



KELAYAKAN TEKNIS SUBSTITUSI CANGKANG KELAPA SAWIT (PKS) DENGAN EFB FIBER PADA BOILER TAKUMA N900R DI PT. XYZ

Amri Simbolon¹, Ajat Zاتمika², Aries Abbas³

^{1,2,3}Universitas Krisnadwipayana

Email: amrisimbolonp2k@gmail.com¹, ajatzاتمika01@gmail.com²,
ariesabbas@unkris.ac.id³

Abstrak

Sistem pembangkit listrik biomassa berbasis Boiler Takuma N900R di PT. XYZ mengalami defisit daya sebesar 27,6 kW pada kondisi eksisting, sehingga tegangan listrik pabrik kerap tidak stabil ketika beban produksi berada di titik puncak. Riset ini disusun untuk menakar kelayakan teknis substitusi bahan bakar Cangkang Kelapa Sawit (PKS) dengan EFB Fiber, memakai kerangka neraca energi deterministik yang bersandar pada tabel termodinamika IAPWS-IF97. Pendekatan yang dipakai adalah mixed methods sequential explanatory, dipadukan dengan wawancara semi terstruktur kepada lima informan kunci, data Logsheet DCS periode Januari sampai Maret 2026, dan uji laboratorium nilai kalor tiga jenis bahan bakar. Pada Skenario I (eksisting), net power tercatat 1.222,4 kW, di bawah beban pabrik 1.250 kW. Setelah PKS disubstitusi penuh dengan EFB Fiber pada kadar air desain 40% (Skenario II), kapasitas uap naik menjadi 40.573,87 kg/jam dan net power melonjak ke 1.539,93 kW, atau surplus 289,93 kW. Simulasi sensitivitas kadar air menghasilkan model regresi linier $Y = 56.999,8 - 411,2X$, dengan titik kritis pertama pada kadar air 57,6% dan titik kritis kedua pada 64,9%. Dapat disimpulkan bahwa substitusi EFB Fiber layak bersyarat, dengan catatan kadar air bahan bakar dikendalikan secara konsisten di bawah ambang 57,6% agar keandalan kelistrikan pabrik tetap terjaga.

Kata Kunci: Biomassa, Boiler Takuma N900R, EFB Fiber, Neraca Daya, Kelayakan Teknis.

Abstract

The biomass-based power generation system of the Takuma N900R Boiler at PT. XYZ suffers a power deficit of 27.6 kW under existing conditions, which causes frequent voltage instability whenever the mill load peaks. This study evaluates the technical feasibility of substituting Palm Kernel Shell (PKS) with EFB Fiber as boiler fuel, using a deterministic energy balance framework anchored to the IAPWS-IF97 steam tables. A mixed methods sequential explanatory approach was applied, combined with semi-structured interviews with five key informants, DCS logsheet records from January to March 2026, and laboratory calorific value tests of the three fuel types. Under Scenario I (existing condition), net power reached only 1,222.4 kW, below the 1,250 kW mill load. Once PKS was fully substituted with EFB Fiber at a design moisture content of 40% (Scenario II), steam capacity rose to 40,573.87 kg/h and net power increased to 1,539.93 kW, a surplus of 289.93 kW. A sensitivity simulation on fuel moisture content yielded the linear regression model $Y = 56,999.8 - 411.2X$, with a first critical point at 57.6% moisture and a second at 64.9%. The substitution is concluded to be conditionally feasible, provided



moisture content is consistently controlled below the 57.6% threshold to preserve the mill electrical reliability.

Keywords: Biomass, Takuma N900R Boiler, EFB Fiber, Power Balance, Technical Feasibility.

1. PENDAHULUAN

Sistem kogenerasi pada pabrik kelapa sawit menggabungkan produksi energi termal dan energi listrik dari satu sumber yang sama, yaitu boiler biomassa. Uap bertekanan tinggi hasil pembakaran dialirkan ke turbin back pressure vessel (BPV) untuk membangkitkan listrik, sementara sisa panasnya dipakai untuk kebutuhan proses [1]. Skema ini kelihatan sederhana di atas kertas, tapi praktiknya di lapangan jarang semulus itu, terutama saat pasokan bahan bakar utama mulai terganggu.

Boiler Takuma N900R milik PT. XYZ di Merauke, Papua Selatan, selama ini mengandalkan Fiber Press dan Cangkang Kelapa Sawit (PKS) sebagai bahan bakar utama, dengan nilai kalor masing-masing 2.745 dan 3.665 Kcal/kg. Data Distributed Control System (DCS) periode Januari-Maret 2026 memperlihatkan net power sistem pembangkit hanya mencapai 1.222,4 kW, sedangkan beban pabrik menuntut 1.250 kW. Selisihnya, 27,6 kW, memang tidak besar dari sisi angka, namun cukup untuk memicu voltase yang naik turun setiap kali pabrik beroperasi penuh. Tekanan pasar ekspor turut memperparah keadaan karena sebagian pasokan PKS yang seharusnya untuk kebutuhan internal justru dialihkan ke penjualan.

Empty Fruit Bunch (EFB) Fiber, atau serat mesokarp janjangan kosong, sebenarnya tersedia melimpah sebagai limbah proses pengolahan tandan buah segar (TBS), dengan fraksi mencapai 23% dari total TBS diolah, jauh di atas cangkang yang hanya 5%. Nilai kalor efektifnya pada kadar air desain 40% tercatat 2.169 Kcal/kg, lebih rendah dibanding PKS. Akan tetapi secara termodinamika, laju umpan yang lebih besar berpeluang mengompensasi kekurangan kalor tersebut. Persoalan muncul karena kadar air aktual EFB Fiber di lapangan bisa mencapai 58% hingga 72%, jauh melampaui kondisi desain, dan fluktuasi ini memengaruhi dua hal sekaligus, yakni nilai kalor efektif dan selisih entalpi spesifik uap berdasarkan tabel IAPWS-IF97 [2].

Penelitian ini disusun untuk menjawab empat hal. Pertama, menakar kinerja aktual boiler pada Skenario I eksisting, ditinjau dari kapasitas uap, daya listrik, dan specific steam



consumption (SSC) berdasarkan data DCS. Kedua, mengukur dampak substitusi PKS dengan EFB Fiber terhadap kapasitas uap dan daya bersih pada kondisi kadar air desain 40%. Ketiga, memetakan pengaruh variasi kadar air EFB Fiber terhadap kapasitas uap sekaligus menetapkan titik kritisnya. Keempat, menentukan batas laju umpan EFB Fiber yang aman secara mekanis beserta prasyarat teknis yang menyertainya.

