Scientific Exploration: Journal of Indonesian Academic Research
ISSN (Online) 3031-075X, **Vol. 3 No. 1, April**, Page 1-13
DOI: https://doi.org/10.25134/scientificexploration.v3i1.58
Published online on the journal's webpage: www.sains.uniku.ac.id

Analisis Tekno-Ekonomi Penerapan Co-Firing Biomassa Serbuk Kayu pada PLTU 3 × 350 MW

Panji Narputro[a,1], Marina Artiyasa[a,2], Cahya Laxa Eka Putra[a,3], Trisiani Dewi Hendrawati[a,4], Fikri Arif Wicaksana[a,5]

[a]Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Komputer, dan Desain Universitas Nusa Putra.

[1]panji.narputro@nusaputra.ac.id, [2]marina.artiyasa@nusaputra.ac.id,
[3]cahya.laxa_te20@nusaputra.ac.id, [4]trisiani.dewi.hendrawati@nusaputra.ac.id,
[5]fikri.arif.wicaksana@nusaputra.ac.id

Abstract—Peningkatan kebutuhan energi listrik di Indonesia masih didominasi oleh pembangkit berbasis batubara, yang memberikan kontribusi besar terhadap emisi gas rumah kaca. Salah satu solusi transisi energi yang berpotensi diterapkan tanpa investasi besar adalah teknologi co-firing biomassa, yakni pencampuran batubara dengan bahan bakar alternatif seperti serbuk kayu. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan dari penerapan co-firing biomassa serbuk kayu pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berkapasitas 3 × 350 MW. Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif melalui studi kasus operasional nyata di unit PLTU, dengan perbandingan data sebelum dan sesudah co-firing. Hasil penelitian menunjukkan bahwa co-firing dengan rasio 5% serbuk kayu dan 95% batubara menurunkan biaya produksi listrik dari Rp 631/kWh menjadi Rp 593/kWh, dan meningkatkan efisiensi pembangkit melalui penurunan heat rate dari 3.220 kCal/kWh menjadi 2.953 kCal/kWh. Namun, meskipun emisi NOx, debu, dan Hg mengalami penurunan, terjadi kenaikan emisi CO dan SO_2 yang perlu dikendalikan melalui optimasi proses pembakaran. Secara keseluruhan, penerapan co-firing biomassa memberikan manfaat signifikan dari sisi ekonomi dan efisiensi teknis, namun memerlukan pengawasan lingkungan yang ketat untuk memastikan keberlanjutan operasional.
Kata Kunci— PLTU, co-firing, serbuk kayu, efisiensi pembangkit, emisi gas buang, energi terbarukan.

Abstract— The increase in electricity demand in Indonesia is still dominated by coal-based power plants, which make a major contribution to greenhouse gas emissions. One of the energy transition solutions that has the potential to be implemented without large investment is biomass co-firing technology, which is the mixing of coal with alternative fuels such as wood powder. This study aims to analyze the technical, economic, and environmental aspects of the application of wood powder biomass co-firing in a 3 × 350 MW Steam Power Plant (PLTU). The method used is a quantitative approach through real operational case studies in coal-fired power plants, with a comparison of data before and after co-firing. The results showed that co-firing with a ratio of 5% wood powder and 95% coal reduced the cost of electricity production from Rp 631/kWh to Rp 593/kWh, and improved the efficiency of the plant through a reduction in heat rate from 3,220 kCal/kWh to 2,953 kCal/kWh. However, although NOx, dust, and Hg emissions have decreased, there has been an increase in CO and SO_2 emissions that need to be controlled through combustion process optimization. Overall, the implementation of biomass co-firing provides significant economic benefits and technical efficiency, but requires strict environmental oversight to ensure operational sustainability.
Keywords—Coal-fired power plants, co-firing, wood powder, plant efficiency, exhaust emissions, renewable energy.

This is an open access article under the CC BY-SA License.

Corresponding Author:
Author [panji narputro],
Department [Teknik Elektro],
Institution [Universitas Nusa Putra],
Email [panji.narputro@nusaputra.ac.id]

Article Info:
Received: 22 – 04 - 2025
Accepted: 04 – 08 – 2025
Published: 07 – 08 – 2025

