang perannya sangat penting yaitu boiler. Boiler dalam perusahaan ini merupakan asset yang sangat penting bagi perusahaan, apabila terjadi masalah pada sistem boiler, maka kelancaran steam (uap) akan terganggu sehingga efisiensi boiler akan mengalami penurunan [1 - 5].

Boiler adalah bejana tertutup dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk air panas atau uap. Komponen penting pada boiler adalah burner, ruang bakar, penukar panas dan sistem kontrol. Komposisi yang tepat dalam pencampuran antara bahan bakar dan udara di ruang bakar akan

menghasilkan pembakaran yang sempurna. Panas yang dihasilkan ditransfer ke air melalui penukar panas. Uap panas lanjut pada tekanan tertentu kemudian digunakan untuk proses produksi untuk memutar turbin uap yang akan menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik.

Sistem kelistrikan di Sulawesi Selatan mempunyai sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) diantaranya yang berada di kabupaten Jeneponto yang dikelola oleh PT. Bosowa Energi yang memiliki 4 unit pembangkit dengan kapasitas desain 2×125 MW dan 2×135 MW [6]. Penggunaan bahan bakar sangat mendominasi pembiayaan produksi di perusahaan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) Jeneponto mencakup bagian yang terbesar dari total biaya produksi. Peralatan yang ada di PLTU Jeneponto pada umumnya berumur kurang lebih 10 tahun semenjak pendirian pembangkit tersebut. Efisiensi peralatan tersebut menurun sejalan dengan bertambahnya umur peralatan, ketika efisiensi menurun pemakaian bahan bakar dan hasil yang diperoleh tidak sesuai dengan target produksi. Penurunan efisiensi menyebabkan kerugian ekonomi dikarenakan harga bahan bakar semakin hari semakin meningkat, oleh karena itu perlu dilakukan peningkatan efisiensi untuk meningkatkan kinerja suatu peralatan, menghemat penggunaan bahan bakar, dan meningkatkan hasil produksi peralatan tersebut. Atas dasar pemikiran tersebut penulis mengangkat permasalahan PLTU dengan judul “Analisis Efisiensi Boiler Menggunakan Metode *Direct* Dan *Indirect* Pada PLTU Jeneponto 2×135 MW”.

II. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan untuk menentukan efisiensi boiler yaitu metode langsung (*Direct Method*) dan metode tak langsung (*Indirect Method*) [7 - 9].

A. Metode Langsung

Perhitungan Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Langsung (*Direct Method*)
Menghitung efisiensi boiler menggunakan metode langsung

$$\eta = \frac{\dot{m}_s \times (h_g - h_f)}{\dot{m}_f \times GCV} \times 100\%$$

B. Metode Tak Langsung

Perhitungan Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Tak Langsung (*Indirect Method*)

1. Menghitung kebutuhan udara teoritis ($W_{ud \text{ teoritis}}$)

$$W_{ud \text{ teoritis}} = [(11,43 \times C) + \{34,5 \times (H_2 - O_2 / 8)\} + (4,32 \times S)] / 100 \text{ kg/kg bb}$$

2. Menghitung persentase kelebihan udara yang dipasok (EA)

$$EA = \frac{\text{persentase } O_2}{21 - \text{persentase } O_2} \times 100\%$$

3. Menghitung massa udara sebenarnya yang dipasok kg/kg bahan bakar ($W_{ud \text{ actual}}$)

$$W_{ud \text{ actual}} = \left[1 + \frac{EA}{100}\right] \times W_{ud \text{ teoritis}}$$

4. Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh Karbondioksida (CO_2)

$$CO_2 = \left(\frac{44}{12}\right) \times C \text{ (kg/kg bb)}$$

5. Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh Sulphurdioksida (SO_2)

$$SO_2 = \left(\frac{64}{32}\right) \times S = 2 \times S \text{ (kg/kg bb)}$$

6. Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh Nitrogen (N_2)

$$N_2 = N + (0,768 \times W_{ud \text{ actual}}) \text{ (kg/kg bb)}$$

7. Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh Oksigen (O_2)

$$O_2 = (W_{ud \text{ actual}} - W_{ud \text{ teoritis}}) \times 0,232 \text{ (kg/kg bb)}$$

8. Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh massa gas buang kering (m)

$$m = CO_2 + SO_2 + N_2 + O_2$$

9. Memperkirakan persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh gas buang yang kering

$$L_{dg} = \frac{m \times C_{pg} (T_g - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\%$$

