

Inovasi Ekonomi Sirkular Melalui *Co-Firing* PLTU Terbaik Di Jawa Timur: Evaluasi Target Dan Strategi Keberlanjutan

Nining Dewi Maulida,^a Miftahul Ulum,^b Muhammad Nur Haudio Maulana,^c Lale Agustia Olivia Rosadi,^d Niki Puspita Sari,^e

^{a,b,c,d,e} Program Studi S-1 Manajemen, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Islam Raden Rahmat Malang, Indonesia

ndmaulida111@gmail.com,^a cakmiftah21@gmail.com,^b haudigamers@gmail.com,^c oliviarosadi0@gmail.com,^d nikipuspita@uniramalang.co.id^e

Submitted: 30 Mei 2026 - Last revised: 18 Juni 2026 - Accepted: 25 Juni 2026

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis implementasi program *co-firing* biomassa sebagai inovasi model bisnis ekonomi sirkular pada tiga Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Jawa Timur, yaitu PLTU Paiton, PLTU Tanjung Awar-Awar, dan PLTU Pacitan, serta mengevaluasi realisasi target bauran energi hijau sepanjang tahun 2024. Menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif berbasis data sekunder operasional, studi ini dibedah melalui integrasi perspektif Circular Economy Theory, Sustainable Business Model, Triple Bottom Line, dan Green Supply Chain Management. Hasil penelitian menunjukkan adanya variasi performa signifikan akibat heterogenitas karakteristik pasokan hulu. PLTU Paiton menunjukkan kinerja superior dan konsisten (*on-track* mencapai bauran 4,2%–4,8%) melalui optimalisasi residu industri kayu lokal. Sebaliknya, PLTU Tanjung Awar-Awar (1,8%–2,5%) dan PLTU Pacitan (2,3%–3,1%) mengalami deviasi negatif dari target ideal 5% akibat kendala teknis boiler derating, risiko slagging dan fouling dari abu sekam padi, serta tingginya kadar air bahan baku akibat ketergantungan logistik hulu pada pengeringan tradisional. Strategi keberlanjutan yang dirumuskan merekomendasikan pembentukan skema kelembagaan sirkular multipihak berbasis koperasi dan intervensi teknologi torrefaksi di tingkat tapak untuk mengamankan stabilitas rantai pasok dan mempercepat transisi menuju Net Zero Emission.

JEL classification :

Keywords: ekonomi sirkular , *co-firing* biomassa, evaluasi target, strategi keberlanjutan, net zero emission

Abstract

This study aims to analyze the implementation of biomass *co-firing* programs as a circular economy business model innovation across three major Steam Power Plants (PLTU) in East Java—PLTU Paiton, PLTU Tanjung Awar-Awar, and PLTU Pacitan—and evaluate their green energy mix target realization throughout 2024. Adopting a qualitative descriptive approach utilizing operational secondary data, the study integrates the perspectives of Circular Economy Theory, Sustainable Business Model, Triple Bottom Line, and Green Supply Chain Management. The results reveal significant performance variations driven by the heterogeneity of upstream supply ecosystems. PLTU Paiton demonstrates superior and consistent performance (*on-track* achieving a 4.2%–4.8% mix) by optimizing local wood industry residues. Conversely, PLTU Tanjung Awar-Awar (1.8%–2.5%) and PLTU Pacitan (2.3%–3.1%) experience negative deviations from the ideal 5% target due to technical boiler derating, slagging and fouling risks from rice husk ash, and high raw material moisture content caused by traditional upstream drying methods. The formulated sustainability strategy recommends establishing multi-stakeholder circular institutional frameworks through cooperatives and integrating localized torrefaction technologies to secure supply chain stability and accelerate the transition toward Net Zero Emission.

JEL classification :

Keywords: circular economy, *co-firing*, green supply chain management, power plant, sustainable business model, net zero emission

I. INTRODUCTION

Perubahan iklim, peningkatan emisi gas rumah kaca, dan ketergantungan yang tinggi terhadap energi fosil menjadi tantangan utama pembangunan berkelanjutan di Indonesia. Hingga saat ini, sektor ketenagalistrikan nasional masih didominasi oleh penggunaan batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) demi menjaga stabilitas pasokan skala besar (Morales Eguez, 2014). Kondisi tersebut mendorong Pemerintah Indonesia mempercepat transisi energi guna mendukung target *Net Zero Emission* (NZE) melalui pendekatan ekonomi hijau (Qalbie & Rahmaniah, 2023). Transformasi ini tidak hanya menuntut perubahan teknis, melainkan juga inovasi model bisnis yang mengintegrasikan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan secara

berkelanjutan (Zein & Azizullah, 2026). Sebagai langkah taktis, PT PLN (Persero) menerapkan program *co-firing*, yaitu substitusi sebagian batu bara dengan biomassa atau *Refuse-Derived Fuel* (RDF) guna menekan emisi karbon tanpa merombak total infrastruktur yang ada (Fahmi et al., 2023).