Kajian terdahulu, seperti Kaniapan dkk. [6] dan Wan Zainus & Kamaruzaman [7], umumnya memakai nilai rata-rata tetap atau simulasi teoritis yang terisolasi untuk menilai batas kadar air biomassa sawit. Penelitian ini mencoba melangkah sedikit lebih jauh dengan memakai variabel entalpi spesifik dinamis berbasis formulasi resmi IAPWS-IF97, sekaligus mengintegrasikan evaluasi hulu-hilir mulai dari boiler, turbin, hingga BPV secara utuh, bukan sebatas komponen boiler saja. Hasil akhirnya diharapkan bisa jadi rujukan praktis bagi pabrik sejenis yang menghadapi persoalan serupa, bukan cuma tumpukan angka di atas kertas.

2. LANDASAN TEORI

A. Boiler Takuma N900R dan Prinsip Water Tube

Boiler atau ketel uap merupakan bejana tertutup bertekanan yang dirancang memanaskan air memakai panas hasil pembakaran bahan bakar, lalu menghasilkan uap bertekanan tinggi untuk keperluan proses industri. Pada industri kelapa sawit, boiler menjadi pusat pembangkit energi termal yang memompa dua proses utama, yaitu sterilisasi tandan buah segar (TBS) dan pembangkitan listrik lewat turbin [3]. Boiler yang dipakai PT. XYZ adalah Takuma N900R, sebuah ketel pipa air (water tube boiler) buatan 2020 di Jepang melalui lisensi PT. Super Andalas Steel, dengan spesifikasi teknis dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Teknis Boiler Takuma N900R

Parameter	Spesifikasi
Jenis Ketel	Ketel Pipa Air (Water Tube Boiler)
Model / Tahun	Takuma N900R, tahun pembuatan 2020
Kapasitas Desain	40 ton uap/jam
Actual Steam Evaporation	30 ton/jam (66.000 lbs/jam)



Tekanan Kerja Uap	21,0 - 25,0 kg/cm ² G
Temperatur Kerja Uap	222C - 261C
Temperatur Air Umpan Maks.	105C
Efisiensi Desain	73%
Bahan Bakar	Palm waste biomassa (Fiber Press, Cangkang, EFB Fiber)

Sumber: Dokumentasi lapangan PT. XYZ (2026); Borgnakke & Sonntag [4]; Wan Zainus & Kamaruzaman [7].

Pada water tube boiler, air umpan mengalir di dalam pipa yang terpapar gas pembakaran panas dari luar. Perpindahan panas berlangsung lewat radiasi dan konveksi, memicu penguapan di dalam pipa. Uap jenuh terkumpul di upper drum, lalu dipanaskan lanjut di superheater menjadi uap kering bertekanan tinggi sebelum dialirkan ke turbin. Jenis ini dipilih karena kemampuannya memproduksi uap kapasitas besar yang cocok untuk pabrik kelapa sawit skala industri [3].

B. Rantai Konversi Energi dari Boiler ke Engine Room

Konversi energi berlangsung dalam empat tahap berurutan yang saling terkait. Energi kimia bahan bakar dilepas di furnace menjadi energi termal, dipindahkan ke fluida kerja lewat sistem water tube, didistribusikan sebagai uap superheated menuju Engine Room, lalu dikonversi menjadi daya mekanis dan akhirnya daya listrik oleh turbin-generator. Ringkasan tiap tahap beserta parameter kuncinya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan Alur Konversi Energi Stasiun Boiler ke Engine Room

Tahap	Proses	Komponen Utama	Parameter Kunci	Output Terukur
1	Energi kimia -> termal	Furnace, moving stoker	N.O (Kcal/kg), laju bahan bakar	Heat release rate (Kcal/jam)
2	Termal -> uap bertekanan	Water tube, drum, superheater	Efisiensi = 73%	Q steam (kg/jam)



3	Distribusi uap -> Engine Room	Main steam valve, perpipaan	Kebutuhan aktual 30.300 kg/jam	Surplus uap (%)
4	Uap -> daya mekanis -> listrik	Turbin uap, generator	SSC turbin 24,24 kg/kWh	Daya listrik (kW)

Sumber: Diolah peneliti dari data lapangan PT. XYZ (2026); Borgnakke & Sonntag [4].

Furnace dengan sistem moving stoker adalah titik krusial yang membedakan Skenario I dan Skenario II. EFB Fiber dengan densitas curah 80-150 kg/m³ dan kandungan air lebih tinggi menuntut laju pengumpanan berbeda dibanding PKS, sehingga distribusi bahan bakar di atas kisi pembakaran harus diatur cermat agar heat release rate tetap stabil ketika bahan bakar beralih. Komponen superheater juga patut disorot, sebab abu EFB Fiber yang lebih kaya alkali cenderung membentuk deposit lengket (fouling) yang menurunkan entalpi uap keluaran, dan pada akhirnya mengurangi daya mekanis yang bisa dihasilkan turbin.

C. Nilai Kalor Efektif dan Kapasitas Produksi Uap

Nilai kalor efektif tiap jenis biomassa dihitung dalam kondisi wet basis, memperhitungkan kehilangan panas akibat kandungan air bawaan yang harus diuapkan lebih dulu di ruang bakar dengan menyerap panas laten penguapan. Formulasinya dinyatakan sebagai berikut.

$N.O = [(m_{NOS} \times HV_{NOS}) + (m_{OIL} \times HV_{OIL}) - (m_{Air} \times 600)] / m_{total}$ dengan m_{NOS} dan m_{OIL} berturut-turut adalah fraksi massa padatan non-minyak dan kandungan minyak, $HV_{NOS} = 3.850$ Kcal/kg, $HV_{OIL} = 8.800$ Kcal/kg, m_{Air} adalah fraksi massa air bahan bakar, angka 600 adalah konstanta panas laten penguapan air, dan $m_{total} = 1,0$ kg sebagai basis perhitungan.

Kapasitas produksi uap boiler kemudian dihitung memakai prinsip kekekalan energi, mengalikan pasokan energi kimia bahan bakar dengan efisiensi termal sistem ketel, dibagi selisih entalpi fluida kerja, mengikuti Borgnakke & Sonntag [4].

$$Q = (\eta \times G_{bb} \times N.O) / \Delta h$$

Q adalah kapasitas produksi uap per komponen bahan bakar (kg/jam), η efisiensi termal boiler, G_{bb} laju pengumpanan bahan bakar (kg/jam), N.O nilai kalor efektif (Kcal/kg), dan



delta h selisih entalpi spesifik fluida kerja yang diturunkan dari formulasi IAPWS-IF97 (Kcal/kg).