10. Memperkirakan persentase kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk oleh adanya H₂ dalam bahan bakar (L_H)

$$L_H = \frac{9 \times H \{584 + C_{ps} \times (T_g - T_a)\}}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\%$$

11. Memperkirakan persentase kehilangan panas karena penguapan kadar air dalam bahan bakar (L_{mf})

$$L_{mf} = \frac{MF \{584 + C_{ps} (T_g - T_a)\}}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\%$$

12. Memperkirakan persentase kehilangan panas karena kadar air dalam udara (L_{ma})

$$L_{ma} = \frac{AAS \times \text{humidity factor} \times C_{ps} (T_g - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\%$$

13. Memperkirakan persentase kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan lain yang tak terhitung (L_{uc})

Kehilangan panas karena radiasi dan lainnya merupakan kehilangan panas akibat terpancarnya panas ke permukaan komponen boiler dan kehilangan panas yang tak terhitung lainnya. Kehilangan panas tersebut yang persentasenya rumit untuk dihitung secara pasti, maka dari itu diasumsikan persentase kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan yang tak terhitung (L_{uc}) sebesar 1,5%.

14. Menghitung persentase kehilangan panas total pada boiler bila panas hanya digunakan untuk pemanasan fluida (L_{tot})

$$L_{tot} = L_{dg} + L_H + L_{mf} + L_{ma} + L_{uc}$$

15. Menentukan efisiensi boiler (η_{boiler})

$$\eta_{boiler} = 100 - L_{tot}$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

➤ Kondisi Operasi Sebelum Overhaul (2021) Beban 100 MW

- A. Menentukan Efisiensi Boiler Menggunakan Metode *Direct* (Metode Langsung)

Berdasarkan tabel pada lampiran 1 diperoleh data-data sebagai berikut:

- Steam Flow (ṁ _s)	: 401,59 t/h
- Fuel Flow (ṁ _f)	: 96,01 t/h
- Steam Temperature (T ₁)	: 517,68 °C
- Steam Pressure (P ₁)	: 13,09 MPa
- Feed Water Pressure (P ₂)	: 14,69 MPa
- Gross Calorific Value (GCV)	: 4.183 Kcal/kg

Berdasarkan table uap *Superheated Water Vapor* (Tabel A-4) pada tekanan boiler 13,09 MPa dan suhu 517,68 °C diperoleh:

- Entalpi Uap (h_g) = 3382,27 kJ/kg

Berdasarkan table uap *Saturated Water* (Tabel A-3) pada tekanan boiler 14,69 MPa diperoleh:

- Entalpi *Feed Water* (h_f) = 1598,40 kJ/kg

Dengan Metode *Direct* (Metode Langsung) didapatkan efisiensi boiler sebagai berikut:

$$\eta = \frac{\text{OUTPUT}}{\text{INPUT}} \times 100 \%$$

$$\eta = \frac{\dot{m}_s \times (h_g - h_f)}{\dot{m}_f \times GCV} \times 100 \%$$

$$\eta = \frac{401.590 \text{ kg/jam} \times (3382,27 - 1598,40) \text{ kJ/kg}}{96.010 \text{ kg/jam} \times 17.501 \text{ kJ/kg}} \times 100 \%$$

$$\eta = \frac{716.384.353,3}{1.680.271.010} \times 100 \%$$

$$\eta = 42,63 \%$$

B. Menentukan Efisiensi Boiler Menggunakan Metode *Indirect* (Metode Tak Langsung)

Berdasarkan Metode *Heat Loss* (Kehilangan Panas) sesuai standar ASME PTC 4-1 [7] dengan data Analisa batubara, temperature gas buang, pada air heater, temperatur udara sekitar dan beberapa parameter yang diperlukan, maka efisiensi thermal boiler dapat dihitung sebagai berikut:

- Analisis Proximate Batubara:
 - Total Moisture : 35,95 %
 - Gross Calorific Value : 4.183 kcal/kg
- Analisis Ultimate Batubara
 - Carbon : 59,78 %
 - Hidrogen : 4,54 %
 - Nitrogen : 0,80 %
 - Sulphur : 0,13 %
 - Oksigen : 19,38 %
- Temperatur Gas Buang (T_g) : 156,43 °C
- *Ambient Temperature* (T_a) : 33 °C
- Persentase Oksigen : 3,30 %
- Kelembaban Udara : 0,022 kg/kg udara kering
- Panas Jenis Gas Buang (C_{pg}) : 0,23 kcal/kg
- Panas Jenis Uap Lewat Jenuh (C_{ps}): 0,45 kcal/kg

