



JURNAL REKAYASA, TEKNOLOGI PROSES DAN SAINS KIMIA

Received: 01-06-2025

Accepted: 10-06-2025

Published: 13-06-2025

ESTIMATION OF BOILER WATER TUBE EFFICIENCY USING SHELL AND FIBER FUEL AT PT. XYZ

Donda^{1)*}, Bagus Wibowo¹⁾ & Krissandarta Tarigan¹⁾

1)Prodi Teknik Kimia, Politeknik Teknologi Kimia Industri, Indonesia

*Corresponding Email: dondast@gmail.com

Abstrak

Boiler merupakan komponen krusial dalam sistem utilitas Pabrik Kelapa Sawit (PKS) karena berfungsi menghasilkan uap untuk keperluan proses produksi dan pembangkitan listrik. Di PT. X, digunakan water tube boiler tipe N 600 SA yang memanfaatkan biomassa berupa cangkang dan serabut kelapa sawit sebagai bahan bakar utama. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi boiler menggunakan dua pendekatan, yaitu metode langsung dan metode tidak langsung. Data operasional yang dianalisis meliputi laju alir bahan bakar, tekanan dan suhu uap, serta nilai kalor bahan bakar. Hasil pengujian menunjukkan bahwa efisiensi boiler berdasarkan metode langsung berada pada kisaran 68,78%, sedangkan dengan metode tidak langsung berkisar antara 67,73% hingga 67,88%. Nilai efisiensi ini belum mencapai target yang ditetapkan vendor, yaitu sebesar 75%. Rendahnya efisiensi diduga disebabkan oleh beberapa faktor, seperti akumulasi kerak akibat penarikan yang tidak sesuai prosedur, serta kualitas air umpan yang kurang optimal karena kerusakan pada sistem penyaringan. Temuan ini menunjukkan perlunya perbaikan dalam aspek operasional untuk meningkatkan kinerja energi boiler secara keseluruhan.

Kata Kunci: Efisiensi Boiler, Metode Langsung, Metode Tidak Langsung, Cangkang, Serabut.

Abstract

The boiler is a critical component in the utility system of palm oil mills, as it generates steam required for production processes and power generation. At PT. X, a Takuma N-600 SA water tube boiler is utilized, using biomass—specifically palm kernel shells and fibres—as its primary fuel source. This study aims to evaluate the boiler's efficiency using both the direct and indirect methods. Operational data analyzed include fuel mass flow rate, steam pressure and temperature, and the calorific value of the fuel. The results show that the boiler efficiency ranges from 68,78% to 69,74% using the direct method, and between 67,73% and 67,88% using the indirect method. These values fall short of the vendor's specified target of 75%. The suboptimal efficiency is presumed to be caused by factors such as scale buildup due to improper blowdown procedures and poor feedwater quality resulting from malfunctioning filtration systems. These findings highlight the need for operational improvements to enhance the boiler's overall energy performance.

Keywords: Boiler Efficiency, Direct Method, Indirect Method, Palm Shell, Palm Fibre.

I. PENDAHULUAN

PT. X merupakan pabrik pengolah tandan buah segar (TBS) kelapa sawit menjadi minyak sawit mentah. Dalam prosesnya, pabrik ini mengandalkan unit boiler untuk menghasilkan uap (*steam*) sebagai sumber energi proses dan pembangkit listrik. Jenis boiler yang digunakan adalah *water tube boiler*, yang mampu beroperasi pada tekanan tinggi dan kapasitas besar. Keunggulan desainnya memungkinkan peningkatan kapasitas tanpa mengubah ukuran utama dan mendukung efisiensi produksi yang lebih baik. Untuk bahan bakar, PKS memanfaatkan limbah biomassa berupa cangkang dan serabut kelapa sawit, yang memiliki nilai kalor tinggi dan tersedia melimpah dari proses pengolahan TBS. Cangkang mengandung sekitar 3500–4100 kkal/kg dan serabut sekitar 2637–3998 kkal/kg, menjadikannya pilihan hemat biaya dan ramah lingkungan. (Siswanto, 2020)

