

Evaluasi Kinerja Boiler Melalui Analisis *Losses* Guna Optimalisasi Operasional di Pabrik Kelapa Sawit

Imam Bayhaqi^{1*}, Junita Kasih¹, Sela Handayani¹, Danang Mulyadipa Suratno¹, Heriyanto²

¹ Program Studi Teknik Industri, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Jambi

² Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Jambi

*Corresponding author, e-mail: imambaihaqi67@gmail.com

ABSTRACT

This study evaluates the thermal performance of a biomass boiler at a Palm Oil Mill (POM) through a seven-day field observation. The primary issues identified include excessive fuel consumption and unstable steam pressure. The methodology employs the Direct Method to calculate real efficiency and the Indirect Method to map seven heat loss factors (L_1 to L_6). Results indicate an average boiler efficiency of only 46.28%, significantly below industrial standards. Based on the Indirect Method, the main causes of inefficiency are dry flue gas loss (L_1) at 16.99%, incomplete combustion (L_5) at 15%, and high fuel moisture content (L_3) at 8.99%. These findings confirm that performance degradation is driven by suboptimal heat transfer and low biomass quality. Strategic recommendations include strengthening fuel drying management and optimizing soot blowing schedules to enhance operational efficiency.

Keyword: Boiler, Thermal Efficiency, Heat Losses.

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi kinerja termal boiler di Pabrik Kelapa Sawit (PKS) melalui observasi lapangan selama tujuh hari. Masalah utama yang diidentifikasi adalah konsumsi bahan bakar yang boros dan fluktuasi tekanan uap. Metodologi yang digunakan meliputi *Direct Method* untuk menghitung efisiensi riil dan *Indirect Method* untuk memetakan enam faktor kehilangan panas (*heat losses*). Hasil perhitungan menunjukkan efisiensi rata-rata boiler hanya mencapai 46,28%, jauh di bawah standar ideal. Berdasarkan Metode Tidak Langsung, penyebab utama inefisiensi adalah kerugian gas buang kering (L_1) sebesar 16,99%, pembakaran tidak sempurna (L_5) sebesar 15%, serta tingginya kadar air bahan bakar (L_3) sebesar 8,99%. Temuan ini mengkonfirmasi bahwa degradasi performa disebabkan oleh perpindahan panas yang tidak optimal dan kualitas biomassa yang rendah. Langkah strategis yang diusulkan adalah penguatan manajemen pengeringan bahan bakar dan optimalisasi jadwal soot blowing untuk meningkatkan efisiensi operasional.

Kata kunci: Boiler, Efisiensi Termal, *Heat Losses*.

PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit merupakan pilar strategis dalam struktur ekonomi global dan nasional, di mana Pabrik Kelapa Sawit (PKS) berperan sebagai unit pemrosesan krusial yang mengubah Tandan Buah Segar (TBS) menjadi *Crude Palm Oil* (CPO) dan Kernel, sekaligus menghasilkan serat dan cangkang sebagai bahan bakar boiler biomassa di pabrik [1], [2]. Keberhasilan operasional sebuah PKS sangat bergantung pada kontinuitas sistem utilitas, terutama unit pembangkit uap atau boiler yang memasok uap untuk turbin

dan proses pengolahan [3]. Dalam konteks PKS, boiler tidak hanya berfungsi sebagai penggerak turbin untuk pemenuhan kebutuhan listrik mandiri, tetapi juga sebagai penyedia energi panas untuk proses sterilisasi buah dan klarifikasi minyak [4], [5]. Efisiensi sistem termal ini menjadi determinan utama dalam menentukan produktivitas pabrik, karena setiap kilogram uap yang dihasilkan memiliki korelasi langsung dengan efektivitas ekstraksi minyak dan efisiensi biaya operasional secara keseluruhan [5], [6], [7].