Dengan Metode *Indirect* (Metode Tak Langsung) didapatkan efisiensi boiler sebagai berikut:

Tahap 1: Menghitung kebutuhan udara teoritis ($W_{ud \text{ teoritis}}$)

$$W_{ud \text{ teoritis}} = [(11,43 \times C) + \{34,5 \times (H_2 - O_2 / 8)\} + (4,32 \times S)] / 100 \text{ kg/kg bb}$$

$$W_{ud \text{ teoritis}} = \left[\frac{(11,43 \times 59,78 \%) + \{34,5 \times (4,54 \% - 19,38 \% / 8)\} + (4,32 \times 0,13 \%)}{100 \text{ kg/kg bb}} \right]$$

$$W_{ud \text{ teoritis}} = 7,57 \text{ kg/kg bb}$$

Tahap 2: Menghitung persentase kelebihan udara yang dipasok (EA)

$$EA = \frac{\text{persentase } O_2}{21 - \text{persentase } O_2} \times 100\%$$

$$EA = \frac{3,30 \%}{21 - 3,30 \%} \times 100 \%$$

$$EA = 18,67 \%$$

Tahap 3: Menghitung massa udara sebenarnya yang dipasok kg/kg bahan bakar ($W_{ud \text{ actual}}$)

$$W_{ud \text{ actual}} = \left[1 + \frac{EA}{100} \right] \times W_{ud \text{ teoritis}}$$

$$W_{ud \text{ actual}} = \left[1 + \frac{18,67 \%}{100} \right] \times 7,57 \text{ kg/kg bahan bakar}$$

$$W_{ud \text{ actual}} = 8,98 \text{ kg/kg bb}$$

Tahap 4: Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh Karbondioksida (CO_2)

$$CO_2 = \left(\frac{44}{12} \right) \times C$$

$$CO_2 = \left(\frac{44}{12} \right) \times 0,598$$

$$CO_2 = 2,192 \%$$

Tahap 5: Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh Sulphurdioksida (SO_2)

$$SO_2 = \left(\frac{64}{32}\right) \times S$$

$$SO_2 = 2 \times S$$

$$SO_2 = 2 \times 0,001$$

$$SO_2 = 0,002 \%$$

Tahap 6: Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh Nitrogen (N₂)

$$N_2 = N + (0,768 \times W_{ud \text{ aktual}})$$

$$N_2 = 0,008 + (0,768 \times 8,98 \text{ kg/kg bb})$$

$$N_2 = 6,906 \%$$

Tahap 7: Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh Oksigen (O₂)

$$O_2 = (W_{ud \text{ aktual}} - W_{ud \text{ teoritis}}) \times 0,232 \text{ (kg/kg bb)}$$

$$O_2 = (6,906 \text{ kg/kg bb} - 7,57 \text{ kg/kg bb}) \times 0,232 \text{ kg/kg bb}$$

$$O_2 = 0,328 \%$$

Tahap 8: Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh massa gas buang kering (m)

$$m = CO_2 + SO_2 + N_2 + O_2$$

$$m = 2,192 \% + 0,002 \% + 6,906 \% + 0,328 \%$$

$$m = 9,43 \%$$

Tahap 9: Memperkirakan persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh gas buang yang kering (L_{dg})

$$L_{dg} = \frac{m \times C_{pg} (T_g - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_{dg} = \frac{9,43 \% \times 0,23 \text{ kkal/kg} (156,43^\circ\text{C} - 33^\circ\text{C})}{4.183 \text{ kkal/kg}} \times 100 \%$$

$$L_{dg} = 6,40 \%$$

Tahap 10: Memperkirakan persentase kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk oleh adanya H₂ dalam bahan bakar (L_H)

$$L_H = \frac{9 \times H \{584 + C_{ps} \times (T_g - T_a)\}}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_H = \frac{9 \times 0,05 \{584 + 0,45 \text{ kkal/kg} \times (156,43 \text{ kkal/kg} - 33^\circ\text{C})\}}{4.183 \text{ kkal/kg}} \times 100 \%$$

$$L_H = 6,25 \%$$

Tahap 11: Memperkirakan persentase kehilangan panas karena penguapan kadar air dalam bahan bakar (L_{mf})

$$L_{mf} = \frac{MF \{584 + C_{ps} (T_g - T_a)\}}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_{mf} = \frac{0,35 \{584 + 0,45 \text{ kkal/kg} + (156,43 \text{ kkal/kg} - 33^\circ\text{C})\}}{4.183 \text{ kkal/kg}} \times 100 \%$$

