

Analysis of co-firing palm oil waste for the economic and emission performance of PLTU in Riau

Aulia Ramadhan^{a,1}, Anita Susilawati^a, Asral Asral^a, Dodi Sofyan Arief^a, Dinni Agustina^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Riau, Pekanbaru, 28293

¹Email korespondensi: aulia.ramadhan7131@grad.unri.ac.id

Abstract. This study evaluates the co-firing of palm oil industry waste biomass, specifically Palm Kernel Shell (PKS) and Empty Fruit Bunch (EFB) pellets, in coal-fired power plants (PLTU) in Riau, Indonesia, to support a sustainable energy transition. Empirical tests were conducted at PLTU Tenayan and Tembilahan, using biomass substitution rates of 5% and 50%, respectively. Key performance indicators, including Specific Fuel Consumption (SFC), Net Plant Heat Rate (NPHR), production cost, and exhaust emissions (SO₂ and NO_x), were analyzed. Results show that 5% PKS co-firing at PLTU Tenayan reduced SFC from 0.871 to 0.856 kg/kWh and NPHR from 4,187 to 4,116 kCal/kWh, while 50% PKS co-firing at PLTU Tembilahan decreased SFC from 1.171 to 0.785 kg/kWh and NPHR from 5,312 to 3,625 kCal/kWh. Economically, PKS co-firing resulted in cost savings of up to Rp223.58/kWh. Emission measurements revealed SO₂ reductions up to 27.8% at PLTU Tenayan and 34% at PLTU Tembilahan (EFB scenario), with NO_x emissions remaining stable or decreasing by up to 13%. Conversely, EFB pellet co-firing increased fuel consumption and production costs due to higher fuel prices and operational challenges. The study confirms that PKS co-firing is a viable and effective approach to enhancing power-plant efficiency, reducing emissions, and lowering costs in palm-oil-producing regions. Limitations include short test durations and limited plant sites; therefore, long-term monitoring is recommended to assess boiler integrity, operational stability, and emission performance for sustainable large-scale implementation. This research provides critical technical, economic, and environmental insights for advancing biomass co-firing in commercial coal power plants.

Keywords: co-firing, biomass, sustainable energy transition, palm kernel shell, empty fruit bunch

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/rkerwn20>

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi bioenergi mencapai sekitar 55,7 GW, terdiri dari 53,4 GW biomassa dan 2,3 GW biogas. Potensi ini dapat meningkat hingga 57 GW apabila *Palm Oil Mill Effluent* (POME) turut diperhitungkan. Wilayah Sumatera menyumbang 54% dari total potensi biomassa nasional, Provinsi Riau memiliki potensi biomassa terbesar, yaitu sekitar 36% dari potensi biomassa Sumatera atau 19.5% secara nasional [1]. Berdasarkan Outlook Komoditas Perkebunan Kelapa Sawit Tahun 2024, Provinsi Riau merupakan sentra produksi minyak sawit terbesar di Indonesia dengan kontribusi rata-rata sebesar 19.06% terhadap total produksi nasional periode 2020–2024, atau setara dengan produksi sekitar 8.86 juta ton *Crude Palm Oil* (CPO) per tahun [2]. Jumlah tersebut menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah signifikan, diantaranya *Palm Kernel Shell* (PKS) dan *Empty Fruit Bunch* (EFB), memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif untuk *co-firing* biomassa di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) karena ketersediaannya yang melimpah di Riau dan nilai kalor yang kompetitif dengan batubara low rank [3].

Sejumlah penelitian sebelumnya telah menyoroti potensi *co-firing* biomassa kelapa sawit di Indonesia. Aziz et al. (2016) menemukan melalui simulasi CFD bahwa rasio *co-firing* PKS-komponen batubara antara 10–15 % memberikan efisiensi termal terbaik dan

menekan emisi gas buang secara signifikan [4]. Prayoga et al. (2024) melalui analisis TG-DTA mengungkapkan bahwa campuran bahan bakar optimal, yakni L80M20F (80 % *low-rank coal*, 20 % medium-rank coal, dan 5 % biomassa sawit), menunjukkan performa pembakaran terbaik berdasarkan parameter termodinamika dan kinetika [5]. Arifin et al. (2023) menguji penerapan *co-firing* 5 % di tiga PLTU Indonesia secara praktis dan menemukan pengurangan konsumsi batubara, emisi gas, serta dampak positif ekonomi, menjadikannya pilihan cepat untuk memperbesar pangsa energi terbarukan [6]. Meskipun demikian, dengan potensi biomassa dan produksi CPO Provinsi Riau yang besar, masih sedikit penelitian yang membahas pemanfaatan limbah industri kelapa sawit di kedua PLTU yang ada di Riau, dengan menganalisis kinerja ekonomi dan emisi. Sebagian besar studi tersebut masih bersifat simulasi dan tidak secara langsung menganalisis pemanfaatan limbah industri kelapa sawit di wilayah sentral sawit, sehingga terdapat kesenjangan dalam hal data empiris lapangan.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan penelitian sebelumnya dengan menganalisis implementasi pengujian *co-firing* biomassa limbah sawit di dua PLTU *on-grid* di Riau, yakni PLTU Tenayan dan PLTU Tembilahan. Kebaruan penelitian terletak pada pendekatan komprehensif yang mengintegrasikan data empiris lapangan terkait aspek efisiensi penyediaan tenaga

listrik, keekonomian, dan lingkungan dari pemanfaatan limbah industri kelapa sawit sebagai bahan bakar biomassa. Selain itu, penelitian ini menilai efektivitas *co-firing* pada variasi proporsi biomassa (5% dan 50%), sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih aplikatif.