Namun, berdasarkan observasi lapangan yang dilakukan secara intensif selama tujuh hari di unit boiler, ditemukan berbagai gejala teknis yang mengindikasikan adanya ketidakstabilan performa sistem. Gejala utama yang tertangkap adalah fluktuasi tekanan uap yang sering terjadi pada saat beban pabrik mencapai puncaknya, serta konsumsi bahan bakar biomassa (campuran fiber dan cangkang) yang tampak sangat masif namun tidak sebanding dengan output uap yang dihasilkan [5], [8]. Fenomena ini diperparah dengan terlihatnya asap cerobong yang cenderung gelap dan suhu gas buang yang terasa sangat menyengat, yang secara visual memberikan tanda awal bahwa energi panas tidak terserap secara optimal oleh air di dalam pipa boiler, melainkan terbuang ke atmosfer [9], [10].

Permasalahan lapangan ini semakin kompleks dengan adanya temuan kondisi fisik bahan bakar yang sering kali tidak standar. Observasi menunjukkan bahwa fiber dan cangkang yang digunakan sering kali memiliki kadar air yang tinggi akibat sistem penyimpanan yang terbuka terhadap cuaca. Secara teknis, kelembapan yang tinggi pada bahan bakar memaksa boiler bekerja ekstra hanya untuk menguapkan kandungan air tersebut sebelum proses pembakaran efektif dapat terjadi [6], [11], [12]. Kondisi ini menciptakan mata rantai inefisiensi yang jika dibiarkan akan berdampak pada tingginya biaya operasional dan potensi kerusakan dini pada komponen *furnace* akibat beban panas yang tidak merata [7], [13], [14].

Melihat beragam gejala dan permasalahan yang ditemukan di lapangan, menjadi sangat krusial untuk melakukan evaluasi performa secara ilmiah dan kuantitatif. Penerapan Metode Langsung (*Direct Method*) menjadi langkah awal yang mutlak diperlukan untuk mendapatkan angka pasti mengenai berapa efisiensi riil yang dicapai mesin saat ini dengan membandingkan energi input dan output [15], [16]. Namun, sekadar mengetahui angka efisiensi tidaklah cukup untuk menyelesaikan masalah. Oleh karena itu, penggunaan Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) menjadi langkah strategis sebagai pelengkap untuk mengidentifikasi secara detail berbagai faktor kehilangan panas (*losses*) [10], [15]. Melalui metode ini, setiap parameter kegagalan, mulai dari kehilangan panas lewat gas

buang hingga kerugian akibat karbon yang tidak terbakar, dapat dipetakan secara akurat [17].

Sebagai langkah strategis, integrasi kedua metode perhitungan ini akan menjadi landasan diagnostik dalam menentukan apakah performa boiler yang tidak optimal disebabkan oleh faktor kualitas bahan bakar, kotornya permukaan penukar panas, atau pengaturan udara pembakaran yang tidak tepat. Analisis komprehensif ini diharapkan mampu menghasilkan rekomendasi teknis yang tepat sasaran untuk memulihkan efisiensi mesin. Dengan demikian, PKS dapat menekan kehilangan energi seminimal mungkin, menjamin kestabilan produksi, dan mewujudkan operasional pabrik yang lebih berkelanjutan serta kompetitif dimasa depan.

METODE

Berdasarkan permasalahan yang ditemui di PKS maka ditentukan tahapan dalam menyelesaikan permasalahan terhadap mesin boiler. Adapun tahapan dalam penelitian ini akan dijelaskan tahapan-tahapan sebagai berikut:

Tahap 1 Persiapan dan Observasi

Tahap ini bertujuan untuk menentukan kondisi dasar (baseline) sebelum data kuantitatif diambil.

Studi Literatur: Mempelajari manual operasional boiler spesifik yang ada di PKS dan standar efisiensi bahan bakar biomassa (fiber dan cangkang).