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik nasional terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, aktivitas industri, dan perkembangan ekonomi. Namun, pemenuhan kebutuhan energi tersebut masih didominasi oleh sumber energi fosil, khususnya batubara, yang berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca (Alnavis et al., 2024; Sasana & Eka Putri, 2018). Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) menjadi salah satu penyumbang utama emisi karbon dioksida (CO_2), sulfur dioksida (SO_2), dan partikulat debu. Studi menemukan bahwa rata-rata 100,16 t CO_2/TJ, lebih tinggi dibandingkan ambang batas *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) dan sedikit lebih rendah dibandingakan ambang batas nasional Indonesia (Prakarsa & Dewi, 2024). Beberapa studi yang lain mengindikasikan pula bahwa PLTU di Indonesia memproduksi hampir 800 ton CO_2 eq/GWh dan 0.6 ton SO_2 eq/GWh (Arsyad & Setiadi, 2020). Diperlukan upaya sistematis untuk mengintegrasikan sumber energi alternatif rendah karbon ke dalam sistem pembangkitan listrik nasional (Septiani et al., 2021). Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah penerapan teknologi co-firing, yaitu pembakaran campuran batubara dengan biomassa sebagai bahan bakar parsial untuk menurunkan dampak lingkungan tanpa harus mengubah struktur utama pembangkit (R. JAYASHREE, 2024).

Indonesia memiliki potensi biomassa yang sangat besar dari sektor kehutanan, pertanian, dan industri perkebunan. Data dari Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi (EBTKE) menunjukkan bahwa potensi energi biomassa nasional mencapai sekitar 32,6 GW dengan total potensi energi sebesar 146,7 juta ton per tahun dan sebagian besar belum dimanfaatkan secara optimal (Primadita et al., 2020), (Palupi et al., 2023; Primadanty, 2024; Yana et al., 2022). Salah satu bentuk biomassa yang cukup melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal adalah serbuk kayu. Serbuk kayu merupakan limbah padat dari industri pengolahan kayu dan mebel.

Produk berbahan kayu gergaji di Indonesia rata-rata per tahun mencapai lebih dari 9 juta m^3, menghasilkan limbah serbuk kayu hingga 10–20% dari volume bahan baku kayu, atau setara 900.000–1,35 juta m^3 serbuk gergaji setiap tahun (YAYA et al., 2020). Serbuk kayu memiliki kandungan energi antara 3.500–4.500 kCal/kg, kadar abu yang relatif rendah, dan kandungan sulfur yang minimal, menjadikannya bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan dan mudah terurai (Pane et al., 2022). Pemanfaatan serbuk kayu sebagai bahan bakar co-firing tidak hanya mendukung bauran energi nasional, tetapi juga membantu mengurangi limbah padat industri kayu, serta memberikan nilai tambah ekonomi di sektor hulu. Dalam konteks transisi energi dan komitmen pengurangan emisi karbon, sawdust merupakan sumber biomassa yang menjanjikan

dan berpotensi diterapkan secara luas pada pembangkit berbasis batubara di Indonesia (Ilham & Suedy, 2022).

Dalam konteks transisi energi dan komitmen pengurangan emisi karbon, pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar dalam *co-firing* PLTU menjadi strategi penting. Penerapan biomassa tidak hanya mendukung bauran energi nasional, tetapi juga mendukung komitmen Indonesia dalam Perjanjian Paris (Paris Agreement) untuk menurunkan emisi karbon (Dian et al., 2023; Triani et al., 2022).

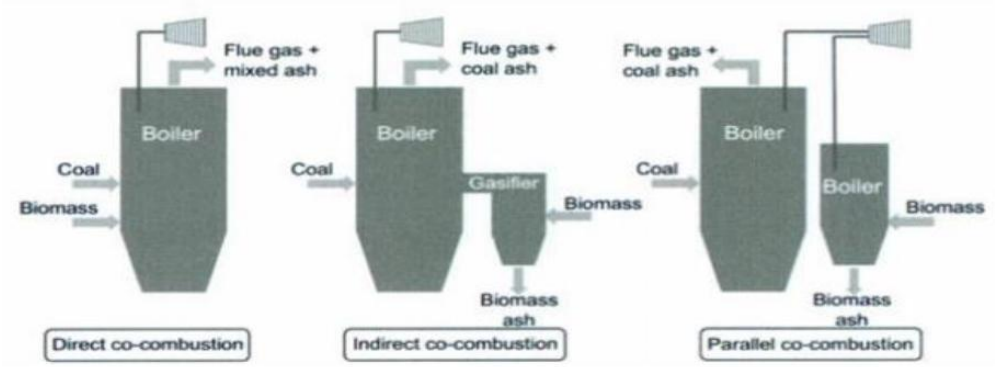
Teknologi *co-firing* merupakan teknik pembakaran dua jenis bahan bakar secara bersamaan, umumnya antara batubara dan biomassa, dalam satu sistem pembakaran. Terdapat tiga pendekatan utama co-firing yaitu: *direct co-firing, indirect co-firing*, dan *parallel co-firing* (Loha et al., 2020). Metode yang paling umum dan ekonomis digunakan di Indonesia adalah *direct co-firing*, karena dapat langsung diterapkan dengan memanfaatkan infrastruktur yang sudah ada di PLTU (Arifin et al., 2023). Teknologi ini memungkinkan biomassa dimasukkan bersamaan dengan batubara ke dalam sistem pembakaran, sehingga dapat menurunkan konsumsi batubara secara langsung tanpa mengurangi kapasitas produksi listrik. Namun demikian, penerapannya tetap membutuhkan kajian teknis, ekonomi, dan lingkungan yang komprehensif (Sugiyono et al., 2022).

Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas tentang dampak *co-firing* terhadap efisiensi boiler, emisi gas buang, dan karakteristik pembakaran, namun sebagian besar masih bersifat parsial dan belum mengintegrasikan analisis dari sisi ekonomi secara komprehensif, terutama pada pembangkit skala besar (Arifin et al., 2023; Mo et al., 2023; Triani et al., 2022). Beberapa studi bahkan hanya dilakukan secara simulasi atau terbatas pada unit skala kecil, sehingga belum cukup mewakili kondisi operasional nyata PLTU kapasitas tinggi (Haddad et al., 2021). Selain itu, isu kenaikan emisi tertentu seperti CO atau SO_2 akibat penggunaan biomassa juga belum dikaji secara mendalam dari perspektif efektivitas *co-firing*. Oleh karena itu, diperlukan studi berbasis data aktual operasi PLTU yang mengevaluasi aspek teknis dan ekonomi secara simultan(Arifin et al., 2023; Shamad et al., 2024; Triani et al., 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi penerapan teknologi co-firing biomassa jenis serbuk kayu pada PLTU dengan kapasitas 3 × 350 MW. Fokus evaluasi mencakup tiga aspek utama: pertama, analisis teknis meliputi efisiensi pembangkitan berdasarkan heat rate dan specific fuel consumption; kedua, analisis ekonomi yang dilihat dari biaya produksi listrik per kWh; dan ketiga, analisis dampak lingkungan berupa perubahan nilai emisi gas buang seperti CO, SO_2, dan partikulat debu. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi sebagai bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan teknis dan kebijakan operasional untuk penerapan *co-firing* biomassa di PLTU secara lebih luas di Indonesia.

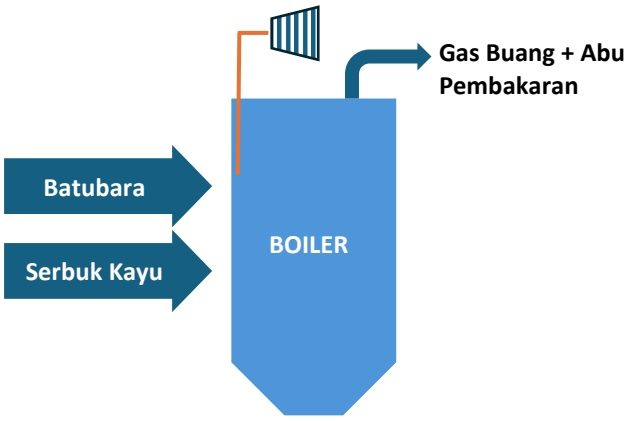
II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode studi kasus, yang bertujuan mengevaluasi dampak teknis dan ekonomi dari penerapan teknologi *co-firing* biomassa pada PLTU 3 × 350 MW. Metode ini dipilih untuk memperoleh data numerik yang dapat dianalisis secara objektif dan terukur. Fokus kajian diarahkan pada pembandingan kinerja operasional pembangkit sebelum dan sesudah implementasi *co-firing*, yang dianalisis melalui parameter konsumsi bahan bakar, efisiensi pembangkitan, biaya produksi listrik, dan emisi gas buang. Dengan pendekatan ini, peneliti dapat menggambarkan dampak nyata penggunaan biomassa sebagai bahan bakar parsial dalam sistem pembakaran PLTU.



~~**Gambar 1.** Metode *co-firing* batubara dengan biomasa (Power, 2012)~~

Penelitian dilakukan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berkapasitas 3 × 350 MW, yang berlokasi di Indonesia dan menggunakan konfigurasi boiler tipe subcritical SG-1200/17.5-M741. Waktu pengambilan data dilakukan pada dua titik observasi yaitu 14 Desember 2023 (sebelum co-firing) dan 31 Desember 2023 (sesudah co-firing). Pemilihan tanggal ini didasarkan pada kondisi beban harian pembangkit yang relatif sebanding, sehingga memungkinkan analisis perbandingan yang lebih objektif antar kedua kondisi. Co-firing diterapkan dengan rasio biomassa serbuk kayu sebesar 5%, dicampur bersama 95% batubara, menggunakan metode *direct co-firing*.