$$L_{mf} = 5,50 \%$$

Tahap 12: Memperkirakan persentase kehilangan panas karena kadar air dalam udara (L_{ma})

$$L_{ma} = \frac{W_{ud \text{ actual}} \times \text{humidity factor} \times C_{ps} (T_g - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_{ma} = \frac{8,98 \text{ kg/kg bb} \times 0,022 \text{ kg/kg} \times 0,45 \text{ kkal/kg} (156,43 \text{ kkal/kg} - 33^\circ\text{C})}{4.183 \text{ kkal/kg}} \times 100 \%$$

$$L_{ma} = 0,26 \%$$

Tahap 13: Memperkirakan persentase kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan lain yang tak terhitung (L_{uc})

Kehilangan panas karena radiasi dan lainnya merupakan kehilangan panas akibat terpancarnya panas ke permukaan komponen boiler dan kehilangan panas yang tak terhitung lainnya. Kehilangan panas tersebut yang persentasenya rumit untuk dihitung secara pasti, maka dari itu diasumsikan persentase kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan yang tak terhitung (L_{uc}) sebesar 1,5%.

Tahap 14: Memperkirakan persentase kehilangan panas total pada boiler bila panas hanya digunakan untuk pemanasan fluida (L_{tot})

$$L_{\text{tot}} = L_{\text{dg}} + L_{\text{H}} + L_{\text{mf}} + L_{\text{ma}} + L_{\text{uc}}$$

$$L_{\text{tot}} = 6,40 \% + 6,25 \% + 5,50 \% + 0,26 \% + 1,5 \%$$

$$L_{\text{tot}} = 19,91 \%$$

Tahap 15: Menentukan efisiensi boiler (η_{boiler})

$$\eta_{\text{boiler}} = 100 \% - L_{\text{tot}}$$

$$\eta_{\text{boiler}} = 100 \% - 19,91 \%$$

$$\eta_{\text{boiler}} = 80,09 \%$$

➤ **Kondisi Operasi Sesudah Overhaul (2022) Beban 100 MW**

A. Menentukan Efisiensi Boiler Menggunakan Metode *Direct* (Metode Langsung)

Berdasarkan tabel pada lampiran 1 diperoleh data-data sebagai berikut:

- Steam Flow (\dot{m}_s)	: 408,39 t/h
- Fuel Flow (\dot{m}_f)	: 65,40 t/h
- Steam Temperature (T_1)	: 519,79 °C
- Steam Pressure (P_1)	: 12,95 MPa
- Feed Water Pressure (P_2)	: 14,66 MPa
- <i>Gross Calorific Value (GCV)</i>	: 4.174 kcal/kg

Berdasarkan tabel uap *Superheated Water Vapor* (Tabel A-4) pada tekanan boiler 12,95 MPa dan suhu 519,79 °C diperoleh:

- Entalpi Uap (h_g) = 3389,89 kJ/kg

Berdasarkan tabel uap *Saturated Water* (Tabel A-3) pada tekanan boiler 14,66 MPa diperoleh:

- Entalpi *Feed Water* (h_f) = 1596,91 kJ/kg

Dengan Metode *Direct* (Metode Langsung) didapatkan efisiensi boiler sebagai berikut:

$$\eta = \frac{\text{OUTPUT}}{\text{INPUT}} \times 100 \%$$

$$\eta = \frac{\dot{m}_s \times (h_g - h_f)}{\dot{m}_f \times \text{GCV}} \times 100 \%$$

$$\eta = \frac{408.390 \text{ kg/jam} \times (3399,89 - 1596,91) \text{ kJ/kg}}{65.400 \text{ kg/jam} \times 17.464 \text{ kJ/kg}} \times 100 \%$$

$$\eta = \frac{736.319.002,2}{1.142.145.600} 100 \%$$

$$\eta = 64,11 \%$$

B. Menentukan Efisiensi Boiler Menggunakan Metode *Indirect* (Metode Tak Langsung)

Berdasarkan Metode Heat Loss (Kehilangan Panas) sesuai standar ASME PTC 4-1 [2] [6] dengan data Analisa batubara, temperature gas buang, pada air heater, temperatur udara sekitar dan beberapa parameter yang diperlukan, maka efisiensi thermal boiler dapat dihitung sebagai berikut:

- Analisis Proximate Batubara:
 - Total Moisture : 35,94 %
 - Gross Calorific Value : 4.174 kcal/kg
- Analisis Ultimate Batubara
 - Carbon : 59,71 %
 - Hidrogen : 4,53 %
 - Nitrogen : 0,80 %

- Sulphur : 0,33 %
- Oksigen : 17,01 %
- Temperatur Gas Buang (T_g) : 155,00 °C
- Ambient Temperature (T_a) : 33 °C
- Persentase Oksigen : 2,69 %
- Kelembaban Udara : 0,022 kg/kg udara kering
- Panas Jenis Gas Buang (C_{pg}) : 0,23 kcal/kg
- Panas Jenis Uap Lewat Jenuh (C_{ps}): 0,45 kcal/kg

Dengan Metode *Indirect* (Metode Tak Langsung) didapatkan efisiensi boiler sebagai berikut:

Tahap 1: Menghitung kebutuhan udara teoritis ($W_{ud\ teoritis}$)

$$W_{ud\ teoritis} = [(11,43 \times C) + \{34,5 \times (H_2 - O_2 / 8)\} + (4,32 \times S)] / 100 \text{ kg/kg bb}$$

$$W_{ud\ teoritis} = \left[\frac{(11,43 \times 59,71\%) + \{34,5 \times (4,53\% - 17,01\% / 8)\} + (4,32 \times 0,33\%)}{100 \text{ kg/kg bb}} \right]$$

$$W_{ud\ teoritis} = 7,67 \text{ kg/kg bahan bakar}$$

Tahap 2: Menghitung persentase kelebihan udara yang dipasok (EA)

$$EA = \frac{\text{persentase } O_2}{21 - \text{persentase } O_2} \times 100\%$$

$$EA = \frac{2,69\%}{21 - 2,69\%} \times 100\%$$

$$EA = 14,75\%$$

Tahap 3: Menghitung massa udara sebenarnya yang dipasok kg/kg bahan bakar ($W_{ud\ actual}$)

$$W_{ud\ actual} = \left[1 + \frac{EA}{100} \right] \times W_{ud\ teoritis}$$

$$W_{ud\ actual} = \left[1 + \frac{14,75\%}{100} \right] \times 7,67 \text{ kg/kg bahan bakar}$$

$$W_{ud\ actual} = 8,80 \text{ kg/kg bb}$$

Tahap 4: Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh Karbondioksida (CO_2)

$$CO_2 = \left(\frac{44}{12} \right) \times C$$

$$CO_2 = \left(\frac{44}{12} \right) \times 0,597$$

$$CO_2 = 2,189\%$$

Tahap 5: Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh Sulphurdioksida (SO_2)

$$SO_2 = \left(\frac{64}{32} \right) \times S$$

$$SO_2 = 2 \times S$$

$$SO_2 = 2 \times 0,003$$

$$SO_2 = 0,006\%$$

Tahap 6: Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh Nitrogen (N_2)

$$N_2 = N + (0,768 \times W_{ud\ actual})$$

$$N_2 = 0,008 + (0,768 \times 8,80 \text{ kg/kg bb})$$

$$N_2 = 6,766\%$$

Tahap 7: Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh Oksigen (O_2)

$$O_2 = (W_{ud\ actual} - W_{ud\ teoritis}) \times 0,232$$

$$O_2 = (8,80 \text{ kg/kg bb} - 7,67 \text{ kg/kg bb}) \times 0,232$$

$$O_2 = 0,262\%$$

Tahap 8: Menghitung persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh massa gas buang kering

(m)

$$m = \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2$$

$$m = 2,189 \% + 0,006 \% + 6,766 \% + 0,262 \%$$

$$m = 9,22 \%$$

Tahap 9: Memperkirakan persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh gas buang yang kering (L_{dg})

$$L_{dg} = \frac{m \times C_{pg} (T_g - T_a)}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_{dg} = \frac{9,22 \% \times 0,23 \text{ kkal/kg} (148,40^\circ\text{C} - 33^\circ\text{C})}{4.174 \text{ kkal/kg}} \times 100 \%$$

$$L_{dg} = 5,87 \%$$

Tahap 10: Memperkirakan persentase kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk oleh adanya H_2 dalam bahan bakar (L_H)

$$L_H = \frac{9 \times H \{584 + C_{ps} \times (T_g - T_a)\}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_H = \frac{9 \times 0,045 \{584 + 0,45 \text{ kkal/kg} \times (148,40 \text{ kkal/kg} - 33^\circ\text{C})\}}{4.174 \text{ kkal/kg}} \times 100 \%$$