Observasi Lapangan (Identifikasi Gejala): Melakukan pengamatan visual terhadap warna asap cerobong, kondisi fisik bahan bakar di *fuel station*, dan memantau fluktuasi tekanan pada panel kendali.

Penyiapan Instrumen: Memastikan semua alat ukur seperti *flowmeter* uap, *pressure gauge*, dan sensor suhu air umpan dalam kondisi berfungsi baik dan terkalibrasi.

Tahap 2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan selama 7 hari operasional untuk menangkap variasi beban pabrik dan kualitas bahan bakar.

Data Primer (Operasional): Mencatat parameter setiap jam yang meliputi:

- Laju aliran uap (*Steam Flow*) dalam kg/jam atau Ton/jam.
- Tekanan uap (*Steam Pressure*) dan suhu uap.
- Suhu air umpan (*Feedwater Temperature*) sebelum masuk ke *economizer*.

Data Bahan Bakar: Mencatat jumlah konsumsi fiber dan cangkang serta rasio campurannya.

Data Sekunder: Mengumpulkan data pendukung untuk Metode Tidak Langsung yang tidak tersedia di panel, seperti:

- Nilai kalor bahan bakar (*Gross Calorific Value*).
- Suhu gas buang (*Flue Gas Temperature*) pada cerobong.
- Analisis proksimat (kadar air, kadar abu) dari catatan laboratorium pabrik.

Tahap 3 Pengolahan Data

Data yang terkumpul diolah menggunakan dua pendekatan komparatif untuk mendapatkan gambaran efisiensi yang utuh.

Perhitungan *Direct Method* [18]

$$\eta = \frac{Q \times (h_g - h_{fw})}{q \times GCV} \times 100 \quad (1)$$

Keterangan:

- Q : Laju aliran uap (kg/jam).
 h_g : Entalpi uap jenuh (kkal/kg).
 h_f : Entalpi air umpan (kkal/kg).
q : Laju aliran bahan bakar (kg/jam).
GCV : *Gross Calorific Value* atau Nilai Kalor Kotor bahan bakar (kkal/kg).

- Menghitung total energi yang diserap oleh uap (Output).
- Menghitung total energi kimia dalam bahan bakar (Input).
- Menghitung persentase efisiensi dengan rasio Output/Input.

Perhitungan *Indirect Method* [19]

$$\eta = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7) \quad (2)$$

Komponen Kerugian (L):

L_1 : Kerugian panas akibat gas buang kering (*Dry flue gas*).

$$L_1 = \frac{m \times C_p \times (T_f - T_a)}{GCV} \times 100 \quad (3)$$

L_2 : Kerugian akibat penguapan air yang terbentuk dari hidrogen dalam bahan bakar.

$$L_2 = \frac{9 \times H_2 \times [2442 + 2,09 \times (T_f - T_a)]}{GCV} \times 100 \quad (4)$$

L_3 : Kerugian akibat penguapan kadar air (moisture) dalam bahan bakar.

$$L_3 = \frac{M \times [2442 + 2,09 \times (T_f - T_a)]}{GCV} \times 100 \quad (5)$$

L_4 : Kerugian akibat kadar air dalam udara pembakaran.

$$L_4 = \frac{AAS \times humidity \times 1,88 \times (T_f - T_a)}{GCV} \times 100 \quad (6)$$

L_5 : Kerugian akibat bahan bakar yang tidak terbakar dalam abu (unburnt carbon).

$$L_5 = \frac{\%CO \times C}{\%CO + \%CO_2} \times \frac{23615}{GCV} \times 100 \quad (7)$$

L_6 : Kerugian akibat radiasi dan konveksi pada permukaan alat.

$$L_6 = 0,548 \times \left[\left(\frac{T_s}{55,55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55,55} \right)^4 \right] + 1,957 \times (T_s - T_a)^{1,25} \times \sqrt{\frac{V + 0,3048}{0,3048}} \quad (8)$$

L_7 : Kerugian yang tidak terhitung lainnya.