Gambar 1. Metode *direct co-firing* batubara dengan serbu kayu

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini meliputi parameter teknis operasional pembangkit, konsumsi bahan bakar, nilai kalor, emisi gas buang, serta informasi harga bahan bakar. Seluruh data diperoleh melalui observasi langsung, wawancara teknis, dan dokumentasi operasional dari unit terkait di PLTU. Berikut adalah rangkuman data yang digunakan:

Tabel 1. TABEL DATA OBSERVASI DAN DOKUMENTASI OPERASIONAL

No.	Jenis Data	Satuan	Keterangan
1	Konsumsi batubara	ton/jam	Sebelum dan sesudah co-firing
2	Konsumsi serbuk kayu (sawdust)	ton/jam	Hanya sesudah co-firing
3	Nilai kalor batubara dan biomassa	kCal/kg	Digunakan untuk menghitung heat rate
4	Produksi listrik bruto	kWh	Harian (per tanggal observasi)
5	Harga batubara dan biomassa	Rp/ton	Digunakan untuk analisis biaya bahan bakar
6	Emisi gas buang (CO, SO_2, NOx, dll)	mg/m³	Diukur melalui sistem CEMS
7	O_2, temperatur gas buang	% dan °C	Untuk mendukung pembacaan efisiensi pembakaran

Analisis ekonomi dilakukan dengan menghitung biaya produksi energi listrik berdasarkan formula biaya bahan bakar harian dan harga satuan energi (Rp/kWh). Rumus perhitungan yang digunakan mengacu pada formulasi dari PLN (2021) dan penelitian sejenis (Arisandi & Krishna Putra, 2023):

$$Biaya\ Produksi\ Listrik\ (Rp) = m \times Harga\ per\ Ton \times 24 \quad (1)$$

Sedangkan biaya produksi listrik per kWh dihitung berdasarkan rumus:

$$Biaya\ per\ kWh = SFC \times (\frac{Rp\ fuel}{kg}) \quad (2)$$

Untuk menghitung efisiensi teknis pembangkit, digunakan parameter *heat rate* dan *specific fuel consumption* (SFC). *Heat rate* menggambarkan jumlah energi panas dari bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu kilowatt-jam energi listrik, dengan satuan $kCal/kWh$, dihitung menggunakan metode input-output sebagai berikut (Alfarisi et al., 2024):

$$Heat\ Rate = \frac{Nilai\ Kalor \times Fuel\ Flow}{Daya\ Output\ (MW)} \quad (3)$$

Sedangkan *specific fuel consumption* dihitung dengan rumus:

$$SFC = \frac{Fuel\ flow\left(\frac{kg}{jam}\right)}{Daya\ (kWh)} \quad (4)$$

Untuk menilai pengaruh *co-firing* terhadap lingkungan, dilakukan pengukuran perubahan nilai emisi dengan membandingkan data sebelum dan sesudah *co-firing*. Data emisi diperoleh dari sistem CEMS dan dianalisis menggunakan formula persentase perubahan relatif sebagai berikut (Kurniawan Hardjana, 2010):

$$\%\ Emisi = \left(\frac{Nilai\ Sebelum - Nilai\ Sesudah}{Nilai\ Batas\ Emisi}\right) \times 100 \quad (5)$$

Standar acuan yang digunakan untuk menilai kelayakan emisi mengacu pada Peraturan Menteri LHK No. P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 mengenai baku mutu emisi PLTU, serta parameter ISPU (Indeks Standar Pencemar Udara) sebagaimana dicantumkan dalam referensi (Akbar, 2018; Arifin et al., 2023; KLHK, 2019).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini membahas tiga aspek utama dalam penerapan teknologi co-firing biomassa serbuk kayu pada PLTU 3 × 350 MW, yaitu aspek ekonomi (biaya bahan bakar dan biaya produksi listrik per kWh), aspek teknis (heat rate dan specific fuel consumption), serta aspek lingkungan (emisi gas buang). Data yang digunakan merupakan data aktual dari sistem operasi pembangkit pada dua periode:

Tabel 2. DATA PRODUKSI LISTRIK

No	Status	Produksi Listrik (kWh)
1	Sebelum *co-firing*	6.686.223 kWh
2	Sesudah *co-firing*	6.604.007 kWh

A. Aspek Ekonomi: Efisiensi Biaya Bahan Bakar dan Produksi Listrik

Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan co-firing memberikan penghematan biaya produksi energi listrik. Sebelum *co-firing*, pembangkit membutuhkan 191 ton/jam batubara dengan nilai kalor 4.452 kCal/kg, dan menghasilkan total energi sebesar 6.686.223 kWh per hari. Biaya bahan bakar harian tercatat sebesar Rp 4.253.952.000, atau setara Rp 631/kWh.