Permasalahan utama yang dikaji adalah bagaimana pengaruh *co-firing* biomassa limbah sawit terhadap kinerja pembangkit (*Specific Fuel Consumption/SFC*), biaya produksi listrik (Komponen C/BPP), serta emisi gas buang utama (NO_x dan SO_2). Secara umum, pendekatan penelitian dilakukan melalui analisis bahan bakar, pengukuran parameter operasi PLTU, perhitungan keekonomian, dan evaluasi lingkungan. Tujuan penelitian ini adalah memberikan bukti empiris mengenai kelayakan teknis dan ekonomis *co-firing* limbah sawit di PLTU *on-grid*, sekaligus menilai kontribusinya terhadap pengurangan emisi. Penelitian ini diharapkan dapat memberi kontribusi teknis, ekonomi, dan lingkungan dalam mendukung implementasi *co-firing* biomassa di PLTU skala komersial di wilayah sentra sawit, mendukung kebijakan nasional transisi energi. Adapun limitasi penelitian adalah cakupan lokasi terbatas pada dua PLTU di Riau dan variasi proporsi *co-firing* tertentu, limbah industri sawit yang digunakan adalah PKS dan EFB, sehingga generalisasi ke wilayah atau skala lebih luas memerlukan kajian lanjutan.

Pemanfaatan limbah kelapa sawit sebagai bahan bakar campuran (*co-firing*) pada PLTU batubara telah banyak diteliti dalam konteks peningkatan kinerja ekonomi sekaligus pengurangan emisi di Indonesia. Strategi ini sejalan dengan kebijakan energi nasional yang menargetkan peningkatan porsi energi terbarukan serta penurunan emisi karbon, khususnya di wilayah sentra sawit seperti Riau. Integrasi biomassa, terutama *Palm Kernel Shell* dan *Empty Fruit Bunch*, ke dalam sistem pembangkit batubara dianggap mampu mendukung transisi energi berkelanjutan.

Secara teknis, *co-firing* dilakukan dengan mencampurkan biomassa bersama batubara sebelum proses pembakaran, baik melalui metode *direct co-firing* maupun melalui pretreatment tertentu. Teknologi ini dinilai layak diaplikasikan pada PLTU eksisting, terutama yang menggunakan *circulating fluidized bed (CFB) boiler*, tanpa memerlukan modifikasi besar [7], [8]. Lebih lanjut, proses *hydrothermal treatment* terbukti mampu meningkatkan nilai kalor biomassa EFB secara signifikan, dari semula 7.86 MJ/kg menjadi sekitar 22.22 MJ/kg, sehingga mendekati kualitas batubara menengah [7].

Dari sisi ekonomi, penerapan *co-firing* dapat menurunkan *specific fuel consumption* serta biaya pokok produksi listrik. Hal ini karena biomassa sawit, khususnya PKS yang melimpah di Sumatra, tersedia

dengan harga relatif kompetitif dan berpotensi menekan biaya operasional PLTU [8]. Selain itu, pemanfaatan *co-firing* juga menciptakan permintaan baru terhadap rantai pasok biomassa, sehingga mendorong tumbuhnya ekonomi lokal dan mendukung penerapan konsep ekonomi sirkular di sektor energi [9].

Secara lingkungan, *co-firing* terbukti menurunkan emisi utama pembangkit seperti nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO_2), dan karbon dioksida (CO_2). Dengan demikian, teknologi ini relevan dalam mendukung target *Net Zero Emission* Indonesia tahun 2060 [8], [10]. Selain itu, pemanfaatan limbah kelapa sawit untuk energi juga mengurangi risiko emisi dari perubahan tata guna lahan serta mendorong praktik pengelolaan limbah yang lebih berkelanjutan [10]. Namun demikian, sejumlah tantangan masih dihadapi, antara lain keterbatasan pasokan biomassa yang berkelanjutan serta potensi persaingan pemanfaatan biomassa untuk industri lain. Oleh karena itu, keberhasilan implementasi *co-firing* dalam jangka panjang sangat bergantung pada keandalan rantai pasok biomassa dan integrasinya dengan sistem energi nasional.

Selain itu, potensi limbah kelapa sawit sebagai sumber energi terbarukan dapat dianalisis melalui neraca massa yang menggambarkan distribusi hasil samping dari pengolahan Tandan Buah Segar (TBS). Setiap ton TBS menghasilkan fraksi biomassa dalam jumlah signifikan, seperti serat (11–12%), cangkang (5–7%), tandan kosong (20–23%), serta limbah cair atau POME (50–60%). Dengan skala produksi CPO nasional yang sangat besar, maka total ketersediaan biomassa sawit untuk energi juga sangat melimpah, semakin tinggi volume produksi CPO, semakin besar pula limbah biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar *co-firing* di PLTU [11].

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kinerja, keekonomian, dan dampak lingkungan dari penerapan *co-firing* bahan bakar biomassa limbah industri kelapa sawit yang terdiri dari *Palm Kernel Shell* (PKS) atau cangkang kelapa sawit dan *Empty Fruit Bunch* (EFB) atau tandan buah kosong pada PLTU *on-grid* yang ada di Provinsi Riau yaitu PLTU Tenayan dan PLTU Tembilahan. Tahapan metodologi meliputi analisis bahan bakar, perhitungan kinerja termal, analisis keekonomian, serta analisis lingkungan berdasarkan data operasional pembangkit.

Sampel bahan bakar yang digunakan dalam penelitian adalah batubara *low range* yang digunakan kedua PLTU di Riau, PKS, dan pellet EFB. Analisis laboratorium dilakukan melalui uji proksimat untuk mengetahui kandungan total *moisture*, *volatile matter*, *ash content*, dan *fixed carbon*. Data hasil uji proksimat

digunakan untuk membandingkan kualitas bahan bakar dan menentukan kesesuaiannya dalam skema *co-firing*. Nilai kalor *Gross Calorific Value* (GCV) juga diperoleh dari uji ini untuk keperluan perhitungan energi masukan pada pembangkit.

