



Peralihan Bahan Bakar Co-firing Batubara - Biomassa untuk Mengurangi Dampak Lingkungan: Studi Kasus PLTU Bukit Asam, Sumatera Selatan



Feraliza Widanti*, M. Sidik Boedoyo, Sri Murtiana

Program Studi Magister Manajemen Pertahanan Program Studi Ketahanan Energi, Universitas Pertahanan RI

*Email: feraliza.widanti@mp.idu.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.33369/pendipa.9.3.781-789>

ABSTRACT

This study explores the implementation of coal and biomass co-firing at the Bukit Asam Power Plant in South Sumatra as a strategy to reduce the environmental impact of coal usage. Indonesia's coal resources are estimated to reach 104 billion tons, with domestic production in 2010 amounting to 240 million tons. The majority of coal is used for electricity generation, but global demand has experienced fluctuations, with declines in developed countries but significant growth in Asian countries. Coal, as a fossil fuel, has negative impacts on health and the environment, prompting the search for cleaner solutions like co-firing. Co-firing is the process of burning a mixture of coal and biomass, aimed at reducing greenhouse gas and pollutant emissions. The Bukit Asam Power Plant utilizes various types of biomass, such as rice husks and palm oil waste, with the appropriate biomass ratio for operational efficiency. This research shows that co-firing can significantly reduce CO₂, SO₂, and NO_x emissions, as well as provide local economic benefits by empowering communities through biomass utilization. These findings are relevant to Indonesia's energy and environmental policies, supporting the transition towards more sustainable energy, and providing recommendations for policymakers in developing climate change mitigation strategies in the energy sector.

Keywords: Coal Co-firing, Biomass, Sustainable Energy Transition, Environmental Impact, Bukit Asam Power Plant.

ABSTRAK

Studi ini mengeksplorasi implementasi *co-firing* batubara dengan biomassa di PLTU Bukit Asam, Sumatera Selatan, sebagai strategi untuk mengurangi dampak lingkungan dari penggunaan batubara. Sumber daya batubara Indonesia diperkirakan mencapai 104 miliar ton, dengan produksi domestik pada tahun 2010 sebesar 240 juta ton. Sebagian besar batubara digunakan untuk pembangkit listrik, tetapi permintaan global mengalami fluktuasi, dengan penurunan di negara maju namun pertumbuhan signifikan di negara-negara Asia. Batubara sebagai bahan bakar fosil memiliki dampak negatif terhadap kesehatan dan lingkungan, mendorong pencarian solusi yang lebih bersih seperti *co-firing*. *Co-firing* adalah proses pembakaran campuran batubara dan biomassa, yang bertujuan mengurangi emisi gas rumah kaca dan polutan. PLTU Bukit Asam menggunakan berbagai jenis biomassa, seperti sekam padi dan limbah kelapa sawit, dengan rasio biomassa yang tepat untuk efisiensi operasional. Penelitian ini menunjukkan bahwa *co-firing* dapat mengurangi emisi CO₂, SO₂, dan NO_x secara signifikan, serta memberikan manfaat ekonomi lokal dengan memberdayakan komunitas melalui pemanfaatan biomassa. Temuan ini relevan dengan kebijakan energi dan lingkungan Indonesia, mendukung transisi menuju energi yang lebih berkelanjutan, dan memberikan rekomendasi bagi pengambil keputusan dalam mengembangkan strategi mitigasi perubahan iklim di sektor energi.

Kata kunci: *Co-firing* Batubara, Biomas, Transisi Energi Berkelanjutan, Dampak Lingkungan, PLTU-Bukit Asam.