Setelah penerapan *co-firing* dengan campuran 5% serbuk kayu dan 95% batubara, konsumsi batubara turun menjadi 178 ton/jam dan ditambah 6,9 ton/jam serbuk kayu. Nilai kalor rata-rata bahan bakar gabungan sedikit menurun menjadi 4.393 kCal/kg. Namun demikian, total biaya bahan bakar justru menurun menjadi Rp 4.087.291.200, atau setara Rp 593/kWh. Penurunan ini disebabkan oleh harga serbuk kayu yang lebih murah (Rp 742.000/ton) dibanding batubara (Rp 928.000/ton) sesuai ketetapan HBA bulan Desember 2023 (Arisandi & Krishna Putra, 2023).

Tabel 2. DATA PEMAKAIAN BAHAN BAKAR DAN KALORI YANG DIHASILKAN

Pemakaian Bahan Bakar	**Pemakaian (Ton/jam)**		**Kalori Serbuk Kayu**	**Kalori Batu Bara**
	Sebelum *Co-firing*	**Sesudah *Co-firing***		
Serbuk Kayu	0 Ton/jam	6.9 Ton/jam	2.681 kCal/Kg	4.452 kCal/Kg
Batu Bara	191 Ton/jam	178 Ton/jam		
Rata-rata	191 Ton/jam	184.9 Ton/jam		
Kalori	4.452 kCal/Kg	4.393 kCal/Kg		

Efisiensi biaya ini menunjukkan bahwa penerapan *co-firing* pada unit PLTU skala besar secara ekonomi layak dilakukan tanpa memerlukan investasi besar, karena proses pencampuran dilakukan pada fuel handling system yang sudah ada.

B. Aspek Teknis: Analisis Heat Rate dan Specific Fuel Consumption

Efisiensi pembangkitan juga dianalisis dari sisi teknis melalui dua parameter utama: *heat rate* dan *specific fuel consumption* (SFC).

Sebelum *co-firing*, heat rate pembangkit tercatat sebesar 3.220 kCal/kWh. Artinya, untuk menghasilkan satu kWh listrik, diperlukan energi panas sebesar 3.220 kCal dari batubara. Setelah *co-firing*, heat rate menurun menjadi 2.953 kCal/kWh. Penurunan ini menunjukkan bahwa pencampuran biomassa serbuk kayu tidak menurunkan efisiensi, bahkan memberikan perbaikan kecil dalam hal konversi energi.

Hal ini diperkuat oleh penurunan nilai SFC dari 0,68 kg/kWh (sebelum *co-firing*) menjadi 0,64 kg/kWh (sesudah *co-firing*). Artinya, bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu kWh listrik menurun sebesar 5,88%. Penurunan nilai SFC ini mencerminkan bahwa penggunaan campuran biomassa tidak hanya mengurangi kebutuhan batubara, tetapi juga mendukung efisiensi operasi pembangkit secara keseluruhan.

Namun demikian, penurunan nilai kalor bahan bakar akibat kelembaban serbuk kayu tetap perlu diperhatikan sebagai faktor penyeimbang dalam jangka panjang, terutama dalam kondisi musim hujan seperti saat penelitian dilakukan.

C. Aspek Lingkungan: Analisis Emisi Gas Buang

Dampak lingkungan dianalisis berdasarkan hasil pengukuran emisi gas buang dari sistem CEMS. Hasil menunjukkan adanya perubahan pada beberapa parameter utama emisi sebelum dan sesudah co-firing:

Tabel 2. DATA EMISI

	$Dust$	SO_2	NO_x	CO	Hg	$Flow$	O_2	$Temp$
Sebelum	9.94	135.92	220.83	1.95	0.0153	304.23	6.52	161.36
Sesudah	7.03	192.38	151.17	12.14	0.0039	303.75	5.29	160.80
Selisih	2.91	-56.46	69.66	-10.19	0.0114	0.48	1.23	0.56

Catatan: Semua dalam mg / m^3 (kecuali temperature dalam ℃)

Kenaikan emisi CO dan SO_2 setelah *co-firing* menunjukkan adanya tantangan dalam kontrol pembakaran yang kemungkinan dipengaruhi oleh komposisi udara pembakaran yang kurang optimal atau ketidakseimbangan rasio udara-bahan bakar. Dalam hal ini, peningkatan CO diduga berasal dari berkurangnya kandungan O_2 (turun dari 6,52% menjadi 5,29%) yang memicu pembakaran tidak sempurna. Hal ini juga tercermin dalam efisiensi pembakaran yang menurun secara lokal.

Sebaliknya, penurunan emisi NOx dan partikulat menunjukkan bahwa *co-firing* berpotensi menurunkan emisi polutan yang bersifat oksidatif dan partikulat, kemungkinan karena kandungan nitrogen dan abu pada serbuk kayu lebih rendah dibanding batubara. Demikian pula dengan emisi Hg, yang menurun signifikan karena kandungan logam berat pada biomassa jauh lebih rendah.