Kinerja pembangkit dinilai dengan menghitung *Specific Fuel Consumption* (SFC) dan *Net Plant Heat Rate* (NPHR). *Specific Fuel Consumption* atau konsumsi bahan bakar spesifik merupakan indikator

utama efisiensi penyediaan tenaga listrik. SFC menggambarkan pemakaian bahan bakar pada pembangkit listrik, didefinisikan sebagai jumlah massa bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan 1 kWh energi listrik bruto. Semakin rendah nilai SFC, semakin efisien pembangkit dalam mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi listrik [12]. Dalam penelitian ini, perhitungan SFC dilakukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$SFC = \frac{\sum Volume \text{ Batubara } (kg)}{\sum Produksi \text{ Listrik } (kWh)} \quad (1)$$

Net Plant Heat Rate atau rasio panas bersih pembangkit merupakan ukuran lain yang umum digunakan dalam menilai efisiensi pembangkit listrik. NPHR didefinisikan sebagai rasio antara energi panas

masukan (*energy input*) yang berasal dari total nilai kalor bahan bakar dengan energi listrik netto (*energy output*) yang dihasilkan oleh pembangkit [12].

$$NPHR = \frac{Konsumsi \text{ bahan bakar} \times CV \text{ bahan bakar}}{Energi \text{ listrik Netto}} \quad (2)$$

Untuk menghitung jumlah energi listrik yang dihasilkan dari penggunaan biomassa melalui sistem

co-firing, digunakan pedoman perhitungan berdasarkan regulasi *co-firing* PLTU [13],

$$Energi \text{ Biomassa} = kWh \text{ terukur} \times \frac{(m_{bm} \times CV_{bm})}{(m_{bt} \times CV_{bt}) + (m_{bm} \times CV_{bm})} \quad (3)$$

Di mana, m_{bm} adalah massa biomassa yang digunakan, sedangkan m_{bt} massa batubara yang digunakan, CV_{bm} nilai kalori biomassa yang digunakan dan CV_{bt} nilai kalori batubara yang digunakan.

Setelah diperoleh performa pembangkit dengan menghitung efisiensi penyediaan tenaga listrik, tahap berikutnya adalah menilai keekonomian, aspek yang

dihitung adalah Harga Patokan Tertinggi (HPT) biomassa dan Biaya Pokok Produksi (BPP) listrik atau komponen C. HPT biomassa diperlukan untuk menilai kelayakan penggunaan biomassa sebagai bahan bakar *co-firing*. HPT biomassa dihitung berdasarkan regulasi nasional dalam Permen ESDM No. 12 Tahun 2023 tentang pemanfaatan biomassa pada PLTU [14],

$$HPT \text{ Biomassa} = \text{Harga Batubara CIF} \times Fk \times Fc \quad (4)$$

$$Fc = \frac{CV \text{ Biomassa } (kCal/kg)}{CV \text{ Batubara } (kCal/kg)} \quad (5)$$

Harga batubara termasuk biaya transportasi (CIF) merupakan harga rata-rata batubara tiga bulan terakhir, Fk adalah faktor koreksi tambahan atas penggunaan biomassa dengan besaran 0,85 hingga maksimal 1,2 berdasarkan ketentuan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral [14], sedangkan Fc merupakan faktor koreksi nilai kalori penggunaan bahan bakar. Biaya pokok produksi listrik dihitung untuk mengetahui pengaruh

penggunaan bahan bakar biomassa dalam sistem *co-firing* terhadap biaya pembangkitan listrik. Apabila harga biomassa tinggi atau melebihi HPT, penggunaannya masih dapat dipertimbangkan. Hal ini dimungkinkan apabila BPP listrik (komponen C) menunjukkan penurunan atau tetap lebih rendah dibandingkan skenario tanpa *co-firing* [13], BPP listrik dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut,

$$\text{Biaya Produksi} = \text{Harga bahan bakar} \times \text{SFC}$$

(6)

Analisis penghematan biaya produksi listrik dilakukan untuk seluruh skenario *co-firing* pada PLTU Tenayan dan PLTU Tembilahan, dengan membandingkan hasil antara biaya produksi operasi batubara murni dan campuran biomassa. Aspek lingkungan dianalisis melalui pengukuran emisi SO₂ dan NO_x dari masing-masing skenario *co-firing*. Hasil pengukuran dibandingkan dengan baku mutu emisi PLTU batubara sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) No. 15 Tahun 2019, yaitu baku mutu emisi SO₂ maksimal 550 mg/Nm³ dan baku mutu emisi NO_x maksimal 550 mg/Nm³ [15]. Dengan demikian, metodologi ini tidak hanya bertujuan untuk memastikan bahwa implementasi *co-firing* biomassa dapat meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya produksi, tetapi juga memastikan keberlanjutan lingkungan sesuai baku mutu yang berlaku di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Skenario *Co-Firing* dan Karakteristik Bahan Bakar (Uji Proksimat dan Nilai Kalor)

Uji coba *co-firing* menggunakan limbah industri kelapa sawit di Riau dilakukan pada PLTU Tenayan dan PLTU Tembilahan. PLTU Tenayan dilakukan uji *co-firing* menggunakan PKS 5% pada Unit 2 dengan durasi pengujian 8 jam dan menggunakan Pellet EFB 5% pada Unit 1 dengan durasi pengujian 8 jam. PLTU Tembilahan menggunakan limbah industri kelapa sawit PKS 50% pada Unit 2 dengan durasi pengujian 6 jam dan Pellet EFB 5% pada Unit 2 durasi pengujian 8 jam. Tabel 1 menyajikan skenario *co-firing* dan konsumsi bahan bakar di PLTU Tenayan (TNY) dan PLTU Tembilahan (TBH) dan Tabel 2 menunjukkan hasil uji proksimat PKS dan pellet EFB.