$$L_H = 6,21 \%$$

Tahap 11: Memperkirakan persentase kehilangan panas karena penguapan kadar air dalam bahan bakar (L_{mf})

$$L_{mf} = \frac{\text{MF} \{584 + C_{ps} (T_g - T_a)\}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_{mf} = \frac{0,359 \{584 + 0,45 \text{ kkal/kg} + (148,40 \text{ kkal/kg} - 33^\circ\text{C})\}}{4.174 \text{ kkal/kg}} \times 100 \%$$

$$L_{mf} = 5,48 \%$$

Tahap 12: Memperkirakan persentase kehilangan panas karena kadar air dalam udara (L_{ma})

$$L_{ma} = \frac{\text{Wud actual} \times \text{humidity factor} \times C_{ps} (T_g - T_a)}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_{ma} = \frac{8,80 \text{ kg/kg bb} \times 0,022 \text{ kg/kg} \times 0,45 \text{ kkal/kg} (148,40 \text{ kkal/kg} - 33^\circ\text{C})}{4.174 \text{ kkal/kg}} \times 100 \%$$

$$L_{ma} = 0,26 \%$$

Tahap 13: Memperkirakan persentase kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan lain yang tak terhitung (L_{uc})

Kehilangan panas karena radiasi dan lainnya merupakan kehilangan panas akibat terpancarnya panas ke permukaan komponen boiler dan kehilangan panas yang tak terhitung lainnya. Kehilangan panas tersebut yang persentasenya rumit untuk dihitung secara pasti, maka dari itu diasumsikan persentase kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan yang tak terhitung (L_{uc}) sebesar 1,5%.

Tahap 14: Memperkirakan persentase kehilangan panas total pada boiler bila panas hanya digunakan untuk pemanasan fluida (L_{tot})

$$L_{tot} = L_{dg} + L_H + L_{mf} + L_{ma} + L_{uc}$$

$$L_{tot} = 5,87 \% + 6,21 \% + 5,48 \% + 0,26 \% + 1,5 \%$$

$$L_{tot} = 19,29 \%$$

Tahap 15: Menentukan efisiensi boiler (η_{boiler})