D. Neraca Daya Listrik dan Kehilangan Panas Akibat Kadar Air

Daya bersih (net power) yang tersedia bagi pabrik dihitung dari daya bruto generator dikurangi beban penunjang (auxiliary load), mengikuti Moran dkk. [12].

$$P_{gross} = \text{laju alir uap} / SSC \text{ dan } P_{net} = P_{gross} \times (1 - \phi)$$

Sementara itu, kehilangan panas akibat kadar air (moisture loss) dihitung dari massa air dalam bahan bakar dikalikan panas laten penguapannya, sesuai prinsip yang dijelaskan Turns [11].

$$Q_{loss} = \text{laju alir bahan bakar} \times MC \times h_{fg}$$

Kedua persamaan ini menjadi dasar seluruh perhitungan neraca daya dan analisis kehilangan panas pada Bab 4, yang membandingkan Skenario I dan Skenario II secara kuantitatif dan terukur.

E. Kriteria Kelayakan Teknis

Kelayakan teknis substitusi bahan bakar dievaluasi memakai kriteria margin surplus produksi uap terhadap kebutuhan steam aktual pabrik, diadaptasi dari pendekatan Wan Zainus & Kamaruzaman [7].

$$\text{Margin (\%)} = (Q_{Total} - Q_{aktual}) / Q_{aktual}$$

dengan Q_{Total} adalah total kapasitas produksi uap kombinasi bahan bakar (kg/jam) dan Q_{aktual} adalah kebutuhan steam aktual pabrik sebesar 30.300 kg/jam. Ambang margin ditetapkan pada dua titik kritis, yaitu 0% dan 10%, guna mengakomodasi fluktuasi kualitas bahan bakar di lapangan, sebagaimana diklasifikasikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Klasifikasi Kinerja Termal Sistem Boiler

Kategori	Syarat	Interpretasi
Layak	$Q_{Total} \geq SSC$ dan Margin $\geq 10\%$	Skenario bahan bakar mampu memproduksi uap dengan surplus minimal 10% di atas kebutuhan,



		memberi buffer operasional memadai terhadap fluktuasi kualitas bahan bakar
Layak Bersyarat	$Q_Total \geq SSC$ dan $0\% \leq Margin < 10\%$	Skenario bahan bakar secara teknis mampu memenuhi kebutuhan uap, namun buffer operasional tipis sehingga memerlukan pengawasan ketat terhadap kualitas bahan bakar
Tidak Layak	$Q_Total < SSC$	Skenario bahan bakar tidak mampu memenuhi kebutuhan uap minimum pabrik, mengancam kontinuitas operasional dan berpotensi menyebabkan gangguan pasokan listrik pada fasilitas yang tidak terhubung jaringan PLN

Sumber: Diadaptasi dari Wan Zainus & Kamaruzaman [7]; diolah peneliti (2026).

Ambang batas margin 10% dipilih dengan pertimbangan bahwa di lokasi terpencil tanpa akses jaringan PLN seperti Papua Selatan, gangguan pasokan uap berimplikasi langsung pada blackout total pabrik, sehingga diperlukan buffer yang jauh lebih konservatif dibanding pabrik yang masih terhubung ke jaringan listrik eksternal.

F. Penelitian Terdahulu dan Kesenjangan Penelitian

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji kinerja boiler biomassa sawit dari berbagai sudut pandang, namun cakupannya berbeda dari penelitian ini, sebagaimana dirangkum pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Metode	Kesimpulan Utama	Perbedaan dengan Penelitian Ini
Wan Zainus & Kamaruzaman [7]	Komparasi metode langsung dan tidak langsung	Metode tidak langsung lebih akurat mengidentifikasi	Tidak mengkaji substitusi bahan bakar; tidak menganalisis dampak daya listrik



		sumber kehilangan energi	
Simanjuntak dkk. [10]	Observasi lapangan	Kombinasi Fiber Press 70% + cangkang 30% menghasilkan efisiensi 74,2%	Tidak menganalisis EFB Fiber; tidak mengukur dampak kelistrikan
Kaniapan dkk. [6]	Tinjauan literatur komprehensif	EFB dan cangkang punya potensi besar sebagai biofuel biomassa sawit	Tidak menyajikan perhitungan neraca energi kuantitatif spesifik boiler

Sumber: Diolah dari berbagai penelitian (2021-2025).

Berdasarkan pemetaan tersebut, penelitian ini berupaya mengisi tiga kesenjangan utama. Pertama, studi terdahulu umumnya berhenti pada evaluasi termal boiler saja, sedangkan penelitian ini menghubungkan seluruh rantai energi secara simultan, mulai dari substitusi bahan bakar, kapasitas uap, hingga proyeksi daya listrik di Engine Room. Kedua, substitusi PKS dengan EFB Fiber pada Boiler Takuma N900R belum pernah diuji memakai data aktual dari pabrik di wilayah terpencil tanpa akses PLN, padahal kemandirian energi di lokasi semacam itu bersifat kritis. Ketiga, pemanfaatan nilai SSC turbin aktual lapangan sebesar 24,24 kg/kWh sebagai basis proyeksi daya pada skenario substitusi belum pernah diterapkan pada penelitian sejenis sebelumnya.

G. Kerangka Berpikir

Penelitian ini disusun berdasarkan hierarki logika yang saling mengikat secara kausalitas, di mana tiap tahapan analisis menjadi fondasi bagi tahapan berikutnya. Konstruksi awal dimulai dari analisis komposisi proksimat bahan bakar mencakup kadar air, NOS, dan OIL, yang dipakai untuk menghitung nilai kalor efektif lewat formula Takuma Boiler. Angka yang dihasilkan kemudian diintegrasikan dengan laju aliran massa bahan bakar per jam guna menentukan kapasitas produksi uap boiler. Selanjutnya, kapasitas uap ini dibandingkan dengan



kebutuhan steam aktual pabrik sebesar 30.300 kg/jam untuk mengukur margin surplus uap yang tersedia. Pada fase akhir, surplus tersebut dikonversi menjadi potensi daya listrik memakai konstanta SSC turbin sebesar 24,24 kg/kWh, lalu hasil estimasi daya listrik ini dievaluasi terhadap kebutuhan beban operasional pabrik sebesar 1.250 kW untuk menguji kelayakan teknis sistem secara menyeluruh, mulai dari kadar air bahan bakar sampai status kelayakan akhir

3. METODE PENELITIAN

1) Lokasi, Waktu, dan Pendekatan Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PT. XYZ, pabrik kelapa sawit berkapasitas olah 55 ton TBS per jam di Kabupaten Merauke, Provinsi Papua Selatan, menggunakan pendekatan mixed methods sequential explanatory [5]. Tahap kuantitatif deterministik dijalankan lebih dahulu, baru kemudian diperdalam lewat wawancara semi terstruktur untuk kepentingan triangulasi. Jadwal pelaksanaan penelitian selama empat minggu dirangkum pada Tabel 6.