Efisiensi boiler menjadi kunci dalam memastikan konversi energi panas ke uap berlangsung optimal. Efisiensi ini dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti kehilangan panas akibat gas buang dan

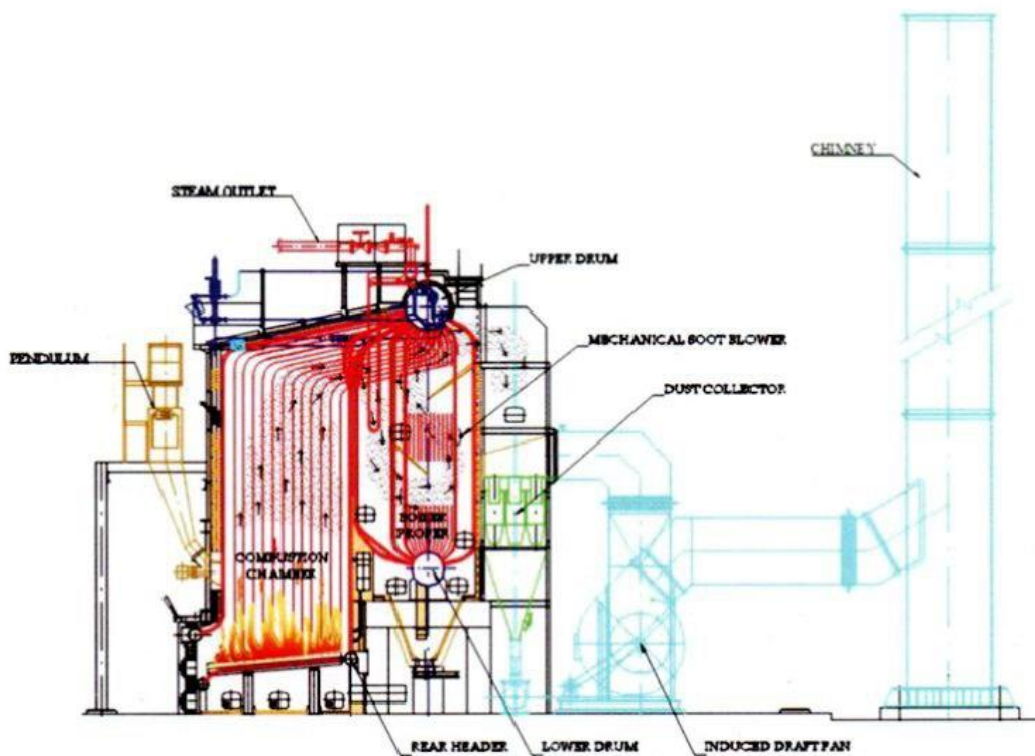
radiasi. Oleh karena itu, pemantauan dan pengukuran efisiensi sangat penting untuk evaluasi kinerja, mendeteksi penyimpangan, serta merencanakan perbaikan sistem. Studi ini bertujuan untuk mengetahui jumlah kalor yang dihasilkan dari pembakaran cangkang dan serabut, menghitung kebutuhan kalor untuk memproduksi *superheated steam* di unit boiler N-600 SA, serta menentukan nilai efisiensi boiler melalui metode langsung dan tidak langsung. (Rahimipetroudi et al., 2021)

PT. XYZ menggunakan boiler pipa air dengan bahan bakar utama berupa cangkang dan serabut kelapa sawit. Pemilihan bahan bakar ini didasarkan pada ketersediaannya yang melimpah sebagai hasil samping dari pengolahan kelapa sawit, sekaligus untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Dalam kaitannya dengan efisiensi energi, perhitungan efisiensi boiler menjadi hal yang krusial untuk mengetahui sejauh mana kinerja boiler dalam mentransfer panas guna menghasilkan uap sesuai kebutuhan. (Mulyani et al., 2023)