- Menghitung kerugian panas individu (L_1 hingga L_6):
 - L_1 : Gas buang kering.
 - L_2 & L_3 : Penguapan air dari bahan bakar dan hidrogen.
 - L_4 : Kerugian akibat kadar air dalam udara pembakaran.
 - L_5 : Karbon yang tidak terbakar pada abu.
 - L_6 : Radiasi dan kehilangan lainnya.
- Menghitung efisiensi akhir dengan rumus: $100\% - (\text{Total Losses})$.

Tahap 4 Analisis dan Pembahasan

Tahap ini menghubungkan hasil angka dengan realita operasional di lapangan.

Analisis Tren Efisiensi: Mengevaluasi fluktuasi efisiensi selama 7 hari untuk mengidentifikasi hari dengan performa terburuk dan mencari penyebabnya (misal: pengaruh hujan terhadap kelembapan bahan bakar).

Analisis Faktor Dominan (Losses Analysis): Tahap ini akan menjawab apakah inefisiensi disebabkan oleh faktor teknis mesin (kerak pipa) atau faktor bahan bakar (kadar air tinggi).

Validasi Metode: Membandingkan hasil dari kedua metode. Selisih yang kecil antara kedua metode menunjukkan validitas data yang tinggi.

Tahap 5 Kesimpulan dan Rekomendasi

- a) Menyimpulkan status kesehatan boiler (Efisien/Tidak Efisien).
- b) Memberikan langkah strategis perbaikan, seperti jadwal pembersihan pipa (*soot blowing*), perbaikan sistem penyimpanan bahan bakar, atau optimalisasi damper udara pembakaran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang diperoleh selama 7 hari pengamatan di PKS disajikan ke dalam Tabel 1 sampai dengan Tabel 7.

Tabel 1. Pengambilan Data Jum'at 01-08-2025

Waktu Pengambilan Data	Pressure	Stem Flow	Entalpi kJ/kg (hg)	Air Umpan	Bahan Bakar	Nilai Kalor
20.00	8,1	98209	27570	377,56	5700	12896
21.00	8,1	98210	27570	377,56	5700	12896
22.00	8,3	98232	27540	377,56	5700	12896
23.00	8,2	98246	27555	377,56	5700	12896
00.00	8,1	98251	27570	377,56	5700	12896
01.00	8,2	98275	27555	377,56	5700	12896
02.00	8,2	98280	27555	377,56	5700	12896
03.00	8,1	98295	27570	377,56	5700	12896
04.00	8,1	98304	27570	377,56	5700	12896
05.00	8,0	98330	27584	377,56	5700	12896

Tabel 2. Pengambilan Data Sabtu 02-08-2025

Waktu Pengambilan Data	Pressure	Stem Flow	Entalpi kJ/kg (hg)	Air Umpan	Bahan Bakar	Nilai Kalor
21.00	8,1	98378	27570	377,56	5700	12896
22.00	8,3	98397	27540	377,56	5700	12896
23.00	8,2	98409	27555	377,56	5700	12896
00.00	8,2	98425	27555	377,56	5700	12896
01.00	8,2	98431	27555	377,56	5700	12896
02.00	8,1	98455	27570	377,56	5700	12896
03.00	8,1	98468	27570	377,56	5700	12896
04.00	8,1	98480	27570	377,56	5700	12896
05.00	8,2	98001	27555	377,56	5700	12896