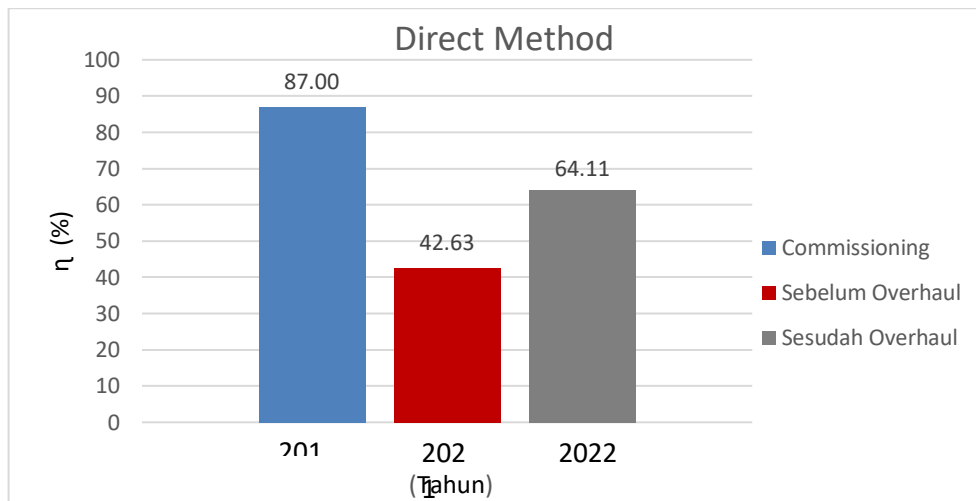
$$\eta_{boiler} = 100 - L_{tot}$$

$$\eta_{boiler} = 100 \% - 19,29 \%$$

$$\eta_{boiler} = 80,71 \%$$

➤ **Pembahasan**

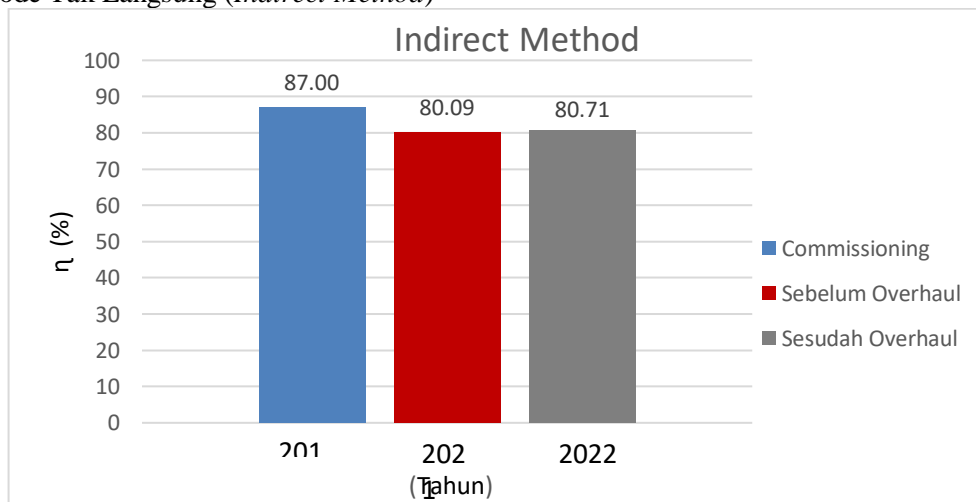
1. Grafik Metode Langsung (*Direct Method*)



Gambar 1. Grafik Perbandingan Efisiensi Boiler Menggunakan Metode *Direct* Pada PLTU Jeneponto 2×135 MW Saat *Commissioning* (2018) Dengan Kondisi Sebelum *Overhaul* (2021) Dan Sesudah *Overhaul* (2022) Pada Beban 100 MW

Berdasarkan Gambar 1 terlihat grafik efisiensi boiler PLTU Jeneponto 2×135 MW menggunakan Metode Langsung (*Direct Method*) terhadap kondisi *commissioning* (2018) dengan kondisi sebelum overhaul (2021) dan kondisi sesudah overhaul (2022), pada kondisi *commissioning* (2018) efisiensi boiler bernilai 87,00 % dan kondisi sebelum overhaul (2021) efisiensi boiler bernilai 42,63 % serta kondisi sesudah overhaul (2022) efisiensi boiler bernilai 64,11 %. Terjadi penurunan efisiensi boiler sebesar 44,37 % pada kondisi *commissioning* (2018) dari efisiensi boiler 87,00 % menjadi 42,63 % pada saat sebelum overhaul (2021), sedangkan terjadi peningkatan efisiensi boiler sebesar 21,48 % pada saat sebelum overhaul (2021) dari efisiensi boiler 42,63 % menjadi 64,11 % setelah overhaul (2022).

2. Metode Tak Langsung (*Indirect Method*)



Gambar 2. Grafik Perbandingan Efisiensi Boiler Menggunakan Metode *Indirect* Pada PLTU Jeneponto 2×135 MW Saat *Commissioning* (2018) Dengan Kondisi Sebelum *Overhaul* (2021) Dan Sesudah *Overhaul* (2022) Pada Beban 100 MW