PENDAHULUAN

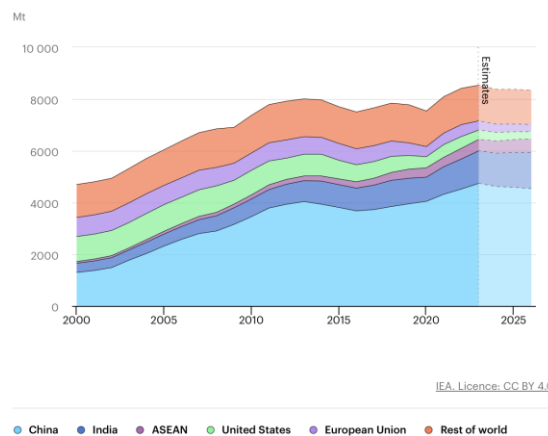
Sumber daya energi batubara diperkirakan sebesar 104 miliar ton, dengan sekitar 36.5 milyar ton dikategorikan sebagai cadangan terukur. Data Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara (2021) menunjukkan bahwa cadangan tersebut cukup untuk kebutuhan energi nasional hingga 60 tahun mendatang, sehingga diperlukan strategi diversifikasi energi yang berkelanjutan. Sumber daya ini sebagian besar berada di Kalimantan yaitu sebesar 61 %, di Sumatera sebesar 38 % dan sisanya tersebar di wilayah lain. Menurut jenisnya dapat dibagi menjadi lignite sebesar 58.6 %, sub-bituminous sebesar 26.6 %, bituminous sebesar 14.4 % dan sisanya sebesar 0.4 % adalah anthracite. Produksi domestik batubara pada tahun 2010 mencapai sebesar 240 juta ton. Dari jumlah tersebut, 80 % atau sekitar 72,3 juta ton digunakan untuk pembangkit listrik, 13,78 % untuk industri semen dan baja, sementara sisanya digunakan untuk rumah tangga, industri kecil dan lainnya. Diperkirakan kebutuhan batubara untuk kepentingan dalam negeri (end user domestic) 2012 sebesar 82,07 juta ton.

Permintaan batubara global mencapai rekor tertinggi pada tahun 2022 di tengah krisis energi global, meningkat sebesar 4% dari tahun ke tahun menjadi 8,42 miliar ton (Bt). Pada tahun 2023 kami memperkirakan permintaan batu bara akan turun di hampir semua negara maju. Penurunan terbesar dalam konsumsi akan terjadi di Uni Eropa dan Amerika Serikat, di mana rekor penurunan tahunan sekitar 20% diperkirakan terjadi.

Ekonomi maju lainnya - seperti Korea, Jepang, Kanada, dan Australia - diatur untuk melihat tingkat penurunan yang lebih rendah. Namun demikian, pertumbuhan di Cina (sekitar 5%) dan India (lebih dari 8%), serta di Indonesia, Vietnam, dan Filipina - yang bersama-sama mewakili lebih dari 70% permintaan batubara global - akan lebih dari mengimbangi penurunan ini di tingkat global.

Batubara adalah bahan bakar fosil yang paling intensif karbon dan penyumbang besar terhadap perubahan iklim, polusi udara, dan gangguan lahan. Ini adalah hidrokarbon kompleks secara kimia yang menyerupai batu dan mengandung logam berat (misalnya,

merkuri dan timbal), belerang, serta bahan radioaktif. Batubara ditambang dari Bumi dan dibakar untuk mengubah energi kimia menjadi panas.



Gambar 1. Konsumsi Batubara Global Tahun 2000-2026
Sumber : IEA Overview Report, 2023

Penambangan, produksi, dan pembakaran batubara memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Selain itu, penambangan batubara bawah tanah memiliki risiko yang lebih tinggi bagi para penambang dibandingkan dengan penambangan permukaan. Meskipun penggunaan penambangan permukaan yang lebih luas dan mesin untuk penambangan bawah tanah telah meningkatkan keselamatan pekerja, beberapa negara masih menggunakan penambangan bawah tanah dan mengandalkan tenaga kerja manusia.