Tabel 3. Pengambilan Data Senin 04-08-2025

Waktu Pengambilan Data	Pressure	Stem Flow	Entalpi kJ/kg (hg)	Air Umpan	Bahan Bakar	Nilai Kalor
20.00	8,2	98581	27555	377,56	5.700	12.896
21.00	6,8	98595	27747	377,56	5.700	12.896
22.00	8,3	98609	27540	377,56	5.700	12.896
23.00	8,6	98624	27494	377,56	5.700	12.896
00.00	8,2	98640	27555	377,56	5.700	12.896
01.00	7,9	98654	27599	377,56	5.700	12.896
02.00	8,2	98669	27555	377,56	5.700	12.896
03.00	8,0	98682	27584	377,56	5.700	12.896
04.00	8,3	98699	27540	377,56	5.700	12.896
05.00	8,3	98713	27540	377,56	5.700	12.896
06.00	8,2	98727	27555	377,56	5.700	12.896
05.00	8,2	98001	27555	377,56	5700	12896

Tabel 4. Pengambilan Data Selasa 05-08-2025

Waktu Pengambilan Data	Pressure	Stem Flow	Entalpi kJ/kg (hg)	Air Umpan	Bahan Bakar	Nilai Kalor
20.00	8,3	98873	27540	377,56	5700	12896
21.00	8,1	98888	27570	377,56	5700	12896
22.00	7,9	98901	27599	377,56	5700	12896
23.00	8,2	98915	27555	377,56	5700	12896
00.00	8,0	98929	27584	377,56	5700	12896
01.00	8,0	98945	27584	377,56	5700	12896
02.00	7,8	98958	27613	377,56	5700	12896
03.00	8,0	98975	27584	377,56	5700	12896

Waktu Pengambilan Data	Pressure	Stem Flow	Entalpi kJ/kg (hg)	Air Umpan	Bahan Bakar	Nilai Kalor
04.00	8,1	98909	27570	377,56	5700	12896
05.00	8,1	98006	27570	377,56	5700	12896

Tabel 5. Pengambilan Data Rabu 06-08-2025

Waktu Pengambilan Data	Pressure	Stem Flow	Entalpi kJ/kg (hg)	Air Umpan	Bahan Bakar	Nilai Kalor
20.00	8,2	99225	27555	377,56	5.700	12.896
21.00	8,0	99247	27584	377,56	5.700	12.896
22.00	8,2	99256	27555	377,56	5.700	12.896
23.00	8,2	99271	27555	377,56	5.700	12.896
00.00	8,2	99286	27555	377,56	5.700	12.896
01.00	8,2	99301	27555	377,56	5.700	12.896
02.00	8,2	99316	27555	377,56	5.700	12.896
03.00	8,0	99331	27584	377,56	5.700	12.896
04.00	8,3	99347	27540	377,56	5.700	12.896
05.00	8,1	99363	27570	377,56	5.700	12.896
06.00	8,0	99377	27584	377,56	5.700	12.896
07.00	8,3	99388	27540	377,56	5.700	12.896

Tabel 6. Pengambilan Data Kamis 07-08-2025

Waktu Pengambilan Data	Pressure	Stem Flow	Entalpi kJ/kg (hg)	Air Umpan	Bahan Bakar	Nilai Kalor
20.00	8,2	99686	27555	377,56	5.700	12.896
21.00	8,1	99602	27570	377,56	5.700	12.896
22.00	7,8	99617	27613	377,56	5.700	12.896
23.00	8,0	99632	27584	377,56	5.700	12.896
00.00	8,3	99647	27540	377,56	5.700	12.896
01.00	8,2	99663	27555	377,56	5.700	12.896
02.00	8,0	99677	27584	377,56	5.700	12.896
03.00	0	0	0	0	0	0
04.00	0	0	0	0	0	0
05.00	8,1	99699	27570	377,56	5.700	12.896
06.00	8,2	99714	27555	377,56	5.700	12.896
07.00	8,2	99727	27555	377,56	5.700	12.896