Tabel 6. Jadwal Kegiatan Penelitian

Kegiatan Penelitian	Minggu 1	Minggu 2	Minggu 3	Minggu 4
Koordinasi dan pengumpulan data operasional (Logsheet DCS, proksimat)	v			
Validasi silang data proksimat dengan literatur akademis terindeks	v			
Observasi lapangan terstruktur di area stasiun boiler	v	v		
Konsultasi teknis dan verifikasi kondisi operasional lapangan		v		
Perhitungan nilai kalor efektif (N.O) tiap bahan bakar		v		



Perhitungan kapasitas uap dan neraca massa biomassa			v	
Analisis skenario kombinasi bahan bakar (I dan II)			v	
Analisis kelayakan teknis dan derivasi model prediktif linier			v	
Identifikasi kendala teknis mekanis dan validasi silang data				v
Pengolahan akhir data dan penyusunan laporan				v

Sumber: Diolah oleh peneliti (2026)

2) Jenis dan Sumber Data

Data primer diambil dari dua sumber, yaitu rekaman Logsheets DCS periode Januari-Maret 2026 yang meliputi laju bahan bakar, tekanan dan temperatur uap, temperatur air umpan, serta beban listrik, dan observasi lapangan langsung di stasiun boiler untuk mengamati kondisi fuel feeding system, ruang bakar, dan indikasi slagging-fouling. Data sekunder bersumber dari hasil uji proksimat laboratorium PT. XYZ mengacu standar ASTM D3173, tabel sifat termodinamika IAPWS-IF97, serta literatur terindeks Scopus untuk validasi silang.

Lima informan kunci dipilih secara purposive berdasarkan posisi jabatan dan pengalaman teknis yang relevan, dengan identitas disamarkan memakai kode I-01 sampai I-05 demi menjaga kerahasiaan. Pedoman wawancara mengacu tiga tema utama, yaitu konfirmasi kondisi operasional aktual, kendala teknis penggunaan EFB Fiber, dan penilaian komparatif kedua skenario bahan bakar. Rincian kelima informan disajikan pada Tabel 7.



Tabel 7. Informan Penelitian

Kode	Jabatan	Pengalaman	Relevansi	Metode
I-01	Production Manager	> 10 tahun	Pengambil keputusan operasional bahan bakar dan strategi substitusi	Semi-terstruktur, 60-90 menit
I-02	Operator Boiler Senior	> 8 tahun	Pengalaman langsung variasi kualitas dan performa pembakaran	Semi-terstruktur, 45-60 menit
I-03	Teknisi Mekanikal Boiler	> 6 tahun	Ahli pemeliharaan, risiko slagging, fouling, dan korosi	Semi-terstruktur, 45-60 menit
I-04	Supervisor Lab	> 5 tahun	Pengujian kualitas bahan bakar dan variasi kadar air lapangan	Semi-terstruktur, 30-45 menit
I-05	Energy Manager	> 7 tahun	Efisiensi energi pabrik dan akses data historis operasional	Semi-terstruktur, 60 menit

Sumber: Diolah peneliti (2026).

3) Variabel Penelitian dan Parameter Konstanta

Penelitian ini memakai satu variabel bebas dan satu variabel terikat sebagaimana dijelaskan pada Tabel 8, sementara besaran lain diperlakukan sebagai parameter konstanta teknis yang nilainya diambil dari dokumen desain PT. Super Andalas Steel [3] dan hasil pengukuran lapangan, dirangkum pada Tabel 9.

Tabel 8. Definisi Operasional Variabel Penelitian

Variabel	Jenis	Keterangan
Kadar air EFB Fiber (X)	Bebas / masukan utama	Kadar air wet basis, divariasikan 40%-72% dalam simulasi sensitivitas termodinamika (%)



Kapasitas produksi uap (Y)	Terikat / keluaran utama	Total produksi uap boiler per jam dari kombinasi bahan bakar tiap skenario, dievaluasi terhadap kebutuhan aktual 30.300 kg/jam
----------------------------	--------------------------	--

Sumber: Diolah peneliti (2026).

Tabel 9. Parameter Konstanta Termodinamika Boiler

No	Parameter Operasional	Simbol	Nilai
1	Tekanan uap superheated	Ps	20,0 bar
2	Temperatur uap superheated	Ts	250,0 C
3	Temperatur air pengisi (feedwater)	Tfw	95,0 C
4	Efisiensi termal boiler	eta	73% (0,73)
5	Specific steam consumption aktual	SSC	24,24 kg/kWh
6	Faktor beban internal (auxiliary load)	phi	8% (0,08)

Sumber: Diolah peneliti (2026); PT. Super Andalas Steel [3]

4) Tahapan Analisis Data

Analisis data dilakukan bertahap, dimulai dari validasi data proksimat, dilanjutkan perhitungan nilai kalor efektif (N.O) memakai formula berbasis wet basis, perhitungan kapasitas uap dengan persamaan $Q = (\eta \times G_{bb} \times N.O) / \Delta h$, simulasi skenario kombinasi bahan bakar, derivasi model prediktif linier $Y = a - bX$ dari hasil simulasi sensitivitas kadar air, analisis dampak terhadap sistem aktual di engine room dan BPV, hingga identifikasi kendala teknis dan triangulasi akhir dengan data kualitatif hasil wawancara. Seluruh tahapan ini selaras dengan desain sequential explanatory yang menempatkan data kuantitatif sebagai pijakan utama, lalu data kualitatif berperan memperdalam interpretasinya [5].