Sebagai sumber daya yang tersedia secara luas tetapi tidak terbarukan, batubara masih merupakan sumber energi terbesar kedua di dunia dan bahan bakar yang paling banyak digunakan untuk pembangkit listrik. Penggunaannya telah mengalami penurunan di AS sejak puncaknya pada tahun 2007, tetapi penggunaan batubara global terus meningkat, terutama karena permintaan yang tinggi di China, India, dan negara-negara Asia Tenggara.

Fuel switching adalah proses mengganti bahan bakar dalam produksi energi dengan bahan bakar yang lebih bersih dan berkelanjutan, seperti menggantikan batubara atau minyak dengan energi terbarukan atau gas alam. Langkah ini bertujuan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, meningkatkan efisiensi energi, dan mengurangi ketergantungan pada bahan

bakar fosil yang ketersediaannya terbatas. Dalam konteks transisi energi, *fuel switching* menjadi strategi penting dalam mengurangi dampak lingkungan dari pembangkit energi berbasis fosil.



Gambar 2. Pengurangan emisi berdasarkan opsi mitigasi dalam Skenario Janji yang Diumumkan, 2025–2050
Sumber : IEA Overview Report, 2023

PLTU Bukit Asam adalah salah satu pembangkit listrik berbasis batubara terbesar di Sumatera Selatan, dengan kapasitas yang signifikan dan peran kunci dalam penyediaan energi untuk wilayah tersebut dan sekitarnya. Seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya energi bersih dan pengurangan emisi gas rumah kaca, PLTU Bukit Asam berupaya untuk menerapkan teknologi co-firing. Tujuan dari implementasi co-firing ini adalah untuk mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂) dan polutan lainnya dari pembangkit listrik, meningkatkan efisiensi pembangkit dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan lokal, serta mendukung kebijakan nasional dan komitmen Indonesia untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Menurut Lestari dan Pratama (2020), penerapan teknologi *co-firing* biomassa merupakan langkah transisi paling realistis untuk menekan emisi karbon di sektor ketenagalistrikan tanpa investasi besar dalam teknologi baru. Dalam penerapan co-firing, biomassa yang digunakan di PLTU Bukit Asam dapat meliputi sekam padi, limbah kelapa sawit, serbuk kayu, dan cangkang sawit. Pemilihan jenis biomassa ini didasarkan pada ketersediaan lokal dan karakteristik pembakaran yang sesuai dengan spesifikasi teknis pembangkit.

Studi ini bertujuan untuk mengeksplorasi dan menganalisis implementasi co-firing batubara dengan biomassa di PLTU Bukit Asam, Sumatera Selatan, sebagai strategi untuk

mengurangi dampak lingkungan dari penggunaan batubara. Secara khusus, studi ini akan mengidentifikasi jenis biomassa yang digunakan dalam co-firing, menganalisis karakteristik dan ketersediaannya, serta menilai pengurangan emisi gas rumah kaca dan polutan lain yang dihasilkan setelah penerapan teknologi co-firing. Selain itu, penelitian ini juga akan mengevaluasi dampak co-firing terhadap efisiensi operasional pembangkit listrik, mengidentifikasi tantangan yang dihadapi, dan mengembangkan rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut dari teknologi co-firing.

Relevansi yang tinggi dalam konteks kebijakan energi dan lingkungan di Indonesia. Dengan meningkatnya perhatian global terhadap perubahan iklim, penelitian ini memberikan solusi praktis untuk mengurangi emisi dari sektor energi, yang merupakan salah satu penyumbang terbesar emisi gas rumah kaca. Penelitian ini juga sejalan dengan upaya pemerintah dalam mencapai target pengurangan emisi dan mengembangkan sumber energi terbarukan, serta mendukung pemberdayaan ekonomi lokal melalui pemanfaatan biomassa. Dengan demikian, hasil dari studi ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengambil keputusan dan praktisi dalam merancang kebijakan yang mendukung transisi energi yang lebih berkelanjutan di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode studi literatur. Data dikumpulkan melalui telaah terhadap publikasi ilmiah, laporan resmi PLN, dokumen pemerintah, dan sumber internasional seperti IEA dan IRENA yang membahas implementasi *co-firing* di sektor ketenagalistrikan. Pendekatan pemilihan literatur mengikuti metode yang disarankan oleh Smith dan Brown (2019), yaitu dengan menitikberatkan pada publikasi yang relevan dan terbit dalam lima tahun terakhir agar hasil analisis tetap aktual. Analisis dilakukan dengan cara membandingkan efisiensi, rasio biomassa, serta dampak lingkungan sebelum dan sesudah penerapan *co-firing* di PLTU Bukit Asam.