II. STUDI PUSTAKA

Water Tube Boiler

Water tube boiler atau boiler pipa air merupakan jenis boiler yang banyak digunakan di industri karena mampu menghasilkan uap dalam jumlah besar dan pada tekanan tinggi. Prinsip kerjanya melibatkan aliran air melalui pipa-pipa kecil, sementara gas panas hasil pembakaran mengalir di sekitarnya. Panas dari gas tersebut diserap oleh air dalam pipa hingga berubah menjadi uap. Keunggulan utama boiler ini terletak pada kemampuannya menahan tekanan lebih tinggi dibanding boiler pipa api, karena pipa-pipa kecilnya lebih kuat secara struktural. Boiler ini juga mampu menghasilkan uap jenuh maupun uap panas lanjut (*superheated steam*), yang sangat penting untuk proses industri bersuhu dan bertekanan tinggi, seperti pengoperasian turbin pembangkit listrik. Selain itu, desainnya yang menjaga cangkang dan *drum* dari paparan panas langsung membuatnya lebih tahan terhadap suhu tinggi dan memiliki umur pakai yang lebih panjang. (Mulyani et al., 2023)



Gambar 1.1. Konstruksi Komponen Boiler

Secara umum, *boiler* terdiri dari berbagai komponen utama, yaitu ruang pembakaran, *rear header*, *water tube*, *lower drum*, *upper drum*, *boiler proper*, *steam outlet*, *soot blower*, *dust collector*, *induced draft fan*, *forced draft fan*, *2nd forced draft fan*, cerobong asap, dan *pneumatic spreader*. Seluruh komponen ini saling terintegrasi untuk mendukung proses pembakaran bahan bakar dan pembentukan uap secara efisien dalam sistem *boiler*. (Hafis Ghifari et al., 2025)

Efisiensi Boiler

Efisiensi boiler merupakan ukuran kinerja yang dihitung berdasarkan perbandingan antara energi yang diserap oleh fluida di dalam boiler dengan energi yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar. Dalam sistem boiler, fluida yang digunakan umumnya adalah air, yang menerima panas melalui mekanisme perpindahan panas secara radiasi dan konveksi. Untuk menghitung efisiensi boiler jenis water tube, digunakan metode langsung, yaitu dengan mengukur secara langsung kinerja efisiensi dari boiler tersebut. (Pravitasari et al., 2017)

Metode langsung, dimana energi dari fluida kerja dibandingkan dengan kandungan energi dari bahan bakar boiler. Persamaan yang digunakan adalah:

$$\eta = \left(\frac{Q_{Serap}}{Q_{Lepas}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

atau,

$$\eta = \left(\frac{m_s \times (h_s - h_w)}{W_F \times HHV_{Fuel}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Persamaan ini dapat digunakan untuk menghitung efisiensi boiler dengan metode langsung, di mana m_s adalah laju alir uap yang dihasilkan (kg/s), h_s merupakan entalpi uap, dan h_w adalah entalpi air umpan (kJ/kg). Sementara itu, m_f adalah laju alir bahan bakar (kg/s) dan HHV merupakan nilai kalor atas (Higher Heating Value) dari bahan bakar (kJ/kg). Perhitungan ini mengasumsikan bahwa seluruh panas yang tersedia dari bahan bakar dapat dimanfaatkan, termasuk panas laten. (Nuraini et al., 2020)

Metode tidak langsung digunakan untuk menghitung efisiensi boiler tanpa mengukur langsung energi masuk dan keluar, melainkan dengan mengidentifikasi dan menghitung berbagai bentuk kehilangan energi dalam sistem. Efisiensi diperoleh dengan mengurangi total kehilangan dari nilai dasar 100%. Kehilangan energi ini dapat berasal dari gas buang, proses pembakaran, atau desain boiler, dan dapat bervariasi tergantung pada karakteristik dan kondisi operasional tiap boiler. (Musleh., 2024)

$$\eta = 100 - \Sigma \text{Energy Losses} \quad (3)$$

dimana $\Sigma \text{Energy Losses}$ adalah losses energi atau kerugian panas yang meliputi:

L.1. Kehilangan panas melalui gas buang kering

$$L_1 = \left(\frac{M_{FG} \times C_P \times (T_{FG} - T_A)}{HHV_{Fuel}} \right) \times 100\% \quad (4)$$

L.2. Kehilangan panas melalui hydrogen di bahan bakar

$$L_2 = \left(\frac{9 \times H_2 \times \{584 \times C_P \times (T_{FG} - T_A)\}}{HHV_{Fuel}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

L.3. Kehilangan panas melalui moisture yang berada pada bahan bakar

$$L_3 = \left(\frac{M \times \{584 \times C_P \times (T_{FG} - T_A)\}}{HHV_{Fuel}} \right) \times 100\% \quad (6)$$

L.4. Kehilangan panas melalui moisture yang berada pada udara

$$L_4 = \left(\frac{AAS \times Humidity \times C_P \times (T_{FG} - T_A)}{HHV_{Fuel}} \right) \times 100\% \quad (7)$$

L.5. Kehilangan panas melalui pembakaran tak sempurna

$$L_5 = \left(\frac{\%CO \times C}{\%CO + \%CO_2} \times \frac{5744}{HHV_{Fuel}} \right) \times 100\% \quad (8)$$

L.6. Kehilangan panas melalui radiasi dan konveksi

Kehilangan energi akibat radiasi dan konveksi umumnya kecil, berkisar antara 0,1% hingga 5%, tergantung desain boiler dan faktor lainnya. Karena nilainya rendah dan perhitungannya rumit, perhitungan secara langsung untuk kehilangan ini sering diabaikan dalam praktik industri. (Musleh, 2024)

III. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan pada riset ini menggunakan metode deskriptif dengan melakukan studi kasus di PT. XYZ. Metode ini digunakan untuk mengetahui dan melakukan analisis efisiensi boiler dengan metode langsung dan tidak langsung. Pengambilan data dilakukan pada bulan Maret 2025.

3.1 Alat dan Bahan

3.1.1 Alat dan Bahan di Lapangan

1. Alat

Alat yang digunakan adalah *boiler* dengan spesifikasi:

Tipe <i>Boiler</i>	: <i>Water Tube Boiler</i>
Kapasitas Uap	: 22 ton/jam
Tekanan Kerja	: 25 kg/cm ²
Tekanan Maksimal	: 29 kg/cm ²
Temperatur <i>Superheated Steam</i>	: 260 °C
Temperatur <i>Feed Water</i>	: 260 °C
Bahan Bakar	: Cangkang dan Serabut

2. Bahan

- Air umpan boiler dengan temperatur 95°C yang akan dipanaskan menjadi *superheated steam*
- Cangkang dan serabut yang meruoakan hasil samping dari proses pengolahan kelapa sawit dan digunakan sebagai bahan bakar boiler
- Udara pembakaran yang digunakan sebagai syarat terjadinya pembakaran

3.1.2 Metode Kerja

1. Metode Wawancara

Penelitian ini tidak lepas dari proses wawancara yang dilakukan kepada petugas boiler. Wawancara digunakan untuk mengumpulkan informasi – informasi yang tidak terdapat di studi literatur ataupun saat pengamatan langsung, seperti kebiasaan pada proses pengoperasian boiler.

2. Metode Studi Literatur

Studi literatur digunakan untuk mengumpulkan literatur yang memiliki kesamaan topik penelitian yang berguna sebagai referensi dari teori – teori yang digunakan. Studi literatur berguna sebagai pembanding dengan penelitian – penelitian terdahulu.