Dalam perspektif inovasi manajemen, implementasi *co-firing* mencerminkan aplikasi nyata dari *Circular Economy Theory* yang berupaya mempertahankan nilai material dan mengurangi limbah (Geissdoerfer et al., 2018). Pendekatan ini memperpanjang siklus hidup residu material dan menciptakan nilai tambah ekonomi baru (Sari et al., 2025) dengan mengonversi limbah pertanian, residu kehutanan, hingga sampah domestik menjadi komoditas energi alternatif ramah lingkungan (Kuncara et al., 2025; Taufiqurohim et al., 2025). Secara nasional, program ini menunjukkan tren positif, di mana *co-firing* telah diimplementasikan pada 47 PLTU dengan total produksi energi hijau 1,67 juta *MWh* serta mereduksi emisi karbon sebesar 1,87 juta ton CO_2 .

Keberhasilan program ini erat kaitannya dengan *Sustainable Business Model* yang menekankan penciptaan nilai multidimensional (*shared value creation*) bagi perusahaan, masyarakat, dan lingkungan (Geissdoerfer et al., 2018). Hal ini selaras dengan konsep *Triple Bottom Line* yang mensinergikan aspek lingkungan (*planet*), nilai tambah ekonomi (*profit*), dan peluang ekonomi baru bagi masyarakat lokal (*people*) melalui aktivitas hulu rantai pasok. Namun, keberlanjutannya sangat bergantung pada efektivitas *Green Supply Chain Management* (GSCM), di mana stabilitas kualitas biomassa, kontinuitas pasokan, dan efisiensi logistik menjadi faktor penentu utama (Widanti et al., 2025).

Dalam konteks ini, Provinsi Jawa Timur memegang peranan krusial sebagai episentrum implementasi *co-firing* nasional karena mengonsolidasikan tiga PLTU dengan karakteristik pasokan sirkular yang unik. PLTU Paiton bertindak sebagai pionir berskala masif yang mengintegrasikan serbuk gergaji dan pelet kayu industri (Narputro et al., 2025); PLTU Tanjung Awar-Awar memfokuskan pemanfaatan RDF untuk mengatasi sampah perkotaan pantura; dan PLTU Pacitan mengoptimalkan potensi biomassa hasil hutan rakyat wilayah selatan. Secara manajerial, komparasi ketiga unit ini penting untuk membedah efektivitas operasional, mitigasi risiko teknis seperti boiler derating, serta tata kelola rantai pasok hijau di tengah tantangan musiman bahan baku (Subroto, n.d.; Triani et al., 2024).

Pemilihan tema dan lokus studi kasus komparatif pada ketiga entitas vital Jawa-Bali ini didasarkan pada kebutuhan kritis untuk mengevaluasi efektivitas transisi energi yang *cost-effective* dan bagaimana heterogenitas ekosistem pasokan lokal berimplikasi terhadap target bauran energi hijau nasional. Guna menghindari bias operasional dini, penelitian membatasi ruang lingkup pada realisasi kinerja sepanjang tahun 2024, di mana ketiga PLTU telah beroperasi secara komersial penuh dan stabil.

Sejumlah penelitian terdahulu telah membahas *co-firing* biomassa dalam mengurangi konsumsi batu bara dan mendukung target energi nasional (Bawa Susana & Wiryadi, 2025), namun kajiannya masih didominasi oleh aspek teknis operasional. Di sisi lain, studi mengenai hubungan ekonomi sirkular dan inovasi model bisnis (Geissdoerfer et al., 2018) serta keberlanjutan rantai pasok (Widanti et al., 2025) cenderung dibahas secara terpisah. Terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) berupa minimnya kajian komprehensif yang mengintegrasikan perspektif *Circular Economy Theory*, *Sustainable Business Model*, *Triple Bottom Line*, dan *Green Supply Chain Management* dalam satu analisis komparatif empiris.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis implementasi *co-firing* biomassa sebagai inovasi ekonomi sirkular pada PLTU Paiton, PLTU Tanjung Awar-Awar, dan PLTU

Pacitan, mengevaluasi pencapaian target bauran energi hijau tahun 2024, serta merumuskan strategi keberlanjutannya. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis bagi manajemen keberlanjutan sektor energi sekaligus memberikan implikasi praktis bagi regulator dan praktisi dalam mempercepat transisi menuju *Net Zero Emission*.