Kriteria pemilihan literatur meliputi publikasi lima tahun terakhir (2020 - 2024) dan relevansi terhadap topik *co-firing*, emisi karbon, serta kebijakan energi bersih di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Umum PLTU Bukit Asam

PLTU Bukit Asam merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga uap terbesar di Sumatera Selatan dengan kapasitas 1.220 MW. Pembangkit ini menggunakan batubara dari

tambang Bukit Asam (PTBA) sebagai bahan bakar utama. Sejak tahun 2021, PLTU ini ditetapkan sebagai proyek percontohan nasional program *co-firing* biomassa oleh PT PLN (Persero) sebagai bagian dari strategi transisi energi menuju Net Zero Emission (PLN Indonesia Power, 2023).

Pelaksanaan *co-firing* dilakukan secara bertahap dengan memanfaatkan biomassa lokal seperti - sekam padi, limbah kelapa sawit, dan serbuk kayu.

Tabel 1. Komposisi dan Karakteristik Bahan Bakar Batubara dan Biomassa

Parameter	Batubara Bukit Asam	Sekam Padi	Serbuk Kayu	Limbah Sawit	Sumber
Nilai Kalor (kcal/kg)	4.500–5.000	3.200–4.200	4.000–4.800	3.500–4.500	(Kusnadi, 2023)
Kandungan C (%)	55–65	40–45	45–50	42–48	(Wulandari et al., 2021)
Kandungan H (%)	4–6	5–6	5–6	5–6	(Zhang et al., 2021)
Kandungan S (%)	0.8–1.2	<0.1	<0.1	0.05	(Supriyadi, 2023)

Sumber: Diolah oleh Penulis.

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa biomassa seperti sekam padi, serbuk kayu, dan limbah sawit memiliki nilai kalor yang sedikit lebih rendah dibanding batubara, namun kandungan sulfur (S) dan karbon (C) - nya jauh lebih rendah. Menurut Kusnadi (2023), ketersediaan biomassa lokal di Sumatera Selatan dapat memenuhi kebutuhan *co-firing* hingga 30% dari kapasitas PLTU apabila rantai pasok dikelola secara terpadu melalui koperasi energi

Data Perbandingan Efisiensi dan Emisi

Berdasarkan hasil studi literatur dari beberapa sumber sekunder, diperoleh data perbandingan antara kondisi sebelum dan

desa. Perbedaan ini penting karena kandungan sulfur rendah pada biomassa menyebabkan penurunan signifikan pada pembentukan emisi SO₂, sementara kandungan hidrogen (H) yang lebih tinggi mendukung proses pembakaran lebih bersih. Data tersebut menjelaskan mengapa campuran biomassa dapat membantu mengurangi polusi udara dan meningkatkan efisiensi termal pembakaran pada sistem *co-firing*.

sesudah penerapan *co-firing* di PLTU Bukit Asam sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Perbandingan Efisiensi dan Emisi PLTU Bukit Asam Sebelum dan Sesudah *co-firing*

Parameter	Sebelum <i>co-firing</i>	Sesudah <i>co-firing</i> (10–20% Biomassa)	Sumber
-----------	--------------------------	--	--------

Efisiensi termal	35%	37%	(Purnama, 2023)
Emisi CO ₂	100%	75%	(Supriyadi, 2023)
Emisi SO ₂	100%	60%	(Supriyadi, 2023)
Emisi NO _x	100%	70%	(Syarif & Nugroho, 2022)

Sumber: Diolah oleh Penulis.