3. Metode Pengamatan Langsung

Pengamatan langsung merupakan metode yang dilakukan untuk mengumpulkan data – data berupa jumlah bahan bakar yang digunakan, steam yang diproduksi, temperature, tekanan, hingga blowdown. Metode pengamatan langsung dilakukan dengan mengunjungi lokasi boiler secara langsung.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Pengamatan

Tabel 4.1. Data Produksi Cangkang dan Serabut

NO	Efektivitas Olah	TBS Diolah	% Produksi Terhadap TBS		HHV	
	(jam)	(kg)	Serabut (%)	Cangkang (%)	Serabut (kkal/kg)	Cangkang (kkal/kg)
1	24	716832	13	7	2817	3840

Tabel 4.2. Data Analisa Unsur Cangkang dan Serabut

Unsur	Serabut	Cangkang
C	42,60%	50,40%
H2	5,20%	5,80%
N	1,12%	1,01%

O ₂	32,10%	34,20%
S	0,20%	0,10%
H ₂ O	37,20%	21,40%
Ash	5,70%	4,40%

Sumber: Angky et al., 2016

Tabel 4.3. Data Kondisi Operasional Boiler

No	Air Umpan Boiler		Superheated Steam			Gas Buang			Udara Ambient		
	Flow (kg/jam)	Suhu (°C)	Tekanan (kg/cm ²)	Suhu (°C)	Flow (kg/jam)	CO (%)	CO ₂ (%)	Suhu (°C)	Suhu (°C)	Relative Humidity (%)	Kelembapan (kg uap air/kg uap kering)
1	20800	95	22	256	20300	0,0301	14,45	237	32,1	76,7	0,0234

Tabel 4.4. Data Cangkang yang Ditampung Selama 1 Menit

No	Massa Goni Kosong (kg)	Massa Goni + Cangkang (kg)	Massa Cangkang (kg)
1	0,81	6,75	5,94
2	0,83	5,77	4,94
3	0,80	6,74	5,94

4.2 Perhitungan Penggunaan Bahan Bakar Boiler

4.2.1. Perhitungan Kapasitas Olah TBS

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas olah TBS} &= \frac{\text{TBS Diolah}}{\text{Jam Olah Efektif}} \\
 &= \frac{716832 \text{ kg}}{24 \text{ jam}} \\
 &= 29868 \text{ kg/jam}
 \end{aligned}$$

4.2.2. Perhitungan Cangkang dan Serabut Diproduksi

$$\begin{aligned}
 1. \text{ Cangkang Produksi} &= \text{Kapasitas olah TBS} \times 7\% \\
 &= 29868 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 7\% \\
 &= 2090,7 \text{ kg/jam} \\
 2. \text{ Serabut Produksi} &= \text{Kapasitas olah TBS} \times 13\% \\
 &= 29868 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 13\% \\
 &= 3882,8 \text{ kg/jam}
 \end{aligned}$$

4.2.3. Perhitungan Cangkang yang digunakan

Cangkang tidak akan digunakan seluruhnya sebab cangkang memiliki nilai jual lebih. Cangkang yang digunakan (W_c) berasal dari mengurangi cangkang yang diproduksi dengan cangkang yang disimpan. Serabut yang digunakan (W_F) adalah seluruh serabut yang diproduksi. Jumlah

Cangkang yang disimpan (C_E) didapat dengan menimbang cangkang menggunakan goni selama 1 menit.

$$1. \quad C_E = \text{Massa Cangkang} \times 60 \text{ menit}$$

$$= 5,94 \frac{\text{kg}}{\text{menit}} \times 60 \text{ menit}$$

$$= 356,4 \text{ kg/jam}$$

$$2. \quad W_c = \text{Cangkang produksi} - C_E$$

$$= 2090,7 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} - 356,4 \frac{\text{kg}}{\text{jam}}$$

$$= 1734,3 \text{ kg/jam}$$

4.2.4. Perhitungan Rasio Bahan Bakar Boiler

$$1. \quad \text{Total Bahan Bakar} = W_C + W_F$$

$$= 1734,3 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} + 3882,8 \frac{\text{kg}}{\text{jam}}$$

$$= 5617,2 \text{ kg/jam}$$

$$2. \quad \text{Rasio Cangkang} = \frac{W_C}{\text{Total Bahan Bakar}} \times 100\%$$