Berdasarkan hasil analisis perhitungan efisiensi boiler menggunakan Metode Tak Langsung (*Indirect Method*), maka didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.4 terlihat grafik efisiensi boiler PLTU Jeneponto 2×135 MW Unit 3 menggunakan Metode Tak Langsung (*Indirect Method*) terhadap kondisi *commissioning* (2018) dengan kondisi sebelum overhaul (2021) dan sesudah overhaul (2022). Pada kondisi *commissioning* (2018) efisiensi boiler bernilai 87,00 % dan kondisi sebelum overhaul (2021) efisiensi boiler bernilai 80,09 % serta kondisi sesudah overhaul (2022) efisiensi boiler bernilai 80,71 %. Terjadi penurunan efisiensi boiler sebesar 6,91 % pada kondisi *commissioning* (2018) dari efisiensi boiler 87,00 % menjadi 80,09 % pada saat sebelum overhaul (2021), Menurunnya efisiensi boiler menggunakan metode tak langsung (*Indirect Method*) dikarenakan adanya *Heat Losses* pada pipa-pipa boiler sehingga efisiensi boiler akan berkurang, semakin tinggi nilai losses pada boiler maka efisiensi boiler akan semakin berkurang. Terjadi peningkatan efisiensi boiler 0,62 % pada saat sebelum overhaul (2021) dari efisiensi boiler 80,02 % menjadi 80,71 % pada saat sesudah overhaul (2022), menurunnya efisiensi boiler menggunakan metode tak langsung (*Indirect Method*) dikarenakan berkurangnya *Heat Losses* pada pipa-pipa boiler sehingga efisiensi boiler akan meningkat, semakin rendah nilai *losses* pada boiler maka efisiensi boiler akan semakin tinggi.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Hasil perhitungan efisiensi boiler PLTU Jeneponto 2×135 MW menggunakan Metode Langsung (*Direct Method*) pada saat sebelum overhaul (2021) nilai efisiensi boiler yaitu 42,63 % sedangkan sesudah overhaul (2022) nilai efisiensi boiler sebesar 64,11 %. Efisiensi boiler mengalami peningkatan sebesar 21,48 % dikarenakan adanya kegiatan overhaul pada akhir tahun 2021, sedangkan pada saat *comissioning* (2018) efisiensi boiler sebesar 87,00 %.
2. Hasil perhitungan efisiensi boiler PLTU Jeneponto 2×135 MW menggunakan Metode Tak Langsung (*Indirect Method*) pada saat sebelum overhaul (2021) nilai efisiensi boiler sebesar 80,09 % dan sesudah overhaul (2022) nilai efisiensi boiler meningkat menjadi 80,71 %. Sedangkan pada kondisi *comissioning* (2018) efisiensi boiler sebesar 87,00 %. Adapun nilai kehilangan panas (*Heat Losses*) sebelum dan sesudah overhaul sebagai berikut:
 - Kehilangan panas karena gas buang yang kering (L_{dg}) sebesar 6,40 % dan 5,87 %
 - Kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk oleh adanya H_2 dalam bahan bakar (L_H) sebesar 6,25 % dan 6,21 %
 - Kehilangan panas karena penguapan kadar air dalam bahan bakar (L_{mf}) sebesar 5,50 % dan 5,48 %
 - Kehilangan panas karena kadar air dalam udara (L_{ma}) sebesar 0,26 % dan 0,26 %
 - Kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan lain yang tak terhitung (L_{uc}) sebesar 1,5 %

B. Saran

Rutin melakukan pengecekan nilai analisis proximate dan ultimate pada bahan bakar batubara agar efisiensi boiler tetap terjaga, memaksimalkan perbaikan dan pembersihan slag pada dinding boiler agar efisiensi boiler tidak mengalami penurunan, dan untuk penelitian selanjutnya sebaiknya melakukan perhitungan efisiensi boiler PLTU Jeneponto 2×135 MW dengan variasi beban yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arham, Arsyil dan Septiawan, Muh. Yusuf. "Evaluasi Kinerja Boiler *Combustion Fluidized Bed (CFB)* di PT. PLN (Persero) Unit PLTU Barru". Makassar: Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang. 2015.
- [2] Gumelar, Galih Prasetyo Aji. Dkk, "Analisis Efisiensi Boiler Berbahan Bakar Gas di PT XYZ Menggunakan Metode Langsung dan Tidak Langsung", Seminar Nasional TREN (2) 22–28,

- 2022.
- [3] Hakbar, M. Alfis, "Sistem Kerja Boiler". Bengkalis, Riau: Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Bengkalis, 2021.
 - [4] Karaeng, Christian Tallu dan Iswandi, "Analisis Kinerja Boiler Pada PLTU Unit 1 PT. Semen Tonasa". Makassar: Jurusan Teknik Mesin Program Studi Teknik Pembangkit Energi Politeknik Negeri Ujung Pandang, 2012.
 - [5] S, Muhammad Irfan dan Utamy, Nurul, "Analisis Pengoperasian *Coal Feeder* Terhadap Kinerja Pembangkit Pada PT Bosowa Energi Ekspansi PLTU Jenepono 2×135 MW". Makassar: Jurusan Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Makassar, 2020.
 - [6] Muis, M. Ikhsan dan Elvi, "Evaluasi Kinerja Boiler PLTU Unit 1 Jenepono". Makassar: Jurusan Teknik Mesin Program Studi Teknik Pembangkit Energi Politeknik Negeri Ujung Pandang, 2019.
 - [7] *ASME PTC 4.1, "Fired Steam Generation", American Standart Mechanical, 1998.*
 - [8] Kharisma, Aji Abdillah dan Budiman, Arif, Perhitungan Efisiensi (*Efficiency*) Mesin Boiler Jenis *Fire – Tube* Menggunakan Metode *Direct* Dan *Indirect* Untuk Produk Butiran-Butiran Pelet, UG JURNAL VOL.14 Edisi 12 Desember 2020.
 - [9] *United Nations Environment Programme, "Boiler & Pemanas Fluida Termis". Pedoman Efisiensi Energi Untuk Industri di Asia, 2008.*