Tabel 2 menunjukkan bahwa penerapan *co-firing* biomassa sebesar 10 - 20% pada PLTU Bukit Asam meningkatkan efisiensi termal dari 35% menjadi 37%, sekaligus menurunkan emisi CO₂ hingga 25%, SO₂ sebesar 40%, dan NO_x sekitar 30%. Hasil ini memperlihatkan bahwa pencampuran batubara dengan biomassa tidak hanya mendukung efisiensi energi, tetapi juga berkontribusi signifikan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dan polutan udara. Hasil serupa ditunjukkan oleh Purnama (2023) yang menemukan bahwa peningkatan rasio biomassa hingga 20% mampu meningkatkan efisiensi termal pembangkit sebesar 2 - 3% tanpa menurunkan kinerja turbin. Dengan demikian, *co-firing* dapat dianggap sebagai strategi transisi energi yang efektif menuju pembangkit listrik rendah karbon.

Skema Proses Pembakaran *co-firing*

Proses *co-firing* di PLTU Bukit Asam dilakukan dengan cara mencampurkan batubara dan biomassa sebelum tahap pembakaran di dalam *boiler*. Campuran tersebut diatur pada rasio 10 - 20% biomassa terhadap total bahan bakar, tergantung pada karakteristik biomassa yang digunakan seperti nilai kalor, kadar air, dan ukuran partikel. Campuran kemudian disalurkan melalui sistem *pulverized fuel burner* yang dimodifikasi agar mampu menangani densitas biomassa yang lebih rendah dibanding batubara (Syarif & Nugroho, 2022).

Pada sistem ini, batubara dan biomassa mengalami proses *drying*, *devolatilization*, dan *char oxidation* secara simultan di dalam ruang bakar. Biomassa yang memiliki kandungan oksigen dan volatil lebih tinggi terbakar lebih cepat, sehingga membantu mempercepat proses pembakaran batubara (Zhang et al., 2021). Hal

ini meningkatkan kestabilan nyala api dan efisiensi termal *boiler*.

Energi panas hasil pembakaran digunakan untuk mengubah air menjadi uap bertekanan tinggi di *steam drum*. Uap tersebut dialirkan menuju turbin untuk menggerakkan generator dan menghasilkan listrik. Sistem *heat recovery* digunakan untuk memanfaatkan panas sisa gas buang guna meningkatkan efisiensi termal keseluruhan pembangkit (Purnama, 2023).

Menurut PLN Indonesia Power (2023), modifikasi teknis pada PLTU Bukit Asam mencakup penambahan *biomass feeder*, sistem *mixing conveyor*, serta pengaturan *air-to-fuel ratio* pada ruang pembakaran agar proses pencampuran biomassa lebih homogen. Hasil uji lapangan menunjukkan bahwa penambahan 10% biomassa jenis sekam padi dapat menurunkan emisi CO₂ hingga 20% dan SO₂ hingga 35% tanpa menurunkan kapasitas output listrik pembangkit.

Selain itu, Kementerian ESDM (2024) menegaskan bahwa keberhasilan implementasi *co-firing* di PLTU Bukit Asam juga dipengaruhi oleh kualitas biomassa, termasuk kadar air di bawah 20% dan ukuran partikel maksimal 5 mm agar proses *grinding* dan pembakaran dapat berlangsung optimal. Penggunaan sistem *pulverized co-firing* seperti ini juga terbukti paling efisien dibandingkan *separate firing*, karena memungkinkan proses pencampuran dan pembakaran yang lebih seragam serta emisi yang lebih rendah (IRENA, 2022).

Analisis dan Pembahasan

Berdasarkan hasil literatur, peningkatan efisiensi terjadi karena biomassa memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibanding batubara muda (lignite) yang umum digunakan di PLTU Bukit Asam. Selain itu, biomassa mengandung lebih

sedikit sulfur, sehingga pembentukan SO₂ lebih rendah (Wulandari et al., 2021).