$$= \frac{1734,3 \text{ kg/jam}}{5617,2 \text{ kg/jam}} \times 100\%$$

$$= 30,8\%$$

$$3. \quad \text{Rasio Serabut} = 100\% - \text{Rasio Cangkang}$$

$$= 100\% - 30,8\%$$

$$= 69,2\%$$

4.3 Perhitungan Efisiensi Boiler dengan Metode Langsung

4.3.1. Perhitungan Q Serap

Q Serap dihitung menggunakan rumus $Q_S = M_v \times (H_S - H_w)$

1. Menghitung *Enthalpy Superheated steam* 256°C (H_s)

Enthalpy steam dihitung menggunakan rumus interpolasi sebagai berikut (data interpolasi dapat dilihat di lampiran):

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}$$

$$\frac{256 - 250}{300 - 250} = \frac{y - 2902}{3025 - 2902}$$

$$0,12 \times 123 = y - 2902$$

$$y = 2916 \text{ kj/kg}$$

$$y = 2916 \frac{\text{kj}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ kkal}}{4,184 \text{ kj}}$$

$$y = 697,1224 \text{ kkal/kg}$$

2. Menghitung *Enthalpy* Air Umpan 95°C (H_w)

Enthalpy air umpan dihitung menggunakan rumus interpolasi sebagai berikut (data interpolasi dapat dilihat di lampiran):

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}$$

$$\frac{95 - 94}{96 - 94} = \frac{y - 393,8}{402,2 - 393,8}$$

$$0,5 \times 8,4 = y - 393,8$$

$$y = 398 \text{ kj/kg}$$

$$y = 3398 \frac{\text{kj}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ kkal}}{4,184 \text{ kj}}$$

$$y = 95,1242 \text{ kkal/kg}$$

3. Menghitung Q Serap

$$Q_s = M_v \times (H_s - H_w)$$

$$Q_s = 20300 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times (697,1224 \frac{\text{kkal}}{\text{kg}} - 95,1242 \frac{\text{kkal}}{\text{kg}})$$

$$Q_s = 12220563,46 \text{ kkal/jam}$$

4.3.2. Perhitungan Q Lepas

Q Lepas dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Q_L = (W_F \times HHV_F) + (W_C \times HHV_C)$$

$$Q_L = \left(3882,8 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 2817 \frac{\text{kkal}}{\text{kg}} \right) + \left(1703,7 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 3840 \frac{\text{kkal}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q_L = 17597902,6 \text{ kkal/jam}$$

4.3.3. Perhitungan Efisiensi *Boiler* dengan Metode Langsung

Efisiensi *boiler* dengan metode langsung dihitung dengan membandingkan kalor yang diserap (Q_s) oleh *boiler* dengan kalor yang dilepas (Q_L) oleh bahan bakar, maka:

$$\eta = \left(\frac{Q_s}{Q_L} \right) \times 100\%$$

$$\eta = \left(\frac{12220563,46 \frac{\text{kkal}}{\text{jam}}}{17597902,6 \frac{\text{kkal}}{\text{jam}}} \right) \times 100\%$$

$$\eta = 69,44\%$$

4.4 Perhitungan Efisiensi Boiler dengan Metode Tidak Langsung

4.4.1. Perhitungan Massa Udara yang Disupply (AAS)

1. Menghitung Udara Teoritis (UT)

$$UT = (11,6 \times C) + \left\{ 34,8 \times \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) \right\} + (4,35 \times S)$$

$$UT = (11,6 \times 45\%) + \left\{ 34,8 \times \left(5,38\% - \frac{37,75\%}{8} \right) \right\} + (4,35 \times 0,17\%)$$

$$UT = 5,67 \frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}}$$

2. Menghitung %CO₂ Teoritis ((CO₂)_T)

$$\text{Mol } N_2 = \frac{W N_2 \text{ di udara}}{Mr N_2} + \frac{W N_2 \text{ di bahan bakar}}{Mr N_2}$$