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum Objek dan Neraca Massa Biomassa

Objek penelitian adalah sistem pembangkit energi termal dan mekanis berbasis Boiler Takuma N900R dengan kapasitas produksi uap desain 40.000 kg/jam pada tekanan kerja



superheated 24 bar dan temperatur 315C. Pada Skenario I eksisting, boiler dijalankan dengan kombinasi Fiber Press 6.600 kg/jam dan PKS 2.750 kg/jam, menghasilkan produksi uap rata-rata 32.208 kg/jam dan SSC 24,24 kg/kWh, setara 80,5% dari kapasitas desain.

Dari sisi ketersediaan bahan baku, EFB Fiber sesungguhnya jauh lebih melimpah dibanding cangkang, dengan fraksi 23% dari total TBS diolah berbanding hanya 5% untuk cangkang, sebagaimana tersaji pada Tabel 10. Fakta ini yang mendasari urgensi optimalisasi EFB Fiber sebagai substitusi jangka panjang.

Tabel 10. Neraca Massa Produksi Biomassa Padat PT. XYZ (Basis Olah TBS)

Jenis Serat/Biomassa	Fraksi Terhadap TBS	Potensi	Ketersediaan Mandiri
Fiber Press	12,0%	Melimpah (internal)	Ya
Cangkang (PKS)	5,0%	Terbatas / komersial	Terbatas (Skenario I)
Janjangan Kosong (EFB Fiber)	23,0%	Berlimpah (internal)	Belum dioptimalkan

Sumber: Data operasional PT. XYZ yang telah diolah (2026)

B. Karakteristik Termal Bahan Bakar

Hasil uji laboratorium memperlihatkan nilai kalor efektif ketiga jenis bahan bakar berbeda cukup jauh, sebagaimana tersaji pada Tabel 11.

Tabel 11. Perbandingan Nilai Kalor Efektif Bahan Bakar Berbasis Uji Laboratorium

Komposisi Proksimat	PKS	Fiber Press	EFB Fiber (Desain 40%)	EFB Fiber (Aktual 58%)	EFB Fiber (Ekstrem 72%)
Kadar Air	20,0%	30,0%	40,0%	58,0%	72,0%
Padatan (mNOS)	79,0%	68,0%	58,0%	40,5%	27,0%*



Kandungan Minyak (mOIL)	1,0%	2,0%	2,0%	1,5%	1,0%*
Nilai Kalor Efektif (N.O), Kcal/kg	3.665	2.836	2.169	1.343	711*

Sumber: Hasil pengujian laboratorium dan perhitungan penulis (2026). *Nilai pada kolom kadar air 72% diperoleh melalui ekstrapolasi tren linear, bukan hasil pengukuran laboratorium langsung

EFB Fiber pada kondisi desain, dengan kadar air 40%, hanya memiliki N.O sebesar 2.169 Kcal/kg, tercatat 40,8% lebih rendah dibanding PKS eksisting yang mencapai 3.665 Kcal/kg. Kian tinggi kadar airnya, nilai kalor makin merosot tajam, sampai tersisa 711 Kcal/kg pada kondisi ekstrem 72%. Karakteristik fisiknya pun berbeda jauh, EFB Fiber bersifat voluminus dengan densitas ruah 80-150 kg/m³, jauh di bawah PKS yang padat pada 400-500 kg/m³. Perbedaan densitas inilah yang belakangan menjadi salah satu kendala teknis utama dalam proses pengumpulan.

Untuk perhitungan neraca energi, dipakai matriks properti termodinamika standar internasional IAPWS-IF97 pada delapan titik kondisi operasional yang berbeda, sebagaimana dirangkum pada Tabel 12, guna mendapatkan selisih entalpi yang presisi untuk tiap skenario dan tiap titik simulasi sensitivitas [2].

Tabel 12. Matriks Nilai Entalpi Spesifik Fluida Kerja Berdasarkan Formulasi IAPWS-IF97

Kode State	Kondisi Operasional	Tekanan (bar)	Temp (C)	Region IAPWS	Entalpi (Kcal/kg)
A-1	Uap superheated - Skenario I	22,5	315,0	Region 2	724,15
B-1	Air umpan - Skenario I	22,5	92,0	Region 1	85,43
A-2	Uap superheated - Skenario II (40%)	22,1	312,0	Region 2	722,58



B-2	Air umpan - Skenario II (40%)	22,1	88,0	Region 1	81,43
A-3	Uap superheated - simulasi MC 58%	21,5	305,0	Region 2	720,25
B-3	Air umpan - simulasi MC 58%	21,5	85,0	Region 1	76,41
A-4	Uap superheated - simulasi MC 72%	20,8	298,0	Region 2	717,32
B-4	Air umpan - simulasi MC 72%	20,8	80,0	Region 1	71,40

Sumber: Perhitungan menggunakan formulasi IAPWS-IF97 berdasarkan data operasional PT. XYZ (2026)

C. Kapasitas Produksi Uap dan Neraca Daya

Perhitungan neraca energi memakai persamaan $Q = (\eta \times G_{bb} \times N.O) / \Delta h$ menghasilkan kapasitas uap Skenario I sebesar 32.911,65 kg/jam, hanya berselisih 2,14% dari pembacaan DCS aktual 32.208 kg/jam, sehingga model perhitungan dapat dianggap valid untuk dipakai pada tahap selanjutnya. Pada Skenario II, seluruh PKS disubstitusi EFB Fiber dengan menaikkan laju umpan menjadi 7.800 kg/jam, dan hasilnya kapasitas uap melonjak menjadi 40.573,87 kg/jam.

Dari sisi kelistrikan, net power Skenario I tercatat 1.222,4 kW, defisit 27,6 kW dari beban 1.250 kW, dan inilah penyebab langsung ketidakstabilan voltase yang selama ini dikeluhkan operator lapangan. Skenario II membalikkan keadaan tersebut, net power naik ke 1.539,93 kW, surplus 289,93 kW. Rekapitulasi lengkap kedua skenario disajikan pada Tabel 13.