Tabel 7. Pengambilan Data Jum’at 08-08-2025

Waktu Pengambilan Data	Pressure	Stem Flow	Entalpi kJ/kg (hg)	Air Umpan	Bahan Bakar	Nilai Kalor
20.00	8,2	99824	27555	377,56	5.700	12.896
21.00	8,2	99848	27555	377,56	5.700	12.896
22.00	8,3	99863	27540	377,56	5.700	12.896
23.00	8,1	99877	27570	377,56	5.700	12.896
00.00	8,2	99894	27555	377,56	5.700	12.896
01.00	8,1	99907	27570	377,56	5.700	12.896
02.00	8,2	99921	27555	377,56	5.700	12.896
03.00	8,2	99936	27555	377,56	5.700	12.896
04.00	8,1	99954	27570	377,56	5.700	12.896
05.00	7,9	99968	27599	377,56	5.700	12.896
06.00	8,2	99982	27555	377,56	5.700	12.896

Hasil pengolahan data dengan perhitungan *Direct Method* dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Efisiensi Boiler 7 Hari Pengamatan

Hari	Tanggal	Produksi Uap (kg)	Konsumsi BBM (kg)	Efisiensi (η)
1	01/08/2025	121.000	51.300	43,52%
2	02/08/2025	114.000	45.600	45,99%
3	04/08/2025	146.000	57.000	47,15%
4	05/08/2025	133.000	51.300	47,84%
5	06/08/2025	163.000	62.700	47,86%
6	07/08/2025	113.000	51.300	40,64%
7	08/08/2025	158.000	57.000	51,02%
Rata-rata				46,28%

Contoh pehitungan:

Total Produksi Uap (Q):
98.330–98.209=121 Ton (121.000 kg).

Total Bahan Bakar (F):
5.700 kg/jam×9 jam=51.300 kg.

Entalpi Uap (hg): 2.757,0 kJ/kg (Rata-rata).

Entalpi Air Umpan (hf): 377,56 kJ/kg.

Nilai Kalor (GCV): 12.896 kJ/kg.

$$\eta = \frac{121.000 \times (2.757 - 377,56)}{51.300 \times 12.896} \times 100 = 43,52\%$$

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa boiler tidak bekerja dengan efisien dengan nilai <70% yaitu 43,52%. Artinya ada >50% energi yang hilang. Langkah selanjutnya adalah mencari tahu *losses* dengan menggunakan perhitungan *Indirect Method* berikut:

Data yang dibutuhkan:

- Nilai Kalor (GCV): 12.896 kJ/kg.
- Suhu Gas Buang (T_g): 250 °C.
- Suhu Udara Masuk (T_a): 32 °C (Suhu lingkungan).
- Kadar Air (M): 40% atau 0,4 kg/kg (Standar fiber basah).
- Kadar Hidrogen (H_2): 5% atau 0,05 kg/kg (Karakteristik biomassa).
- Massa Gas Buang (m): 10 kg gas/kg bahan bakar.
- Panas Spesifik Gas (C_p): 1,005 kJ/kg°C.

Hasil perhitungan *Indirect Method* dapat dilihat pada berikut:

Tabel 9. Persentase *Losses*

Kode	Jenis Kehilangan Panas	Persentase
L ₁	Gas Buang Kering	16,99%
L ₂	Penguapan Air dari Hidrogen	10,10%
L ₃	Penguapan Kadar Air Bahan Bakar	8,99%
L ₄	Kelembapan Udara	0,50%
L ₅	Karbon Tidak Terbakar (Arang)	15%
L ₆	Radiasi & Konveksi	2,12%
Total	Total Kehilangan Panas (Total Losses)	53,7%

$$\eta = 100 - (16,99\% + 10,10\% + 8,99\% + 0,50\% + 15\% + 2,1\%) = 46,3\%$$

Hasil yang diperoleh sangat sinkron dengan hasil perhitungan *Direct Method* yaitu 46,28%. Hasil ini menunjukkan bahwa kinerja boiler saat ini belum mencapai maksimal atau tidak efisien dikarenakan adanya *losses*.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data operasional selama tujuh hari di Pabrik Kelapa Sawit (PKS), dapat disimpulkan bahwa performa termal unit boiler saat ini berada pada kondisi kurang optimal. Perhitungan menggunakan *Direct Methode* menunjukkan nilai efisiensi rata-rata sebesar 46,28%, yang divalidasi oleh *Indirect Methode* dengan hasil yang sangat konsisten, yakni 46,30%. Rendahnya angka efisiensi ini mengonfirmasi bahwa lebih dari 50% energi potensial yang terkandung dalam bahan bakar biomassa terbuang sebagai *heat losses*.