Tabel 1 Skenario *Co-Firing* dan Konsumsi Bahan Bakar

Skenario Co-Firing (% Biomassa)	Durasi (Jam)	Biomassa (Ton)	Batubara (Ton)	Total (Ton)
5% PKS PLTU TNY	8	32	608	640
50% PKS PLTU TBH	6	24	24	48
5% Pellet EFB PLTU TNY	8	32	608	640
5% Pellet EFB PLTU TBH	8	3,2	60,8	64

Tabel 2 Uji Proksimat, Karakteristik Bahan Bakar PKS dan Pellet EFB

Parameter	Unit (Ar)	PKS PLTU TNY	PKS PLTU TBH	Pellet EFB PLTU TNY	Pellet EFB PLTU TBH
Proksimat					
Total Moisture	%	7.30	17.9	12.06	13.31
Ash Content	%	2.91	1.87	3.83	1.35
Volatile Matter	%	77.06	71.15	67.41	74.43
Fixed Carbon	%	12.73	17.51	16.7	10.91
Total Sulphur	%	0.08	0.10	0.12	0.08
Gross Calorific Value	kCal/kg	4,247	4,190	4,447	4,084
Hargrove Grindability Index	-	<32	-	-	<32
Bulk Density	kg/m ³	632	-	75.94	405
Chloride (Cl ⁻)	%	0.1	-	0.08	0.3

Pada skenario *co-firing* 5% di PLTU Tenayan, biomassa (PKS maupun pellet EFB) hanya

menyumbang ±32 ton per 8 jam operasi, sedangkan batubara tetap dominan (608 ton). Kontribusi biomassa

terhadap energi relatif kecil (~5%), sesuai target implementasi awal *co-firing* skala besar. Sebaliknya, pada PLTU Tembilahan (kapasitas lebih kecil), skenario 50% PKS menunjukkan substitusi signifikan menggunakan 24 ton PKS. Selanjutnya, untuk mengetahui karakteristik bahan bakar biomassa, dilakukan uji proksimat dan nilai kalor. PKS Tenayan memiliki kadar air (moisture) rendah (7,3%) dibandingkan dengan PKS Tembilahan (17,9%), sehingga lebih stabil dan efisien saat pembakaran. Kandungan abu (ash content) biomassa relatif rendah (<4%). Nilai kalor biomassa berkisar 4,084–4,447 kCal/kg, sebanding dengan batubara low rank yang digunakan PLTU (~4,200 kCal/kg). Pellet EFB Tenayan memiliki nilai kalor tertinggi (4,447 kCal/kg), namun kadar Cl⁻ 0.3% pada biomassa EFB PLTU

Tembilahan berpotensi meningkatkan risiko korosi, chlorine content >0,2% dalam biomassa dapat mempercepat degradasi tube boiler [16].

Analisi Efisiensi Penyediaan Tenaga Listrik dengan Sistem *Co-Firing*

Analisis efisiensi penyediaan tenaga listrik pada PLTU Tenayan dan PLTU Tembilahan dilakukan dengan membandingkan parameter kinerja operasi pada berbagai skenario *co-firing* biomassa, yaitu penggunaan PKS dan pellet EFB. Data kinerja operasi yang meliputi energi listrik gross dan netto, konsumsi bahan bakar, *Specific Fuel Consumption* (SFC), nilai kalor (NK) bahan bakar, serta *Net Plant Heat Rate* (NPHR) disajikan pada Tabel 3,

Tabel 3 Kinerja Operasi PLTU pada Skenario *Co-Firing*

Parameter	Satuan	0% PKS TNY	5% PKS TNY	0% Pellet EFB TNY	5% Pellet EFB TNY	0% PKS TBH	50% PKS TBH	0% Pellet EFB TBH	5% Pellet EFB TBH
Setting Beban Gross	kW	89,000		94,000		7,000		6,500	
Energi Listrik Gross	kWh	350,276	346,680	368,141	364,858	28,610	28,280	150,250	62,960
Energi Listrik Netto	kWh	306,081	302,749	325,800	316,662	25,314	24,852	118,546	50,450
Total Konsumsi Bahan Bakar	kg	305,219	296,594	257,281	273,344	33,500	22,201	167,649	65,000
SFC	kg/kWh	0.871	0.856	0.699	0.749	1.171	0.785	1.116	1.032
NK Batubara	kCal/kg	4,199		4,133		4,014		4,047	
NK Biomassa	kCal/kg	4,247		4,447		4,190		4,084	
NPHR	kCal/kWh	4,187.17	4,115.98	3,263.79	3,581.18	5,312.04	3,625.09	5,723.31	5,226.09
Jumlah Energi Biomassa	kWh	0	17,522	0	19,555	0	7,300	0	3,175

Pada PLTU Tenayan, *co-firing* 5% PKS menghasilkan penurunan SFC dari 0.871 kg/kWh menjadi 0.856 kg/kWh, yang menunjukkan peningkatan efisiensi pembangkit. Hal ini juga tercermin pada perbaikan NPHR dari 4,187 kCal/kWh menjadi 4,116 kCal/kWh. Energi listrik netto sedikit menurun dari 306,081 kWh menjadi 302,749 kWh, sementara total konsumsi bahan bakar menurun dari 305,219 kg menjadi 296,594 kg. Sebaliknya, penggunaan 5% pellet EFB di PLTU Tenayan menaikkan SFC dari 0.699 kg/kWh menjadi 0.749 kg/kWh dan meningkatkan NPHR dari 3,264 kCal/kWh menjadi 3,581 kCal/kWh, yang mengindikasikan penurunan efisiensi. Energi

listrik netto juga menurun dari 325.800 kWh menjadi 316.662 kWh, dengan konsumsi bahan bakar meningkat dari 257,281 kg menjadi 273,344 kg.

Di PLTU Tembilahan, *co-firing* 50% PKS memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan, dengan penurunan SFC dari 1.171 kg/kWh menjadi 0.785 kg/kWh dan perbaikan NPHR dari 5,312 kCal/kWh menjadi 3,625 kCal/kWh. Energi listrik netto menurun sedikit dari 25,314 kWh menjadi 24,852 kWh, Konsumsi bahan bakar turun drastis dari 33,500 kg menjadi 22,201 kg. Penggunaan 5% pellet EFB di PLTU Tembilahan juga menurunkan SFC dari 1.116 kg/kWh menjadi 1.032 kg/kWh dan

memperbaiki NPHR dari 5,723 kCal/kWh menjadi 5,226 kCal/kWh, dengan energi listrik netto menurun dari 118,546 kWh menjadi 50,450 kWh dan konsumsi bahan bakar menurun dari 167,649 kg menjadi 65,000 kg.