Tabel 13. Rekapitulasi Komparatif Kinerja Skenario I dan Skenario II

Parameter Evaluasi	Skenario I (Eksisting)	Skenario II (Substitusi Desain)	Selisih / Dampak
Total laju pasokan bahan bakar	9.350 kg/jam	14.400 kg/jam	+54,01%
Nilai perubahan entalpi (delta h)	638,72 Kcal/kg	641,15 Kcal/kg	+2,43 Kcal/kg
Kapasitas produksi uap	32.208 kg/jam	40.573,87 kg/jam	+25,97%
Daya listrik bersih (net power)	1.222,4 kW	1.539,93 kW	+346 kW (bruto)
Margin terhadap beban 1.250 kW	-27,6 kW (defisit)	+289,93 kW (surplus)	Swasembada daya
Stabilitas tekanan akumulator BPV	Fluktuatif	Konstan 3,0 bar	Eliminasi pressure drop

Sumber: Diolah oleh penulis (2026)

Kenaikan performa ini tidak datang tanpa konsekuensi. Untuk membuktikan hal tersebut secara termodinamika, dilakukan perhitungan moisture loss dengan hasil sebagaimana Tabel 14.

Tabel 14. Data Parameter Operasional Moisture Loss

Parameter	Notasi	Skenario I	Skenario II
Laju alir bahan bakar	m-bb	9.350 kg/jam	7.800 kg/jam*
Kadar air (moisture content)	MC	25% (rata-rata tertimbang)	40%
Panas laten penguapan	hfg	540 kkal/kg	540 kkal/kg



Kehilangan panas (Qloss)	-	1.366.200 kkal/jam	2.754.000 kkal/jam
--------------------------	---	-----------------------	-----------------------

Sumber: Hasil pengujian laboratorium dan perhitungan penulis (2026). *Basis massa tertimbang per jenis bahan bakar pada Skenario I: Fiber Press 6.600 kg/jam (MC 30%) dan PKS 2.750 kg/jam (MC 20%)

Moisture loss Skenario II meningkat 1.387.800 kkal/jam dibanding Skenario I, karena kadar air EFB Fiber yang tinggi menyerap sebagian energi pembakaran hanya untuk menguapkan air bawaan, sesuai prinsip kehilangan panas laten [11]. Untungnya, kenaikan laju massa bahan bakar sebesar 54,01% cukup besar untuk menutup kehilangan energi tersebut, sehingga secara netto sistem tetap diuntungkan, sebuah trade-off yang cukup wajar antara kuantitas dan kualitas energi biomassa.

D. Model Sensitivitas Kadar Air dan Titik Kritis

Simulasi tiga titik kadar air, yaitu 40%, 58%, dan 72%, dengan entalpi dinamis dari Tabel 12 menghasilkan model regresi linier $Y = 56.999,8 - 411,2X$. Artinya, setiap kenaikan 1% kadar air menggerus kapasitas uap sekitar 411,2 kg/jam. Titik kritis pertama berada pada kadar air 57,6%, saat margin surplus tergerus di bawah ambang aman 10%. Titik kritis kedua berada pada 64,9%, saat kapasitas uap benar-benar jatuh di bawah kebutuhan proses minimum 30.300 kg/jam. Rincian tiap titik simulasi tersaji pada Tabel 15.

Tabel 15. Matriks Kelayakan dan Margin Surplus Skenario II pada Berbagai Kadar Air

Kadar Air EFB (X)	N.O (Kcal/kg)	Kapasitas Uap (Y)	Margin Surplus	Status Kelayakan
40,0%	2.169	40.573 kg/jam	33,9%	Sangat layak
58,0% (aktual)	1.343	33.100 kg/jam	9,2%	Layak, margin tipis
72,0% (ekstrem)	711	27.422 kg/jam	-9,5%	Tidak layak

Sumber: Hasil simulasi termal dan formulasi IAPWS-IF97 (2026)



Menariknya, kadar air rata-rata aktual di lapangan, yaitu 58%, nyaris pas berada di ambang kritis pertama. Sistem yang berjalan sekarang bisa dibilang berada pada margin yang sangat tipis, hanya surplus 9,2%, dan rawan tergelincir kalau musim hujan datang lalu kadar air melonjak ke 72%, kondisi yang justru menghasilkan defisit 9,5%. Sedikit mengkhawatirkan memang, mengingat pabrik tetap harus beroperasi sepanjang tahun tanpa memandang cuaca. Rangkuman kelayakan teknis secara menyeluruh, mencakup empat parameter utama, disajikan pada Tabel 16.

Tabel 16. Matriks Kelayakan Teknis Komprehensif Skenario II

Parameter Kelayakan Utama	Nilai Riil	Kriteria Ambang Batas	Kesimpulan Teknis
Kapasitas angkat uap minimum	27.421,79 - 40.573,87 kg/jam	> 30.300 kg/jam (kebutuhan proses)	Terpenuhi pada kondisi desain-sedang, defisit pada kondisi ekstrem 72%
Cadangan energi listrik bersih	+289,93 kW	> 0 kW (swasembada grid)	Surplus mandiri terwujud
Tekanan akumulator BPV	3,0 bar (konstan)	3,0 bar	Stabil pada beban puncak
Ketangguhan kadar air (robustness)	Titik kritis X = 57,6% dan 64,9%	Batas margin > 10%	Bertingkat: layak ($\leq 57,6\%$), bersyarat (57,6-64,9%), tidak layak ($> 64,9\%$)

Sumber: Hasil analisis dan perhitungan penulis berdasarkan data operasional PT. XYZ (2026)

E. Batas Mekanis dan Implikasi Operasional

Volume ruang bakar membatasi laju umpan EFB Fiber maksimum pada 8.250 kg/jam, mengingat densitas ruahnya yang rendah membuat volume tempuh per satuan massa jauh lebih besar dibanding PKS. Pada batas ini, kapasitas uap puncak teoritis mencapai 41.146 kg/jam, masih aman di bawah batas katup pengaman 26 bar.



Sifat fisik EFB Fiber yang voluminus dan mudah mengikat air memunculkan risiko bridging pada corong pengumpan, ditambah potensi serat panjang membelit poros konveyor ulir, sehingga memerlukan modifikasi torsi motor penggerak. Kandungan kalium dan silika pada abu sisa pembakarannya mempercepat slagging dan fouling di pipa konveksi, yang menurut Karuana [8] bisa menurunkan koefisien perpindahan panas sampai 15-20% apabila tidak dibersihkan secara rutin. Sejalan dengan itu, tiga langkah kuratif direkomendasikan sebagai prasyarat teknis implementasi Skenario II, sebagaimana dirangkum pada Tabel 17. Ketiganya bersifat simultan, tidak bisa dijalankan sepotong-sepotong kalau ingin hasilnya optimal, sebab masing-masing menysasar titik lemah yang berbeda dalam rantai penanganan EFB Fiber, mulai dari kadar air, akumulasi abu, hingga dimensi fisik serat.