Secara keseluruhan, meskipun co-firing menurunkan beberapa parameter emisi, nilai CO sebesar 12,14 mg/m^3 setelah *co-firing* dikategorikan dalam tingkat ISPU "tidak sehat" (kategori 101–200) (Akbar, 2018; KLHK, 2019), sehingga diperlukan strategi optimasi udara pembakaran dan pemantauan yang lebih intensif dalam implementasi *co-firing* berkelanjutan.

D. Implikasi dan Diskusi Umum

Dari hasil di atas, dapat disimpulkan bahwa penerapan *co-firing* biomassa serbuk kayu pada PLTU skala besar memberikan manfaat nyata dari sisi ekonomi dan efisiensi teknis. Namun demikian, tantangan tetap ada dari sisi pengendalian emisi, terutama untuk parameter CO dan

SO_2. Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan *co-firing* bukan hanya sekadar pencampuran bahan bakar, melainkan memerlukan kontrol proses pembakaran yang presisi agar tidak menimbulkan dampak lingkungan baru.

Dibandingkan dengan studi sebelumnya oleh Sidiq (2022) yang hanya fokus pada efisiensi boiler (Sidiq, 2022), dan Fefria Tanbar dkk. (2021) yang membahas penurunan SFC (Tanbar et al., 2021), studi ini lebih komprehensif karena juga membahas aspek ekonomi dan validasi data emisi secara real-time dari sistem CEMS. Oleh karena itu, penelitian ini dapat menjadi referensi awal untuk implementasi co-firing berskala penuh di PLTU lain yang sejenis.

IV. SIMPULAN

A. Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi penerapan teknologi co-firing biomassa serbuk kayu sebagai bahan bakar campuran batubara pada PLTU 3 × 350 MW. Berdasarkan analisis terhadap aspek ekonomi, teknis, dan lingkungan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1) Dari aspek ekonomi, co-firing dengan komposisi 5% serbuk kayu dan 95% batubara berhasil menurunkan biaya produksi listrik dari Rp 631/kWh menjadi Rp 593/kWh, seiring turunnya biaya bahan bakar harian dari Rp 4,25 miliar menjadi Rp 4,08 miliar. Hal ini menunjukkan bahwa pemanfaatan biomassa lokal yang lebih murah secara signifikan dapat meningkatkan efisiensi biaya pembangkitan tanpa memerlukan investasi tambahan.
2) Dari aspek teknis, penerapan co-firing menurunkan nilai heat rate dari 3.220 kCal/kWh menjadi 2.953 kCal/kWh, dan nilai specific fuel consumption dari 0,68 kg/kWh menjadi 0,64 kg/kWh. Penurunan ini mengindikasikan bahwa efisiensi termal pembangkit tetap terjaga bahkan mengalami perbaikan meskipun menggunakan bahan bakar alternatif.
3) Dari aspek lingkungan, co-firing memberikan hasil yang beragam. Emisi NOx, debu, dan Hg mengalami penurunan, menandakan potensi pengurangan polutan dari jenis tertentu. Namun, terjadi peningkatan emisi SO_2 dan CO, masing-masing sebesar 56,46 mg/m³ dan 10,19 mg/m³, yang menunjukkan perlunya optimalisasi proses pembakaran agar pencampuran biomassa tidak menimbulkan pembakaran tidak sempurna atau peningkatan polutan sekunder.

Secara umum, teknologi co-firing sawdust dapat diterapkan dengan efektif dan memberikan manfaat ekonomi serta efisiensi yang signifikan, namun implementasinya perlu disertai pengendalian kualitas pembakaran dan emisi secara ketat.

B. Saran

Berdasarkan hasil dan keterbatasan dalam penelitian ini, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan implementasi dan penelitian lanjutan adalah sebagai berikut:

1) Uji co-firing perlu dilakukan dengan variasi rasio campuran biomassa lebih tinggi (misalnya 10%–15%) untuk mengetahui batas optimum pencampuran yang masih mempertahankan efisiensi dan kestabilan operasi pembangkit.
2) Durasi pengamatan sebaiknya diperluas dengan menggunakan data mingguan atau bulanan agar tren perubahan efisiensi dan emisi dapat dianalisis secara longitudinal dan tidak terpengaruh oleh fluktuasi harian atau faktor cuaca sesaat.
3) Sistem pembakaran perlu dioptimalkan melalui pengaturan ulang aliran udara pembakaran (air-fuel ratio) dan tuning boiler agar kenaikan emisi CO dan SO_2 dapat diminimalkan saat menggunakan biomassa.
4) Perlu dilakukan pengujian karakteristik fisik dan kimia biomassa lokal secara lebih detail, seperti kadar air, kandungan sulfur, dan potensi slagging/fouling agar pemilihan bahan bakar alternatif dapat disesuaikan dengan desain boiler dan karakteristik operasi lokal.
5) Rekomendasi kebijakan dapat diarahkan pada penyusunan panduan teknis co-firing nasional, yang mencakup standar pencampuran biomassa, pengujian emisi, serta manajemen rantai pasok biomassa agar pemanfaatannya dapat dilakukan secara berkelanjutan dan aman.