Identifikasi melalui analisis *losses* menunjukkan tiga faktor utama penyebab inefisiensi: kerugian gas buang kering (L₁) sebesar 16,99% akibat suhu cerobong yang tinggi, pembakaran tidak sempurna (L₅) sebesar 15,00% yang mengindikasikan banyaknya sisa karbon pada abu, serta tingginya kadar air bahan bakar (L₃) yang menyerap energi panas secara signifikan. Secara teknis, degradasi performa ini dipicu oleh perpindahan panas yang terhambat akibat akumulasi pada pipa serta kualitas bahan bakar yang tidak seragam. Untuk meningkatkan efisiensi operasional menuju standar ideal industri, diperlukan langkah perbaikan strategis melalui optimalisasi jadwal *soot blowing*, pengaturan ulang rasio udara pembakaran, serta manajemen penyimpanan biomassa yang lebih baik untuk meminimalisir kadar air.

Penelitian ini berkontribusi memberikan pemetaan kehilangan panas spesifik pada boiler biomassa, sekaligus membuka peluang riset lanjutan mengenai penerapan sistem kendali untuk mengoptimalkan efisiensi pembakaran secara otomatis dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada rekan-rekan dosen yang membantu dalam proses penelitian ini dan mahasiswa yang berpartisipasi dalam pengumpulan data di Pabrik Kelapa Sawit (PKS) serta Mitra PKS yang memberikan izin untuk kelancaran pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Andika, B. Mulyara, Z. Effendi, and A. S. Sembiring, "Analisa Kehilangan Panas Secara Konduksi Pada Saluran Steam (Pipa) Dari Turbin Ke Back Pressure Vessel (Bpv) Pada Pabrik Kelapa Sawit (Pks) Kapasitas 45 Ton/Jam," *J. Agro Fabr.*, Dec. 2023, doi: 10.47199/jaf.v5i2.198.
- [2] I. B. Rahardja and M. Masnia, "The Optimization of Capacity Boiler Efficiency 26 Tons/Hours with Fuel Alumination And Statistical Product and Service Solutions (Spss) Analysis," *ADI J. Recent Innov. AJRI*, May 2020, doi: 10.34306/ajri.v2i2.70.
- [3] R. A. Sinuraya, Z. Effendi, and S. Aisyah, "Analisa Kehilangan Panas Secara Konveksi Pada Saluran Steam (Pipa) Dari Turbin Ke BPV (Back Pressure Vessel) Pada PKS (Pabrik Kelapa Sawit) Kapasitas 45 Ton/Jam Studi Kasus Turangie Palm Oil Mill PT. PP. London Sumatra Indonesia, Tbk," *Turbo J. Program Studi Tek. Mesin*, Dec. 2023, doi: 10.24127/trb.v12i2.2922.
- [4] Z. Husain, Z. Zainal, and M. Abdullah, "Analysis of biomass-residue-based cogeneration system in palm oil mills," *Biomass Bioenergy*, vol. 24, pp. 117–124, Feb. 2003, doi: 10.1016/s0961-9534(02)00101-0.
- [5] A. Hidayat, A. Wibowo, and S. Harnowo, "Energy balance analysis on Rimbo Dua palm oil," *J. Eng. Appl. Technol.*, Apr. 2021, doi: 10.21831/jeatech.v2i1.39630.
- [6] Y. A. Salako, O. Owolarafe, A. Osunleke, I. Olaoye, and A. Atta, "Performance evaluation of a small scale palm fruit biomass-fired autoclave boiler," *Int. J. Agric. Environ. Food Sci.*, Jun. 2025, doi: 10.31015/2025.2.20.