Tabel 17. Rekomendasi Teknis Strategis untuk Implementasi Skenario II

Rekomendasi Teknis	Deskripsi Implementasi	Tujuan Utama
Rotary Dryer System	Unit pengering mekanis berputar memanfaatkan energi termal flue gas dari cerobong untuk menurunkan kadar air EFB Fiber menuju level desain 40% sebelum masuk ruang bakar	Menekan moisture loss dan menjaga N.O efektif
Intensifikasi Soot Blowing	Menaikkan frekuensi pembersihan pipa superheater dan konveksi setiap 4-6 jam, dari interval normal 8 jam pada bahan bakar PKS	Mencegah penumpukan abu alkali dan menjaga koefisien perpindahan panas
Mechanical Shredder Unit	Mengintegrasikan mesin pencacah di jalur konveyor utama untuk menyeragamkan ukuran serat panjang (15-30 cm) EFB Fiber mentah	Mencegah bridging dan kemacetan suplai bahan bakar

Sumber: Diolah oleh penulis (2026)



F. Validasi Model Melalui Sensitivitas Efisiensi Boiler

Untuk menguji keandalan model neraca energi yang dibangun, dilakukan pula simulasi penurunan efisiensi termal akibat karakteristik bahan bakar baru berkadar air lebih tinggi. Berdasarkan audit energi Hidayat [13], efisiensi aktual ketel biomassa kelapa sawit berpotensi merosot dari angka desain 73% menjadi 63,23% akibat penurunan temperatur pembakaran yang dipicu kadar air bahan bakar tinggi.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada efisiensi terendah 63,23% sekalipun, Skenario II tetap menghasilkan produksi uap sebesar 35.144 kg/jam. Nilai ini masih menyisakan margin surplus 16,0% terhadap kebutuhan proses, tetap berada di atas ambang batas kritis kelayakan minimum 10% yang ditetapkan pada Tabel 4. Dengan kata lain, kesimpulan kelayakan teknis pada penelitian ini bisa dibilang cukup kokoh (robust), sebab tetap bertahan bahkan saat asumsi efisiensi desain diturunkan ke skenario terburuk yang realistis di lapangan.

G. Komparasi Metodologis dengan Penelitian Terdahulu

Dibandingkan dengan penelitian Kaniapan dkk. [6] yang mematok batas kadar air 60% dan Wan Zainus & Kamaruzaman [7] pada 65%, hasil penelitian ini justru sedikit lebih konservatif, dengan batas layak bersyarat di 57,6% dan tidak layak di atas 64,9%, sebagaimana dirangkum pada Tabel 20. Perbedaan ini masuk akal, sebab penelitian ini memakai entalpi dinamis IAPWS-IF97 dan mengevaluasi sistem hulu-hilir secara menyeluruh, bukan cuma komponen boiler saja seperti pada kedua penelitian pembandingan tersebut. Temuan ini juga selaras dengan Yoo dkk. [9] yang menyoroti keterbatasan EFB sebagai bahan bakar padat akibat kadar air bawaan yang tinggi pasca-perebusan tandan, serta sejalan dengan hasil Simanjuntak dkk. [10] pada boiler Takuma tipe lain yang juga mencatat sensitivitas performa terhadap kombinasi bahan bakar biomassa sawit.

Tabel 20. Perbandingan Metodologi dan Batas Sensitivitas Operasi dengan Penelitian Terdahulu

Dimensi Evaluasi	Kaniapan (2021)	Wan Zainus & Kamaruzaman (2023)	Penelitian Ini



Pendekatan analisis perubahan entalpi	Nilai rata-rata tetap	Simulasi teoritis terisolasi	Variabel entalpi dinamis berbasis IAPWS-IF97
Basis proyeksi energi listrik	Isentropik ideal turbin	Isentropik ideal turbin	SSC aktual lapangan
Batasan evaluasi sistem	Termal komponen boiler saja	Termal komponen boiler saja	Hulu-hilir terintegrasi (boiler, turbin, BPV)
Batas kadar air kelayakan	60%	65%	Layak bersyarat hingga 57,6%; tidak layak di atas 64,9%

Sumber: Hasil observasi lapangan dan rekomendasi teknis penulis (2026)

H. Validasi Silang Data Teknis

Guna menjamin konsistensi dan keandalan hasil perhitungan, dilakukan validasi silang data teknis dari tiga sumber independen, yaitu hasil kalkulasi numerik neraca energi berbasis IAPWS-IF97, rekaman data DCS dan logsheet operasional, serta verifikasi lapangan terhadap kondisi fisik aktual sistem boiler. Kesesuaian yang konsisten di antara ketiga sumber ini mengonfirmasi validitas teknis model yang dibangun, sebagaimana dirangkum pada Tabel 19.

Tabel 19. Validasi Silang Data Teknis Kinerja Termal Boiler

Kode Data	Temuan Perhitungan Termodinamika	Verifikasi DCS/Logsheet	Landasan Teori
D-01	N.O EFB Fiber 40,8% di bawah PKS akibat kenaikan moisture loss laten	Tekanan uap aktual menurun saat EFB Fiber diumpan tanpa pengeringan	Kehilangan kalor laten akibat penguapan air bahan bakar basah
D-02	Produksi uap Skenario II memberi surplus 33,9% di atas kebutuhan minimum	Logsheet DCS mencatat kenaikan tekanan BPV saat laju	Prinsip kesetimbangan massa dan energi sistem pembangkit biomassa



		EFB dinaikkan bertahap	
--	--	---------------------------	--

Sumber: Hasil analisis penulis berdasarkan data lapangan, wawancara, dan studi pustaka (2026).

Melalui proses triangulasi yang mempertemukan pemodelan termodinamika adaptif berbasis IAPWS-IF97, verifikasi logsheet DCS operasional, serta konfirmasi kualitatif dari para praktisi ahli di stasiun pembangkit, dapat disimpulkan secara meyakinkan bahwa skema substitusi cangkang kelapa sawit secara total dengan janjangan kosong (EFB Fiber) dinyatakan layak secara teknis untuk dijalankan di PT. XYZ, sepanjang tiga prasyarat teknis di atas dipenuhi secara konsisten.