V. DAFTAR PUSTAKA

Akbar, F. (2018). Jurusan teknik pertambangan fakultas teknik universitas sriwijaya 2018. *Skripsi*.

Alfarisi, D. I., Rumawan, F. H., & Wirawan, A. P. (2024). ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN BEBAN TERHADAP KONSUMSI BATUBARA, HEAT RATE DAN EFISIENSI TERMAL PLTU INDOEKA UNIT 1. *ELECTROPS : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, *3*(2), 10. https://doi.org/10.30872/electrops.v3i2.16576

Alnavis, N. B., Wirawan, R. R., Solihah, K. I., & Nugroho, V. H. (2024). Energi listrik berkelanjutan: Potensi dan tantangan penyediaan energi listrik di Indonesia. *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering*, *1*(2). https://doi.org/10.61511/jimese.v1i2.2024.544

Arifin, Z., Insani, V. F. S., Idris, M., Hadiyati, K. R., Anugia, Z., & Irianto, D. (2023). Techno-Economic Analysis of Co-firing for Pulverized Coal Boilers Power Plant in Indonesia. *International Journal of Renewable Energy Development*, *12*(2), 261–269. https://doi.org/10.14710/ijred.2023.48102

Arisandi, G. F., & Krishna Putra, A. B. (2023). Simulasi Cycle Tempo 5.0 Dampak Variasi Rasio Co-Firing Batubara dan Biomassa Jenis Tongkol Jagung terhadap Performa PLTU 400 MW. *Jurnal Teknik ITS*, *12*(2). https://doi.org/10.12962/j23373539.v12i2.123291

Arsyad, M., & Setiadi. (2020). Gate to Gate Life Cycle Assessment Coal Power Plant in Indonesia. *Proceedings of the 3rd Asia Pacific Conference on Research in Industrial and*

Systems Engineering 2020, 333–338. https://doi.org/10.1145/3400934.3400995

Dian, J., Rhamadhan, F. Z., & Nugroho, A. (2023). Analysis of Co-firing in Bolok Coal-fired Power Plant Using Woodchips to Support Decarbonization. *2023 6th International Conference on Renewable Energy for Developing Countries (REDEC)*, 13–17. https://doi.org/10.1109/REDEC58286.2023.10208166

Haddad, A., Mohamed, O., Zahlan, M., & Wang, J. (2021). Parameter identification of a highly promising cleaner coal power station. *Journal of Cleaner Production*, *326*, 129323. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129323

Ilham, M. F., & Suedy, S. W. A. (2022). Effect of Cofiring Using Sawdust on Steam Coal Power Plant Heat Rate Value. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, *3*(2), 121–127. https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13828

KLHK. (2019). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal. *Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia*, 1–56. https://icel.or.id/wp-content/uploads/PERMENLHK-NO-15-TH-2019-ttg-BM-Emisi-Pembangkit-Listrik-Thermal.pdf

Kurniawan Hardjana, A. (2010). POTENSI BIOMASSA DAN KARBON PADA HUTAN TANAMAN ACACIA MANGIUM DI HTI PT. SURYA HUTANI JAYA, KALIMANTAN TIMUR. *Jurnal Penelitian Sosial Dan Ekonomi Kehutanan*, *7*(4), 237–249. https://doi.org/10.20886/jpsek.2010.7.4.237-249

Loha, C., Chattopadhyay, H., Chatterjee, P. K., & Majumdar, G. (2020). Co-Firing of Biomass to Reduce CO2 Emission. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials* (pp. 385–394). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11006-9

Mo, W., Du, K., Sun, Y., Guo, M., Zhou, C., You, M., Xu, J., Jiang, L., Wang, Y., Su, S., Hu, S., & Xiang, J. (2023). Technical-economic-environmental analysis of biomass direct and indirect co-firing in pulverized coal boiler in China. *Journal of Cleaner Production*, *426*, 139119. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139119

Palupi, D. N., Sundari, S., Syahtaria, M. I., & Sianipar, L. (2023). Analisis Dampak Lingkungan dan Keekonomian Pembangkit Listrik Tenaga Co-firing Biomassa dan Batubara Sebagai Upaya Bauran Energi Terbarukan. *El-Mal: Jurnal Kajian Ekonomi & Bisnis Islam*, *5*(3), 1363–1371. https://doi.org/10.47467/elmal.v5i3.4712