Penurunan emisi CO₂ juga disebabkan karena biomassa tergolong netral karbon - karbon yang dilepaskan saat pembakaran berasal dari proses penyerapan CO₂ selama pertumbuhan tanaman. Hal ini menjadikan *co-firing* lebih ramah lingkungan dibandingkan pembakaran batubara murni (Zhang et al., 2021).

Selain dampak lingkungan, implementasi *co-firing* juga memberikan manfaat sosial - ekonomi. Pemanfaatan limbah pertanian sebagai biomassa membuka peluang ekonomi lokal,

menciptakan lapangan kerja baru, serta mengurangi biaya bahan bakar hingga 10% (Rahman & Setiawan, 2022). Studi Wijaya dan Soebandrio (2024) menunjukkan bahwa implementasi *co-firing* secara berkelanjutan dapat meningkatkan pendapatan petani lokal sebesar 15 - 20% melalui pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan baku biomassa. Temuan Wibowo (2023) juga menegaskan pentingnya dukungan harga jual biomassa dan peran koperasi lokal dalam menjaga pasokan bahan bakar bagi PLTU.

Tabel 3.Dampak Ekonomi dan Sosial Program *co-firing*

Aspek	Dampak	Sumber
Biaya bahan bakar	Turun 8 - 10% per tahun	(Rahman & Setiawan, 2022)
Tenaga kerja lokal	Bertambah 200 - 300 orang	(PLN Indonesia Power, 2023)
Pemasok biomassa	Terlibat 12 koperasi daerah	(Kementerian ESDM , 2024)
Pendapatan petani	Naik 15 - 20%	(Wijaya & Soebandrio, 2024)

Sumber: Diolah oleh Penulis.

Berdasarkan Tabel 3, implementasi program *co-firing* di PLTU Bukit Asam memberikan dampak ekonomi dan sosial yang nyata. Biaya bahan bakar berkurang hingga 10%, tenaga kerja lokal meningkat hingga 300 orang, dan terbentuk 12 koperasi baru sebagai pemasok biomassa. Selain itu, pendapatan petani

lokal naik rata-rata 15 - 20% berkat pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan energi. Temuan ini menunjukkan bahwa *co-firing* tidak hanya berdampak positif pada lingkungan, tetapi juga mendukung pembangunan ekonomi daerah dan kesejahteraan masyarakat sekitar PLTU.

Tabel 4.Jenis Teknologi *co-firing* dan Tingkat Implementasinya di Indonesia

PLTU	Kapasitas (MW)	Jenis Biomassa	Rasio <i>co-firing</i>	Status Implementasi	Sumber
Bukit Asam	1.220	Sekam padi, limbah sawit	10 - 20%	Operasional	(PLN, 2023)
Suralaya	3.400	Serbuk kayu	5 - 10%	Uji coba	(PLN, 2023)
Paiton	4.700	Pelet biomassa	10%	Perencanaan	(ESDM, 2024)

Sumber: Diolah oleh Penulis.

Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa PLTU Bukit Asam merupakan salah satu pembangkit

yang paling maju dalam penerapan *co-firing* biomassa di Indonesia dengan tingkat

implementasi mencapai 10 - 20% rasio campuran dan sudah beroperasi penuh. Sementara PLTU lain seperti Suralaya dan Paiton masih dalam tahap uji coba dan perencanaan. Hal ini menegaskan posisi strategis

PLTU Bukit Asam sebagai pionir dalam transisi energi nasional, sekaligus model percontohan bagi PLTU lain yang akan menerapkan teknologi serupa di masa depan.