$$= \frac{5,67 \times 77\%}{28} + \frac{0,0109}{28}$$

$$= 0,1565$$

$$\text{Mol } C = \frac{C \text{ dalam bahan bakar}}{Mr C}$$

$$= \frac{0,45}{12}$$

$$= 0,0375$$

$$(\%CO_2)_T = \left(\frac{\text{Mol } C}{\text{Mol } N_2 - \text{Mol } C} \right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{0,0375}{0,1565 - 0,0375} \right) \times 100\%$$

$$= 19,33\%$$

3. Menghitung Udara Berlebih (EA)

$$EA = \frac{7900 \times [(CO_2)_T - (CO_2)_A]}{(CO_2)_A \times [100 - (CO_2)_T]}$$

$$= \frac{7900 \times (19,33 - 14,45)}{14,45 \times (100 - 19,33)}$$

$$= 33,07 \%$$

4. Menghitung Massa Udara Disupply (AAS)

$$\begin{aligned}
AAS &= \left(1 + \frac{EA}{100}\right) \times UT \\
&= \left(1 + \frac{33,07}{100}\right) \times 5,67 \\
&= 7,55 \frac{kg \text{ udara}}{kg \text{ bahan bakar}}
\end{aligned}$$

4.4.2. Perhitungan *Heat loss* Akibat Gas Buang Kering (L₁)

1. Menghitung Massa Gas Buang

$$\begin{aligned}
M_{FG} &= MCO_2 + M N_2 \text{ Fuel} + M N_2 \text{ Air} + M O_2 \\
&= \frac{0,45 \times 44}{12} + 0,0109 + \frac{8,3841 \times 77\%}{100} + \frac{(8,3841 - 5,677) \times 23}{100} \\
&= 7,90 \frac{kg}{kg \text{ bb}}
\end{aligned}$$

2. Menghitung L₁

$$\begin{aligned}
L_1 &= \left(\frac{M_{FG} \times C_P \times (T_{FG} - T_A)}{HHV_{Fuel}} \right) \times 100\% \\
&= \left(\frac{7,90 \times 0,23 \times (237 - 32,1)}{3123,8} \right) \times 100\% \\
&= 11,93\%
\end{aligned}$$

4.4.3. Perhitungan *Heat loss* Akibat H₂ Pada Bahan Bakar (L₂)

$$\begin{aligned}
L_2 &= \left(\frac{9 \times H_2 \times \{584 \times C_{PS} \times (T_{FG} - T_A)\}}{HHV_{Fuel}} \right) \times 100\% \\
&= \left(\frac{9 \times 0,0538 \times \{584 \times 0,45 \times (237 - 32,1)\}}{3123,8} \right) \times 100\% \\
&= 10,49\%
\end{aligned}$$

4.4.4. Perhitungan *Heat loss* Akibat Air pada Bahan Bakar (L₃)

$$\begin{aligned}
L_3 &= \left(\frac{M \times \{584 \times C_{PS} \times (T_{FG} - T_A)\}}{HHV_{Fuel}} \right) \times 100\% \\
&= \left(\frac{0,3233 \times \{584 \times 0,45 \times (237 - 32,1)\}}{3123,8} \right) \times 100\% \\
&= 6,9\%
\end{aligned}$$

4.4.5. Perhitungan *Heat loss* Akibat Air pada Udara (L₄)

$$\begin{aligned}
L_4 &= \left(\frac{AAS \times Humidity \times C_{PS} \times (T_{FG} - T_A)}{HHV_{Fuel}} \right) \times 100\% \\
&= \left(\frac{8,3841 \times 0,02 \times 0,45 \times (237 - 32,1)}{3123,8} \right) \times 100\% \\
&= 0,52\%
\end{aligned}$$

4.4.6. Perhitungan *Heat loss* Akibat Pembakaran Tidak Sempurna (L_5)

$$L_5 = \left(\frac{\%CO \times C}{\%CO + \%CO_2} \times \frac{5744}{HHV_{Fuel}} \right) \times 100\%$$
$$= \left(\frac{0,0301 \times 0,45}{0,0301 + 14,45} \times \frac{5744}{3123,8} \right) \times 100\%$$
$$= 0,17\%$$