Pane, E., Ismail, Lesmana, I. G. E., Hartantrie, R., & Rifki, D. (2022). Pengaruh Proses Torefaksi terhadap Kualitas Serbuk Kayu Kayu. *Jurnal Keteknikan Pertanian*, *10*(1), 11–20. https://doi.org/10.19028/jtep.010.1.11-20

Power, I. P. & C. P. I. (2012). *Buku Boiler PLTU Pelabuhan Ratu, Modul Training Boiler*

9SEC-CHDOC) Tim Penyusun Indonesia Power & Cogindo PT Indonesia Power UBOH PLTU Jawa Barat 2 Pelabuhan Ratu 2012.

Prakarsa, W. U., & Dewi, K. (2024). The Effect of Plant Characteristics on CO2 Emission Factor Development: A Case Study of Coal-Fired Power Plants in Indonesia. *Journal of Community Based Environmental Engineering and Management*, *9*(1), 1–10. https://doi.org/10.23969/jcbeem.v9i1.18935

Primadanty, R. P. (2024). Potensi Biomassa Dalam Transisi Energi di Indonesia. *PARAHYANGAN ECONOMIC DEVELOPMENT REVIEW*, *2*(2), 136–143. https://doi.org/10.26593/pedr.v2i2.7707

Primadita, D. S., Kumara, I. N. S., & Ariastina, W. G. (2020). A Review on Biomass for Electricity Generation in Indonesia. *Journal of Electrical, Electronics and Informatics*, *4*(1), 1. https://doi.org/10.24843/JEEI.2020.v04.i01.p01

R. JAYASHREE. (2024). BIOMASS CO-FIRING AND ITS IMPACT ON ENVIRONMENTAL PROTECTION. *Pollution Research*, *43*(1–2), 47–51. https://doi.org/10.53550/PR.2024.v43i01-02.010

Sasana, H., & Eka Putri, A. (2018). The Increase of Energy Consumption and Carbon Dioxide (CO2) Emission in Indonesia. *E3S Web of Conferences*, *31*, 01008. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183101008

Septiani, R., Huboyo, H. S., & Sumiyati, S. (2021). Evaluation of cofiring application in power plant's coal combustion. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *802*(1), 012057. https://doi.org/10.1088/1755-1315/802/1/012057

Shamad, A. . A. A., Yusran, Y., & Suyuti, A. (2024). Techno Economy Evaluation of Co-firing Method with CFBB Boiler Type in Indonesia. *E3S Web of Conferences*, *576*, 04002. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457604002

Sidiq, A. N. (2022). Pengaruh Co-Firing Biomassa terhadap Efisiensi Boiler PLTU Batubara. *KILAT*, *11*(1), 21–31. https://doi.org/10.33322/kilat.v11i1.1553

Sugiyono, A., Febijanto, I., Hilmawan, E., & Adiarso. (2022). Potential of biomass and coal co-firing power plants in Indonesia: a PESTEL analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *963*(1), 012007. https://doi.org/10.1088/1755-1315/963/1/012007

Tanbar, F., Purba, S., Samsudin, A. S., Supriyanto, E., Aditya, I. A., Pln, P. T., Penelitian, P., & Ketenagalistikan, P. (2021). Analisa Karakteristik Pengujian Co-Firing Biomassa Sawdust Pada Pltu Type Pulverized Coal Boiler Sebagai Upaya Bauran Renewable Energy. *Jurnal Offshore*, *5*(2), 2549–8681.

Triani, M., Tanbar, F., Cahyo, N., Sitanggang, R., Sumiarsa, D., & Lara Utama, G. (2022). The Potential Implementation of Biomass Co-firing with Coal in Power Plant on Emission and

Economic Aspects: A Review. *EKSAKTA: Journal of Sciences and Data Analysis*. https://doi.org/10.20885/EKSAKTA.vol3.iss2.art4

Yana, S., Nelly, N., Radhiana, R., Ibrahim, N., Zubir, A. A., Zulfikar, T. M., & Yulisma, A. (2022). Dampak Ekspansi Biomassa sebagai Energi Terbarukan: Kasus Energi Terbarukan Indonesia. *Jurnal Serambi Engineering*, *7*(4). https://doi.org/10.32672/jse.v7i4.4963

YAYA, RUSDI ANGRIANTO, & YOHANES Y. RAHAWARIN. (2020). PERSENTASE LIMBAH PADA INDUSTRI SAWMILL PT. BERAU KARYA INDAH DI KABUPATEN TELUK BINTUNI. *JURNAL KEHUTANAN PAPUASIA*, *6*(1), 37–46. https://doi.org/10.46703/jurnalpapuasia.Vol6.Iss1.196