- [7] Z. Effendi, S. Aisyah, and R. Hastyanda, "Fuel Used Analysis on Boiler Efficiency Variations and Water Intake Temperature Affected by Palm Oil Varieties," vol. 4, pp. 94–105, Mar. 2021, doi: 10.37637/ab.v0i0.634.
- [8] M. Mustangin and S. Harnowo, "AUDIT ENERGI LISTRIK DAN BOILER PABRIK KELAPA SAWIT KAPASITAS 60 TON/JAM," *J. Agro Fabr.*, Jun. 2020, doi: 10.47199/jaf.v2i1.139.
- [9] S. Ashfaq and S. R. A. Shukor, "Energy, Exergy and Environmentally Sustainable process analysis of Biomass Boilers using different Palm oil waste," *J. Phys. Sci.*, Aug. 2025, doi: 10.21315/jps2025.36.2.2.
- [10] D. Pasaribu, M. Nur, and Muchammad, "Exergy Analysis of Boiler System Fueled by Palm Shell and Palm Fiber in Medium-Scale Palm Bunch Processing Capacity to Become Crude Palm Oil," *Int. Res. J. Innov. Eng. Technol.*, Jan. 2025, doi: 10.47001/irjiet/2025.905043.
- [11] A. Aziz, S. A. Amin, A. A. Setiawan, and Y. Irwansi, "Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit untuk Pembangkit Listrik di PT. X," *Uranus J. Ilm. Tek. Elektro Sains Dan Inform.*, Aug. 2025, doi: 10.61132/uranus.v3i3.1033.
- [12] A. Gani *et al.*, "Comparative analysis of HHV and LHV values of biocoke fuel from palm oil mill solid waste," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cscee.2023.100581.
- [13] H. Hidayat *et al.*, "Oil palm biomass ash removal for boiler fuel optimization: A case study," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cscee.2024.101049.
- [14] M. N. Rahman, S. Yusup, B. C. L. Fui, I. Shariff, and A. Quitain, "Oil Palm Wastes Co-firing in an Opposed Firing 500 MW Utility Boiler: A Numerical Analysis," *CFD Lett.*, Feb. 2023, doi: 10.37934/cfdl.15.3.139152.
- [15] H. Eteruddin *et al.*, "Coal Fuel Efficiency with Mixed Palm Shell Biomass for Steam Power Plant," *2021 IEEE Conf. Energy Convers. CENCON*, pp. 148–153, Oct. 2021, doi: 10.1109/cencon51869.2021.9627271.
- [16] L. Evangelisti, L. Barbaro, C. Guattari, E. De Cristo, R. De Lieto Vollaro, and F. Asdrubali, "Comparison between Direct and Indirect Heat Flux Measurement Techniques: Preliminary Laboratory Tests," *Energies*, Jun. 2024, doi: 10.3390/en17122961.
- [17] K. Kono *et al.*, "Comprehensive clinical evaluation of indirect and direct bonding techniques in orthodontic treatment: a single-centre, open-label, quasi-randomized controlled clinical trial," *Eur. J. Orthod.*, vol. 46, Oct. 2024, doi: 10.1093/ejo/cjae036.
- [18] A. O. Ernest and O. A. David, "Boiler Efficiency Analysis of A 220mw Steam Power Plant Using Direct Method," *Int. J. Res. Sci. Innov.*, Jan. 2022, doi: 10.51244/ijrsi.2022.9802.

- [19] A. Lahijani, E. Supeni, and F. Kalantari, “A Review of Indirect Method for Measuring Thermalefficiency In Fire Tube Steam Boilers,” *J. Ind. Pollut. Control*, vol. 34, pp. 1825–1832, Jan. 2018.