II. LITERATUR REVIEW

II.A. Konsep Ekonomi Sirkular

Ekonomi sirkular (*circular economy*) merupakan konsep pembangunan berkelanjutan yang menekankan efisiensi penggunaan sumber daya melalui prinsip *reduce, reuse, recycle*, dan *recover* guna meminimalkan limbah serta memperpanjang siklus hidup material. Konsep ini hadir sebagai alternatif dari model ekonomi linear yang selama ini berorientasi pada pola “ambil gunakan buang” (*take-make-dispose*). Dalam sektor energi, ekonomi sirkular mulai diterapkan melalui pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber energi alternatif yang dapat menggantikan sebagian penggunaan bahan bakar fosil.

Ekonomi sirkular merupakan sistem ekonomi yang bertujuan mempertahankan nilai produk, material, dan sumber daya selama mungkin dalam siklus ekonomi sehingga mampu mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan efisiensi sumber daya (Sari et al., 2025). Konsep ini juga mendukung pembangunan rendah karbon melalui optimalisasi penggunaan limbah dan energi terbarukan. Penerapan ekonomi sirkular pada sektor ketenagalistrikan di Indonesia mulai berkembang melalui program *co-firing* biomassa pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Program ini memanfaatkan limbah pertanian, limbah kehutanan, dan sampah organik sebagai bahan bakar campuran batubara sehingga limbah yang sebelumnya tidak bernilai dapat diubah menjadi sumber energi baru yang memiliki nilai ekonomi.

Dalam penelitian terdahulu dijelaskan bahwa ekonomi sirkular tidak hanya berkaitan dengan pengelolaan limbah, tetapi juga mendorong transformasi model bisnis berkelanjutan melalui inovasi teknologi, efisiensi rantai pasok, dan penciptaan nilai ekonomi baru (Nosratabadi et al., 2019). Dengan demikian, implementasi ekonomi sirkular pada PLTU melalui program *co-firing* tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon, tetapi juga menciptakan peluang ekonomi baru bagi masyarakat dan industri biomassa.

II.B. Program *Co-firing* pada PLTU

Program *co-firing* merupakan metode pencampuran biomassa dengan batu bara dalam proses pembakaran PLTU untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dan menekan emisi karbon (Darmawan et al., 2025). Biomassa yang digunakan dapat berupa *wood pellet*, sekam padi, serbuk kayu, tandan kosong kelapa sawit, hingga *refuse derived fuel* (RDF) yang berasal dari pengolahan sampah. Di Indonesia, program *co-firing* menjadi bagian dari strategi transisi energi nasional menuju target *Net Zero Emission* dan peningkatan bauran energi baru terbarukan sebesar 23% (Airlangga, 2025). Implementasi *co-firing* dinilai lebih realistis dibandingkan pembangunan pembangkit energi baru secara penuh karena memanfaatkan infrastruktur PLTU yang telah tersedia. Selain itu, teknologi *co-firing* relatif lebih murah dibandingkan transformasi total menuju pembangkit energi bersih (Darmawan et al., 2025). Oleh karena itu, pemerintah dan PT PLN mulai menerapkan *co-firing* pada berbagai PLTU di Indonesia sebagai solusi transisi energi jangka menengah.

Penelitian mengenai *co-firing* biomassa menunjukkan bahwa penggunaan biomassa pada PLTU mampu menurunkan emisi gas rumah kaca secara signifikan. Studi yang dilakukan oleh peneliti terdahulu menjelaskan bahwa implementasi *co-firing* di Indonesia telah dilakukan pada berbagai PLTU dengan tujuan mengurangi konsumsi batu bara serta mendukung pengembangan

energi baru terbarukan. Namun demikian, implementasi program masih menghadapi tantangan berupa keterbatasan pasokan biomassa, biaya logistik, dan kualitas biomassa yang belum seragam (Pahlevi et al., 2024). Selain itu, dalam literatur terdahulu juga menyatakan bahwa biomassa lignoselulosa memiliki potensi besar sebagai energi terbarukan karena dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar rendah emisi dan mendukung pembangunan berkelanjutan (Isikgor & Becer, 2015). Pemanfaatan biomassa pada *co-firing* juga mendukung prinsip ekonomi sirkular karena limbah pertanian dan kehutanan dapat dimanfaatkan kembali menjadi energi yang bernilai ekonomi.