Nilai kalor batubara dan biomassa juga berperan dalam efisiensi pembangkit. NK batubara pada PLTU Tenayan berkisar antara 4,014 hingga 4,199 kCal/kg, sedangkan NK biomassa limbah industri sawit berkisar antara 4,084 hingga 4,447 kCal/kg. Pada PLTU Tembilahan, nilai kalor batubara dan biomassa menunjukkan pola serupa. Jumlah energi biomassa yang digunakan bervariasi sesuai proporsi *co-firing*, dengan kontribusi energi biomassa tertinggi pada skenario 5% pellet EFB di PLTU Tenayan (19,555 kWh) dan 50% PKS di PLTU Tembilahan (7,300 kWh). Total energi bersih yang dibangkitkan melalui sistem *co-firing* menggunakan bahan bakar biomassa limbah industri kelapa sawit di Provinsi Riau adalah sebesar 48 MWh.

Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa *co-firing* biomassa, khususnya PKS, dapat

meningkatkan efisiensi penyediaan tenaga listrik dengan menurunkan konsumsi bahan bakar fosil dan meningkatkan performa termal pembangkit. Namun, penggunaan pellet EFB perlu diperhatikan karena potensi peningkatan SFC dan NPHR yang dapat menurunkan efisiensi operasional dan bentuk limbah yang berupa serat/*fiber* dapat menyebabkan timbulnya permasalahan *plugging* pada jalur bahan bakar sehingga dilakukan pelletisasi untuk meminimalkan kendala tersebut.

Analisis Ekonomi *Co-Firing*

Analisis ekonomi *co-firing* dilakukan dengan membandingkan biaya produksi listrik pada berbagai skenario penggunaan biomassa sebagai bahan bakar campuran di PLTU Tenayan dan PLTU Tembilahan. Harga acuan bahan bakar yang digunakan dalam perhitungan disajikan pada Tabel 4, meliputi harga batubara, PKS, dan pellet EFB di masing-masing PLTU.

Tabel 4 Harga Acuan Bahan Bakar

Keterangan	Satuan	Nilai
Harga Batubara Acuan II (HBA 2)	Rp/Kg	788.64
Harga PKS PLTU TNY	Rp/Kg	1,000.00
Harga PKS PLTU TBH	Rp/Kg	1,200.00
Harga Pellet EFB PLTU TNY	Rp/Kg	5,000.00
Harga Pellet EFB PLTU TBH	Rp/Kg	1,937.20
Harga Patokan Tertinggi PKS TNY	Rp/Kg	957.19
Harga Patokan Tertinggi PKS TBH	Rp/Kg	987.86
Harga Patokan Tertinggi Pellet EFB TNY	Rp/Kg	1,018.27
Harga Patokan Tertinggi Pellet EFB TBH	Rp/Kg	955.02

Harga batubara acuan II (HBA 2) digunakan untuk menghitung Harga Patokan Batubara (HPB), dengan kalori lebih besar dari 3.400 kcal/kg GAR sampai kurang dari 5.300 kcal/kg GAR. PLTU Tenayan dan PLTU Tembilahan menggunakan batubara jenis *low range* yang tergolong pada HBA 2, dengan harga sebesar Rp788.64/kg (nilai rata-rata 3 bulan terakhir) menjadi dasar perhitungan biaya bahan bakar fosil [17]. Harga PKS di PLTU Tenayan dan Tembilahan masing-masing sebesar Rp1.000/kg dan Rp1.200/kg, sedangkan harga pellet EFB di PLTU Tenayan lebih

tinggi, yaitu Rp5.000/kg, dibandingkan Rp1.937,20/kg di PLTU Tembilahan. Harga Patokan Tertinggi (HPT) untuk masing-masing biomassa juga dicantumkan sebagai standar regulasi kebijakan nasional dalam pemanfaatan biomassa, terlihat bahwa harga biomassa limbah industri kelapa sawit di Riau melebihi batasan HPT, sesuai dengan laporan penelitian sebelumnya yang menemukan bahwa harga biomassa dari limbah industri kelapa sawit di Riau tinggi [18]. Selanjutnya dilakukan analisis biaya produksi listrik yang ditampilkan pada Tabel 5,

Tabel 5 Biaya Produksi Listrik PLTU pada Berbagai Skenario

Keterangan	Satuan	Nilai
Biaya Produksi 0% PKS TNY	Rp/kWh	687.19
Biaya Produksi 5% PKS TNY	Rp/kWh	683.74
Biaya Produksi 0% PKS TBH	Rp/kWh	923.43
Biaya Produksi 50% PKS TBH	Rp/kWh	699.85
Biaya Produksi 0% Pellet EFB TNY	Rp/kWh	551.15
Biaya Produksi 5% Pellet EFB TNY	Rp/kWh	748.59
Biaya Produksi 0% Pellet EFB TBH	Rp/kWh	879.96
Biaya Produksi 5% Pellet EFB TBH	Rp/kWh	873.48
Penghematan 5% PKS TNY	Rp/kWh	3.45
Penghematan 50% PKS TBH	Rp/kWh	223.58
Penghematan 5% Pellet EFB TNY	Rp/kWh	-197.43
Penghematan 5% Pellet EFB TBH	Rp/kWh	6.48

Berdasarkan data pada Tabel 5, biaya produksi listrik pada PLTU Tenayan dengan 5% PKS mengalami penurunan dari Rp 687,19/kWh menjadi Rp 683,74/kWh, menghasilkan penghematan sebesar Rp 3,45/kWh dibandingkan dengan skenario tanpa *co-firing*. Di PLTU Tembilahan, *co-firing* 50% PKS memberikan penghematan biaya produksi yang signifikan, yaitu sebesar Rp223,58/kWh, dengan biaya produksi turun dari Rp923,43/kWh menjadi Rp699,85/kWh. Sebaliknya, penggunaan 5% pellet EFB di PLTU Tenayan justru meningkatkan biaya produksi listrik dari Rp551.15/kWh menjadi Rp748.59/kWh, sehingga terjadi kenaikan biaya sebesar Rp197.43/kWh. Hal ini disebabkan oleh harga pellet EFB yang relatif tinggi di PLTU Tenayan. Di PLTU Tembilahan, penggunaan 5% pellet EFB menurunkan biaya produksi listrik sedikit dari Rp 879,96/kWh menjadi Rp 873,48/kWh, menghasilkan penghematan sebesar Rp 6,48/kWh.