4.4.7. *Heat loss* Akibat Radiasi dan Konveksi (L_6)

L_6 merupakan kehilangan panas yang diakibatkan oleh radiasi dan konveksi yang terjadi pada boiler. Berdasarkan data dari vendor konstruksi boiler dan penelitian yang dilakukan oleh (Sinha et al., 2015), L_6 pada water tube boiler adalah 2% - 3%. Maka diasumsikan bahwa L_6 adalah 2%.

4.4.8. Perhitungan Efisiensi Boiler dengan Metode Tidak Langsung

$$\eta = 100\% - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6)$$

$$\eta = 100\% - (11,93\% + 10,49\% + 6,9\% + 0,52\% + 0,17\% + 2\%)$$

$$\eta = 67,88\%$$

V. SIMPULAN

Berdasarkan rumusan masalah dan hasil dari pengolahan data, maka dapat di ambil kesimpulan sebagai berikut: Dengan mengakumulasi Nilai Panas yang diserap, Panas yang dilepas, dan *Heat Loss* maka kita dapat menghitung efisiensi boiler dengan metode langsung adalah 68,78% dan nilai efisiensi boiler dengan metode tidak langsung adalah 67,73%.

DAFTAR PUSTAKA

- Angky, P. dan N. I. Supardi, dan A. Suandi. (2016). Analysis Of Fuel Heating Value of Fibers and Shell Palm Oil (Elaeis Guineensis Jacq) on Fire Tube Boiler "Takuma Brands". Jurnal Teknosia Vol.1, No.16, Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Bengkulu.
- Hafis Ghifari, R., Nur, M., & Isnaini Hadiyul Umam, M. (2025). *Performance Efficiency Analysis of Water tube boiler Machine Using Input-Output Method and Failure Mode Effect and Analysis*. Jurnal Perangkat Lunak, 7(1), 32-44
- Mulyani, Y., Dhamayanthie, I., Irfan Hilmi, M., & Teknologi Petroleum Balongan, I. (2023). The Efficiency of Water tube boiler Performance Using Direct Method on the Utility Unit. *Riwayat: Educational Journal of History and Humanities*, 6(4), 3232–3238. <https://doi.org/10.24815/jr.v6i4.36824>
- Musleh, O. (2024). *Analysis of energy losses in a steam boiler system*. UMEA University
- Nuraini, A. A., Salmi, S., & Aziz, H. A. (2020). Efficiency and Boiler Parameters Effects in Sub-critical Boiler with Different Types of Sub-bituminous Coal. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Mechanical Engineering*, 44(1), 247–256. <https://doi.org/10.1007/s40997-018-0249-7>
- Rahimipetroudi, I., Rashid, K., Yang, J. B., & Dong, S. K. (2021). Development of environment-friendly dual fuel pulverized coal-natural gas combustion technology for the co-firing power plant boiler: Experimental and numerical analysis. *Energy*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120550>
- Reklaitis, G. V. (1942). *Introduction to Material and Energy Balance*.
- Rohsenow, W. M. ., Hartnett, J. P. ., & Cho, Y. I. . (1998). *Handbook of heat transfer* Warren M. Rohsenow, editor ; J.P. Hartnett, editor ; Young I. Cho, editor. McGraw-Hill.
- Siswanto, J. E. (2020). Analisis Limbah Kelapa Sawit Sebagai Bahan Bakar Boiler dengan Menggunakan Variasi Campuran Antara Fiber dan Cangkang Buah Sawit. *Journal of Electrical Power Control and Automation (JEPCA)*, 3(1), 22. <https://doi.org/10.33087/iepc.v3i1.35>
- Yolanda, P. (2017). Analisa Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Langsung. ISSN 2337-8204. Jurnal Online Fakultas MIPA Universitas Tanjung Pura, (1), 09 12.