I. Implikasi Manajerial dan Operasional

Temuan penelitian ini membawa sejumlah implikasi praktis bagi manajemen PT. XYZ. Dari sisi investasi, ketiga prasyarat teknis pada Tabel 17 sebaiknya dipandang sebagai satu paket investasi terintegrasi, bukan proyek yang berdiri sendiri-sendiri, mengingat efektivitas satu komponen sangat bergantung pada keberadaan dua komponen lainnya. Rotary dryer tanpa mechanical shredder misalnya, tetap berisiko mengalami bridging pada corong pengumpan meskipun kadar air sudah diturunkan, karena dimensi serat panjang belum tereduksi.

Dari sisi operasional harian, hasil analisis sensitivitas pada Tabel 15 dapat langsung diterjemahkan menjadi standar prosedur operasi (SOP) sederhana bagi operator boiler dan tim laboratorium, yaitu penolakan pasokan EFB Fiber begitu kadar air terukur melampaui 57,6%, sebagai garis pertahanan pertama sebelum sistem benar-benar mendekati titik defisit di 64,9%. Pendekatan berbasis ambang kuantitatif semacam ini jauh lebih mudah diawasi di lapangan dibandingkan kebijakan kualitatif yang bergantung pada penilaian subjektif operator jaga. Dengan disiplin operasional yang konsisten, surplus daya 289,93 kW yang dihasilkan Skenario II berpotensi menjadi bantalan energi yang berharga, terutama bagi pabrik yang beroperasi di kawasan tanpa akses jaringan PLN seperti PT. XYZ, di mana setiap kilowatt cadangan punya nilai strategis tersendiri.



J. Keterbatasan Penelitian

Beberapa keterbatasan perlu diakui secara jujur agar interpretasi hasil tidak berlebihan. Pertama, nilai kalor efektif pada kondisi kadar air ekstrem 72% diperoleh lewat ekstrapolasi tren linear, bukan hasil pengukuran laboratorium langsung, sehingga akurasi bergantung pada asumsi linearitas yang mungkin tidak sepenuhnya berlaku pada kondisi fisik riil. Kedua, penelitian ini berhenti pada analisis neraca energi deterministik dan belum mencakup uji pembakaran skala pilot, analisis emisi gas buang, maupun kajian degradasi material jangka panjang akibat fouling, yang idealnya memerlukan instrumentasi tambahan dan periode observasi lebih panjang. Ketiga, data operasional yang dipakai terbatas pada periode tiga bulan, Januari hingga Maret 2026, sehingga variasi musiman di luar rentang tersebut, termasuk puncak musim hujan yang sesungguhnya, belum sepenuhnya tertangkap dalam kalkulasi. Batasan-batasan ini terbuka menjadi ruang bagi penelitian lanjutan yang lebih komprehensif.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Skenario I eksisting mengalami defisit daya 27,6 kW akibat net power yang hanya mencapai 1.222,4 kW, sedangkan beban pabrik menuntut 1.250 kW, dan kondisi inilah yang menjadi biang keladi voltase tidak stabil selama ini. Substitusi penuh PKS dengan EFB Fiber pada kadar air desain 40% mengangkat kapasitas uap menjadi 40.573,87 kg/jam dan net power ke 1.539,93 kW, memberi surplus 289,93 kW meskipun moisture loss ikut naik 1.387.800 kkal/jam. Model sensitivitas $Y = 56.999,8 - 411,2X$ mengonfirmasi hubungan linier negatif antara kadar air dan kapasitas uap, dengan titik kritis pertama pada 57,6% dan titik kritis kedua pada 64,9%. Laju umpan EFB Fiber dibatasi maksimum 8.250 kg/jam oleh volume ruang bakar, sehingga substitusi ini dinyatakan layak bersyarat, asalkan kadar air dikendalikan konsisten di bawah 57,6% lewat kombinasi rotary dryer, mechanical shredder, dan intensifikasi soot blowing.

Untuk penerapan lebih lanjut, pengendalian kadar air EFB Fiber berbasis moisture analyzer real time dengan standar penolakan di atas 57,6% sebaiknya segera diadopsi oleh PT. XYZ, sementara surplus daya 289,93 kW dapat dimanfaatkan untuk memperkuat sistem monitoring beban di engine room agar starting current yang tak terduga tidak mengganggu distribusi beban. Penelitian lanjutan berupa uji pembakaran pilot scale pada boiler penuh masih diperlukan untuk memvalidasi temuan numerik ini secara eksperimental, terutama menyangkut



distribusi temperatur ruang bakar, komposisi gas buang, dan koefisien perpindahan panas aktual pada pipa konveksi.

DAFTAR PUSTAKA

- D. O. Obada, M. O. Kekung, T. Levonyan, and G. W. Norval, "Palm oil mill derived empty palm fruit bunches as a feed stock for renewable energy applications in Nigeria: A review," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 24, p. 101666, 2023.
- International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS), "Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (R7-97)," IAPWS, 2012.
- PT. Super Andalas Steel, "Takuma Water Tube Boiler N900R: Operation and Maintenance Manual," PT. Super Andalas Steel, 2021.
- C. Borgnakke and R. E. Sonntag, *Fundamentals of Thermodynamics*. Wiley, 2022.
- Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta, 2019.
- S. Kaniapan, S. Hassan, H. Ya, K. Patma Nesan, and M. Azeem, "The Utilisation of Palm Oil and Oil Palm Residues and the Related Challenges as a Sustainable Alternative in Biofuel, Bioenergy, and Transportation Sector: A Review," *Sustainability*, vol. 13, no. 6, p. 3110, 2021.
- W. M. F. Wan Zainus and N. Kamaruzaman, "Boiler efficiency analysis using direct and indirect method," 2023.
- F. Karuana, "Prediction of slagging fouling and corrosion potential in palm oil boiler," *AIP Conference Proceedings*, p. 20004, 2024.
- H.-M. Yoo, S.-W. Park, Y.-C. Seo, and K.-H. Kim, "Applicability assessment of empty fruit bunches from palm oil mills for use as bio-solid refuse fuels," *J. Environ. Manage.*, vol. 234, pp. 1-7, 2019.
- E. Simanjuntak, M. Idris, and Jufrizal, "Analisis Performa Boiler Berbahan Bakar Kombinasi Fiber Dan Cangkang Pada Boiler Takuma N-600 SA," *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 2, no. 1, pp. 34-42, 2023.
- S. R. Turns, *An Introduction to Combustion*. McGraw-Hill, 2011.
- M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 9th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.



Hidayat, "Energy balance analysis on Rimbo Dua palm oil mill," J. Eng. Appl. Technol., vol. 2, no. 1, pp. 13-22, 2021.

W. Wagner and H.-J. Kretzschmar, International Steam Tables: Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008