Hasil analisis ini menunjukkan bahwa *co-firing* dengan PKS lebih ekonomis dan memberikan penghematan biaya produksi listrik yang nyata, terutama pada proporsi *co-firing* yang lebih tinggi seperti 50% di PLTU Tembilahan. Sementara itu, penggunaan pellet EFB perlu diperhatikan dari sisi harga bahan bakar yang relatif mahal, sehingga dapat meningkatkan biaya produksi listrik jika tidak diimbangi dengan efisiensi operasional yang memadai. Dengan demikian, pemilihan jenis biomassa dan proporsi *co-firing* yang optimal sangat penting untuk mencapai efisiensi ekonomi yang maksimal dalam penyediaan tenaga listrik berbasis *co-firing* biomassa di PLTU.

Gambar 1 menunjukkan hubungan antara SFC, NPHR, dan biaya produksi listrik pada berbagai skenario *co-firing* di PLTU Tenayan dan PLTU Tembilahan. Terlihat bahwa *co-firing* PKS, khususnya pada skenario 50% PKS di PLTU Tembilahan,

memberikan perbaikan paling signifikan dengan penurunan SFC dan NPHR yang disertai pengurangan biaya produksi hingga $\pm$ Rp223/kWh. Skenario 5% PKS di PLTU Tenayan juga menunjukkan tren serupa meskipun dengan skala lebih kecil. Sebaliknya, penggunaan pellet EFB cenderung meningkatkan biaya produksi dan dalam beberapa kasus menaikkan SFC maupun NPHR, sehingga mengindikasikan efisiensi yang lebih rendah. Secara visual, distribusi titik pada grafik mengonfirmasi bahwa PKS lebih unggul dalam aspek teknis dan ekonomis dibandingkan dengan pellet EFB, serta menegaskan pentingnya pemilihan jenis biomassa dan proporsi *co-firing* yang tepat untuk mencapai efisiensi optimal.

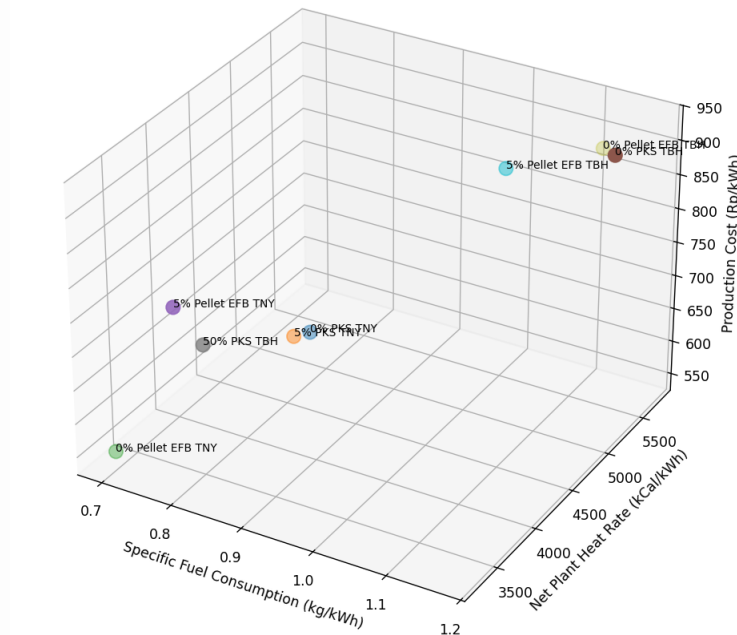
Analisis Dampak Lingkungan (Emisi Gas Buang)

Analisis dampak lingkungan difokuskan pada pengukuran emisi gas buang utama, yaitu sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO_x), pada PLTU Tenayan dan PLTU Tembilahan selama skenario *co-firing* biomassa. Data emisi yang diperoleh disajikan pada Tabel 6, sedangkan baku mutu emisi yang berlaku mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 15 Tahun 2019, dengan nilai maksimal pada SO₂ dan NO_x untuk PLTU sebesar 550 mg/Nm³ [15].

Berdasarkan hasil pengukuran, emisi SO₂ pada PLTU Tenayan menurun dari 277,4 mg/Nm³ pada pembakaran batubara murni menjadi 200,2 mg/Nm³ saat *co-firing* 5% PKS. Penurunan serupa juga terjadi pada penggunaan pellet EFB, dari 323,15 mg/Nm³ menjadi 303,72 mg/Nm³. Di PLTU Tembilahan, emisi SO₂ pada skenario pellet EFB menurun dari 147,29 mg/Nm³ menjadi 97,24 mg/Nm³. Data emisi SO₂ untuk skenario *co-firing* PKS di PLTU Tembilahan tidak tersedia (N/A), dikarenakan pengukuran emisi SO₂ mengalami permasalahan saat pengambilan data, di mana dua alat yang telah disiapkan menunjukkan nilai

sangat rendah atau tidak terbaca. Penurunan emisi SO_2 ini menunjukkan bahwa pencampuran biomassa dengan batubara dapat mengurangi konsentrasi sulfur

dioksida yang dihasilkan selama pembakaran, mengingat biomassa umumnya memiliki kandungan sulfur yang lebih rendah dibandingkan batubara.