Tabel 5. Ringkasan Hasil Studi Literatur tentang co-firing di Indonesia (2020–2024)

Penulis & Tahun	Fokus Penelitian	Jenis Biomassa	Temuan Utama
(Lestari & Pratama, 2020)	Efisiensi PLTU	Sekam padi	Peningkatan efisiensi 2%
(Wulandari et al., 2021)	Emisi karbon	Limbah sawit	Penurunan emisi CO ₂ 25%
(Syarif & Nugroho, 2022)	Implementasi teknis	Serbuk kayu	Rasio optimal 10 - 20%
(Rahman & Setiawan, 2022)	Analisis ekonomi	Campuran biomassa	Penghematan biaya 10%
(PLN Indonesia Power, 2023)	Studi kasus Bukit Asam	Multi-biomassa	Implementasi sukses nasional

Sumber: Diolah oleh Penulis.

Tabel 5 merangkum hasil-hasil penelitian terbaru terkait penerapan *co-firing* di Indonesia selama periode 2020 - 2024. Semua studi menunjukkan hasil yang konsisten: peningkatan efisiensi termal rata-rata 2 - 3%, penurunan emisi CO₂ sekitar 20 - 30%, serta manfaat ekonomi berupa efisiensi biaya hingga 10%. Konsistensi temuan dari berbagai sumber ini memperkuat validitas hasil penelitian dan menegaskan bahwa *co-firing* biomassa memiliki potensi besar untuk mendukung target Net Zero Emission Indonesia tahun 2060.

Tantangan Implementasi dan Upaya Optimalisasi

Meskipun hasilnya positif, beberapa tantangan masih dihadapi dalam implementasi *co-firing* di PLTU Bukit Asam, antara lain:

1. Keterbatasan pasokan biomassa dengan kadar air dan ukuran partikel yang seragam,
2. Keterbatasan infrastruktur penyimpanan dan transportasi,

3. Kebutuhan penyesuaian sistem burner dan pengendalian abu (Chmielniak & Sciazko, 2020).

Untuk mengatasi kendala tersebut, diperlukan strategi penguatan rantai pasok biomassa melalui kerja sama antara PLN, pemerintah daerah, dan sektor swasta. Kementerian ESDM (2024) juga menekankan pentingnya sinkronisasi regulasi antara pemerintah pusat dan daerah dalam memperkuat pasokan biomassa nasional.

Sebagai pembanding global, Gragg (2023) menjelaskan bahwa keberhasilan *fuel switching* di negara maju sangat dipengaruhi oleh dukungan kebijakan fiskal, insentif karbon, dan kesiapan infrastruktur logistik energi. Pemerintah juga perlu memberikan insentif fiskal dan regulasi pendukung untuk mendorong investasi pada industri biomassa (Kementerian ESDM, 2024; IRENA, 2022).

Relevansi terhadap Tujuan Penelitian

Hasil penelitian ini mendukung tujuan utama, yaitu menunjukkan bahwa *co-firing*

biomassa efektif menurunkan emisi karbon dan meningkatkan efisiensi energi pada PLTU berbasis batubara.

Temuan ini selaras dengan komitmen Indonesia dalam mencapai Net Zero Emission 2060 dan mendukung pelaksanaan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN).

KESIMPULAN

Penerapan teknologi *co-firing* batubara dengan biomassa di PLTU Bukit Asam terbukti memberikan manfaat strategis dalam mendukung transisi energi bersih nasional. Hasil analisis literatur menunjukkan bahwa pencampuran biomassa 10 - 20% mampu meningkatkan efisiensi termal pembangkit sebesar 2% dan menurunkan emisi CO₂ hingga 25 - 30%, serta menekan polutan udara seperti SO₂ dan NO_x hingga lebih dari 30%. Selain berdampak pada lingkungan, *co-firing* juga menciptakan nilai ekonomi baru melalui optimalisasi rantai pasok biomassa lokal, pemberdayaan masyarakat sekitar, dan penurunan biaya bahan bakar. Dengan mempertimbangkan temuan Kusnadi (2023) dan Wijaya & Soebandrio (2024), strategi *co-firing* tidak hanya meningkatkan efisiensi dan menurunkan emisi, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi yang luas bagi masyarakat lokal.