Gambar 1 Hubungan antara SFC, NPHR, dan biaya produksi listrik pada berbagai skenario *co-firing*

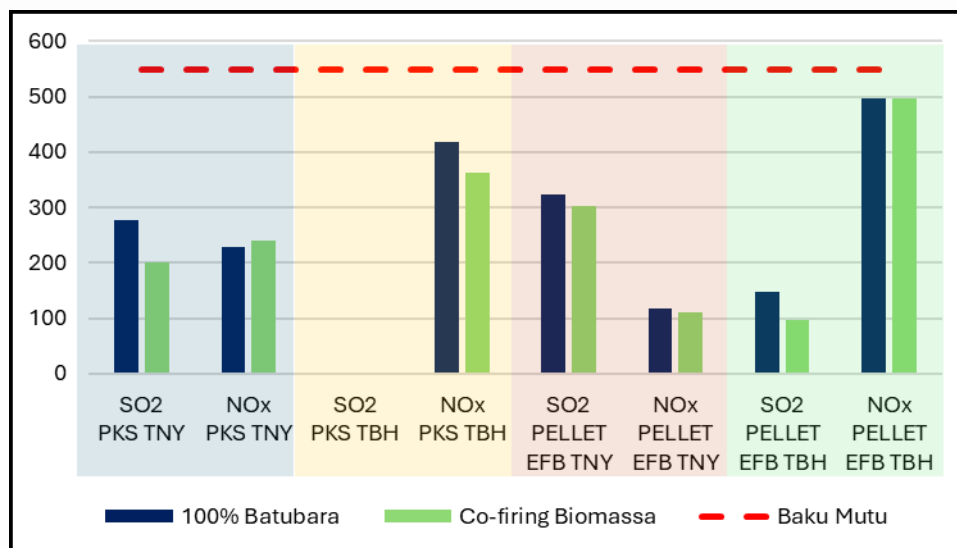
Tabel 6 Emisi Gas Buang PLTU pada Skenario *Co-Firing*

Emisi Satuan	0% PKS TNY	5% PKS TNY	0% PKS TBH	50% PKS TBH	0% Pellet EFB TNY	5% Pellet EFB TNY	0% Pellet EFB TBH	5% Pellet EFB TBH
SO_2 mg/Nm ³	277.4	200.2	N/A	N/A	323.15	303.72	147.29	97.24
NO_x mg/Nm ³	227.6	239.9	419.2	363.5	117.85	110.51	498.15	497.47

Untuk emisi NO_x , hasilnya bervariasi. Di PLTU Tenayan, emisi NO_x sedikit meningkat dari 227.6 mg/Nm³ menjadi 239.9 mg/Nm³ pada *co-firing* 5% PKS, sedangkan penggunaan pellet EFB menurunkan emisi NO_x dari 117.85 mg/Nm³ menjadi 110.51 mg/Nm³. Di PLTU Tembilahan, emisi NO_x menurun dari 419.2 mg/Nm³ menjadi 363.5 mg/Nm³ pada *co-firing* 50% PKS, namun hampir tidak berubah pada skenario pellet EFB (498.15 mg/Nm³ menjadi 497.47 mg/Nm³). Penurunan emisi NO_x pada beberapa skenario *co-firing* ini dapat disebabkan oleh perubahan karakteristik pembakaran dan suhu flame yang dipengaruhi oleh biomassa.

Semua nilai emisi SO_2 dan NO_x yang diukur masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 15

Tahun 2019, yaitu 550 mg/Nm³ untuk SO_2 dan 550 mg/Nm³ untuk NO_x pada pembangkit batubara. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan *co-firing* biomassa tidak menyebabkan pelanggaran terhadap standar emisi yang berlaku dan dapat menjadi alternatif yang ramah lingkungan dalam penyediaan tenaga listrik. Secara keseluruhan, hasil analisis emisi ini mengindikasikan bahwa *co-firing* biomassa, khususnya PKS dan pellet EFB, berpotensi mengurangi emisi sulfur dioksida dan mempertahankan atau menurunkan emisi nitrogen oksida pada PLTU. Dengan demikian, *co-firing* biomassa tidak hanya mendukung efisiensi dan ekonomi pembangkit, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan yang signifikan dalam rangka transisi energi berkelanjutan.



Gambar 2 Pengujian emisi gas buang

KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa *co-firing* biomassa limbah industri kelapa sawit, khususnya *Palm Kernel Shell* (PKS), pada PLTU Tenayan dan PLTU Tembilahan efektif meningkatkan efisiensi penyediaan tenaga listrik. *Co-firing* 5% PKS di PLTU Tenayan menurunkan *Specific Fuel Consumption* (SFC) dari 0.871 menjadi 0.856 kg/kWh dan *Net Plant Heat Rate* (NPHR) dari 4,187 menjadi 4,116 kCal/kWh. Pada PLTU Tembilahan, *co-firing* 50% PKS menurunkan SFC secara signifikan dari 1.171 menjadi 0.785 kg/kWh dan NPHR dari 5,312 menjadi 3,625 kCal/kWh. Dari sisi ekonomi, *co-firing* PKS menghasilkan penghematan biaya produksi listrik hingga Rp223,58/kWh pada PLTU Tembilahan. Emisi sulfur dioksida (SO₂) menurun hingga 27,8% pada PLTU Tenayan dan 34% pada PLTU Tembilahan (pada skenario pellet EFB), sedangkan emisi nitrogen oksida (NO_x) relatif stabil atau menurun hingga 13% pada beberapa skenario *co-firing*. Penggunaan pellet *Empty Fruit Bunch* (EFB) menunjukkan peningkatan SFC dan biaya produksi listrik, terutama di PLTU Tenayan, akibat harga bahan bakar yang lebih tinggi dan potensi masalah teknis seperti plugging. Berdasarkan data pengujian, total energi bersih yang dibangkitkan melalui sistem *co-firing* dengan pemanfaatan limbah industri kelapa sawit di Provinsi Riau menghasilkan 48 MWh energi bersih, setara dengan pengurangan emisi karbon sebesar ±37,7 ton CO₂.