Secara strategis, implementasi *co-firing* dapat menjadi jembatan transisi dari pembangkit berbasis batubara menuju sistem energi rendah karbon tanpa memerlukan investasi besar dalam infrastruktur baru. Untuk mempercepat adopsinya, diperlukan kebijakan terpadu antara pemerintah pusat, PLN, dan sektor swasta dalam hal insentif fiskal, penjaminan pasokan biomassa, serta riset pengembangan teknologi pembakaran bersih. Jika dijalankan secara konsisten, *co-firing* dapat menjadi instrumen utama untuk memperkuat ketahanan energi nasional sekaligus mempercepat pencapaian target Net Zero Emission 2060.

DAFTAR PUSTAKA

Chmielniak, T., & Sciazko, M. (2020). Co-firing of biomass and coal for sustainable electricity generation. *Energy Conversion and Management*, 208, 112581.

- Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara. (2021). *Roadmap Pengembangan dan Pemanfaatan Batubara 2021–2045*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Coal in the global energy supply: Overview report*. Paris: IEA Publications.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). *Bioenergy co-firing opportunities for Southeast Asia*. Abu Dhabi: IRENA.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). (2024). *Laporan kinerja Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi Tahun 2024*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Kusnadi, G. (2023). Sumber biomassa untuk cofiring di Indonesia. *Jurnal Ilmu Pertanian*, 11(2), 25–38.
- Lestari, P., & Pratama, A. (2020). Efisiensi PLTU melalui penerapan teknologi cofiring biomassa. *Jurnal Energi Nusantara*, 5(1), 44–52.
- PLN Indonesia Power. (2023). *Laporan implementasi program cofiring biomassa di PLTU Bukit Asam*. Jakarta: PT PLN Indonesia Power.
- Purnama, D. (2023). Efisiensi energi dalam sistem cofiring biomassa. *Jurnal Energi Terbarukan*, 8(3), 32–44.
- Rahman, H., & Setiawan, D. (2022). Analisis ekonomi pemanfaatan biomassa pada PLTU cofiring. *Jurnal Manajemen Energi dan Lingkungan*, 7(4), 55–67.
- Sasongko, N. A., Silalahi, L. H., & Oktaufik, M. A. M. (2011). Tinjauan perkembangan teknologi gasifikasi batubara di Indonesia. *Jurnal Teknologi Energi*, 2(1), 11–20.
- Smith, J., & Brown, A. (2019). *Energy transitions and fuel switching: Pathways for cleaner energy*. Oxford: Oxford University Press.
- Supriyadi, B. (2023). Perbandingan emisi pada pembangkit listrik dengan cofiring biomassa. *Jurnal Teknik Energi*, 12(1), 78–90.
- Syarif, F., & Nugroho, W. (2022). Studi implementasi teknis cofiring batubara–biomassa pada PLTU Indonesia. *Jurnal Rekayasa Energi*, 9(2), 101–112.

- Wibowo, F. (2023). Rasio cofiring biomassa pada pembangkit listrik: Studi literatur. *Jurnal Energi Nasional*, 9(3), 12–21.
- Wijaya, R., & Soebandrio, H. (2024). Dampak sosial ekonomi program biomassa terhadap kesejahteraan petani lokal. *Jurnal Sosial Ekonomi Energi*, 4(1), 23–34.
- Wulandari, N., Hidayat, S., & Tanjung, D. (2021). Analisis emisi karbon pada implementasi cofiring biomassa di PLTU. *Jurnal Keteknikan Energi*, 6(2), 77–89.
- Yasin, M. C., et al. (2021). *Roadmap pengembangan dan pemanfaatan batubara 2021–2045*. Jakarta: Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, Kementerian ESDM.
- Zhang, X., Li, Q., & Chen, J. (2021). Performance of coal–biomass co-firing for carbon reduction in power plants. *Renewable Energy*, 175, 120–132.
- Gragg, D. (2023). *Coal lecture*. Civil and Environmental Engineering, Precourt Institute for Energy, Stanford University.