Penelitian ini memberikan kontribusi teknis, ekonomi, dan lingkungan dalam mendukung implementasi *co-firing* biomassa di PLTU skala

komersial di wilayah sentra sawit. Namun, temuan ini masih terbatas pada periode pengujian yang singkat. Oleh karena itu, studi jangka panjang diperlukan untuk mengevaluasi dampak pemanfaatan limbah industri kelapa sawit sebagai bahan bakar biomassa dalam sistem *co-firing* terhadap integritas boiler, kestabilan operasi dan performa emisi secara berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan selama pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih khusus disampaikan kepada manajemen dan staf PLTU Tenayan dan PLTU Tembilahan yang telah memberikan izin dan fasilitas untuk pengambilan data lapangan. Kami juga berterima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Riau atas dukungan akademik. Tidak lupa, penghargaan kami sampaikan kepada rekan-rekan sejawat yang telah memberikan masukan dan saran konstruktif selama proses penyusunan makalah ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Aulia Ramadhana bertanggung jawab atas perancangan penelitian, pengambilan dan pengolahan data, serta penulisan naskah asli. Anita Susilawati dan Asral Asral berkontribusi dalam analisis data dan pembuatan gambar pendukung. Dodi Sofyan Arief dan Dinni Agustina berperan dalam supervisi teknis, penyusunan metode pengujian, serta pengaturan setup peralatan di lapangan. Semua penulis turut berpartisipasi dalam review dan revisi naskah hingga siap untuk publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] “Pemutakhiran Data Potensi Energi Terbarukan, P3TKEBTKE, Balitbang Energi dan Sumber Daya Mineral,” 2021.
- [2] *Outlook Kelapa Sawit*. Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian, Sekretariat Jenderal - Kementerian Pertanian, 2024.
- [3] A. Brunerová, M. Müller, V. Šleger, H. Ambarita, and P. Valášek, “Bio-pellet fuel from oil palm empty fruit bunches (EFB): Using European standards for quality testing,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 12, Nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/su10124443>.
- [4] M. Aziz, D. Budianto, and T. Oda, “Computational fluid dynamic analysis of co-firing of palm kernel shell and coal,” *Energies (Basel)*, vol. 9, no. 3, Mar. 2016, doi: <https://doi.org/10.3390/en9030137>.
- [5] M. Z. E. Prayoga, H. P. Putra, and N. Adelia, “Co-combustion performance of oil palm biomass with coal: thermodynamics and kinetics analyses,” *J Therm Anal Calorim*, vol. 7, p. 149, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12865-z>.
- [6] Z. Arifin, V. F. S. Insani, M. Idris, K. R. Hadiyati, Z. Anugia, and D. Irianto, “Techno-Economic Analysis of Co-firing for Pulverized Coal Boilers Power Plant in Indonesia,” *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 12, no. 2, pp. 261–269, Mar. 2023, doi: <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.48102>.
- [7] M. F. Praevia and W. Widayat, “Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Cofiring pada PLTU Batubara,” *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 1, pp. 28–37, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.14710/jekk.v%25vi%25i.13367>.
- [8] J. Dian, I. B. Novendianto, and F. Z. Rhamadhan, “Analysis of Co-firing in 25 MW CFB Boiler Coal-fired Power Plant Using Palm Kernel Shell to Support Indonesia Energy Transition,” in *2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, 2023, pp. 127–131. doi: <https://doi.org/10.1109/ICHVEPS58902.2023.10257444>.
- [9] D. N. Palupi, S. Sundari, M. I. Syahtaria, and L. Sianipar, “Analisis Dampak Lingkungan dan Keekonomian Pembangkit Listrik Tenaga Co-firing Biomassa dan Baru bara sebagai Upaya Bauran Energi Terbarukan,” vol. 5, p. 1363, 2024, doi: <https://doi.org/10.47467/elmal.v5i3>.
- [10] J. Lou, C. Squire, and T. Hilde, “Evaluating the Viability of Co-Firing Biomass Waste to Mitigate Coal Plant Emissions in Indonesia,” Nov. 20, 2023. doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3481484/v1>.
- [11] A. Tajalli, *Panduan Penilaian Potensi Biomassa Sebagai Sumber Energi Alternatif Di Indonesia*. Penabulu Alliance, 2015.
- [12] *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 9 Tahun 2020 tentang Efisiensi Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (Persero)*. 2020. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/142178/>
- [13] *Pedoman Pelaksanaan Co-firing Pembangkit Listrik Tenaga Uap Berbahan Bakar Batubara dengan Bahan Bakar Biomassa*. 2020. [Online]. Available: <https://www.hukumonline.com/pusatdata/detail/lt611a29de9a5d6/peraturan-direksi-pt-pln-persero-nomor-001p-dir-2020-tahun-2020/>
- [14] *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 12 Tahun 2023 tentang Pemanfaatan Bahan Bakar Biomassa Sebagai Campuran Bahan Bakar Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap*. 2023. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/291410/permen-esdm-no-12-tahun-2023>
- [15] *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Nomor 15 Tahun 2019 tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal*. 2019. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/286526/permen-lhk-no-15-tahun-2019>
- [16] H. Zhang and C. Yu, “Experimental Study on Co-Firing of Coal and Biomass in Industrial-Scale Circulating Fluidized Bed Boilers,” *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 14, Jul. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/en18143832>.
- [17] “Harga Mineral dan Batubara Acuan: Direktorat Jendral Mineral dan Batubara,” 2025. [Online]. Available: https://www.minerba.esdm.go.id/harga_acuan#
- [18] A. Ramadhan, A. Susilawati, and N. Nazaruddin, “Development of a Python-Based Decision Support System for Evaluating Biomass Price Feasibility in Co-Firing Applications: Evidence from Riau, Indonesia,” *JOMase | Received*, vol. 69, no. 2, pp. 138–145, 2025, doi: <http://dx.doi.org/10.36842/jomase.v69i2.542>.