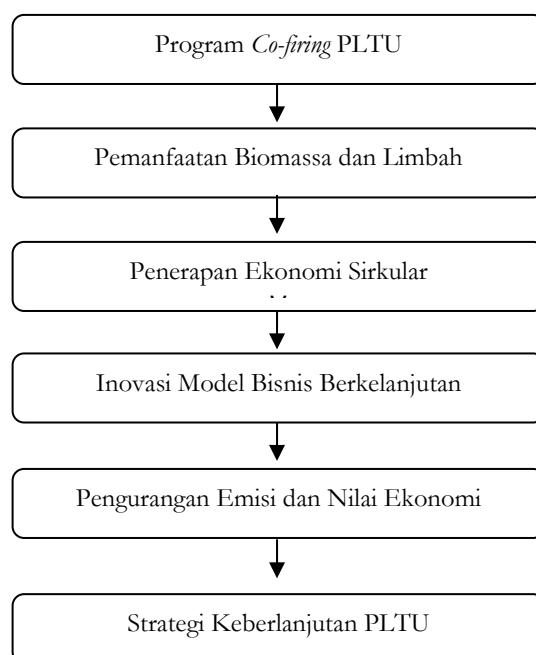
II.C. Model Inovasi Bisnis Berkelanjutan

Implementasi program *co-firing* tidak hanya membutuhkan inovasi teknologi, tetapi juga inovasi model bisnis yang mampu menjaga keberlanjutan rantai pasok biomassa. Dalam penelitiannya Susilo et al (2023) mengatakan bahwa perspektif ekonomi sirkular, model bisnis berkelanjutan bertujuan menciptakan nilai ekonomi, sosial, dan lingkungan secara bersamaan melalui kolaborasi antar pemangku kepentingan. Pada program *co-firing*, inovasi model bisnis terlihat melalui keterlibatan berbagai aktor seperti pemerintah, PLN, industri biomassa, petani, dan masyarakat lokal dalam penyediaan bahan baku biomassa. limbah pertanian dan kehutanan yang sebelumnya tidak memiliki nilai ekonomi dapat diolah menjadi bahan bakar alternatif sehingga menciptakan peluang usaha baru bagi masyarakat.

Sustainable business model innovation merupakan integrasi antara inovasi bisnis dan prinsip keberlanjutan yang bertujuan menghasilkan keuntungan ekonomi sekaligus mengurangi dampak lingkungan (Geissdoerfer et al., 2018). Dalam konteks *co-firing*, inovasi model bisnis dapat diwujudkan melalui pengembangan rantai pasok biomassa yang efisien, kolaborasi antar *stakeholder*, dan pemanfaatan teknologi ramah lingkungan. Selain itu, pemanfaatan *refuse derived fuel* (RDF) dari sampah perkotaan dalam program *co-firing* juga menjadi bentuk inovasi ekonomi sirkular (Kuncara et al., 2025). RDF memungkinkan sampah yang sebelumnya menjadi permasalahan lingkungan diubah menjadi sumber energi alternatif bagi PLTU. Pendekatan ini tidak hanya membantu mengurangi volume sampah nasional, tetapi juga memperluas sumber biomassa untuk mendukung keberlanjutan program *co-firing*. Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas implementasi *co-firing* biomassa sebagai strategi pengurangan emisi karbon pada PLTU. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek teknis pembakaran biomassa dan efisiensi energi. Penelitian Bawa Susana & Wiryia Aryadi (2025) menunjukkan bahwa implementasi *co-firing* biomassa pada PLTU di Indonesia mampu mengurangi penggunaan batu bara dan mendukung pencapaian target energi baru terbarukan. Akan tetapi, penelitian tersebut lebih menekankan aspek teknis operasional pembangkit dibandingkan strategi bisnis keberlanjutan.

Penelitian lain juga membahas hubungan antara *circular economy* dan *business model innovation* yang menekankan pentingnya integrasi keberlanjutan dalam model bisnis modern (Geissdoerfer et al., 2018). Namun penelitian tersebut belum secara spesifik membahas penerapan ekonomi sirkular pada sektor PLTU melalui program *co-firing*. Sementara itu, penelitian Widanti et al (2025) menjelaskan bahwa keberhasilan transisi energi melalui *co-firing* sangat dipengaruhi oleh keterlibatan masyarakat dan keberlanjutan rantai pasok biomassa. Penelitian ini menunjukkan bahwa aspek sosial dan kolaborasi *stakeholder* menjadi faktor penting dalam menjaga keberhasilan program jangka panjang. Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut, masih terdapat keterbatasan kajian yang secara khusus mengintegrasikan perspektif ekonomi sirkular, inovasi model bisnis, dan strategi keberlanjutan dalam implementasi *co-firing* pada PLTU di Indonesia. Penelitian ini berfokus pada analisis implementasi program *co-firing* sebagai bentuk inovasi model bisnis ekonomi sirkular pada PLTU di Indonesia. Program *co-firing* dipandang sebagai strategi transisi energi yang tidak hanya bertujuan mengurangi emisi karbon, tetapi juga menciptakan nilai ekonomi melalui pemanfaatan limbah biomassa.

Dalam penelitian ini, implementasi *co-firing* dianalisis melalui perspektif ekonomi sirkular, inovasi model bisnis, realisasi target program, serta strategi keberlanjutan rantai pasok biomassa. Hubungan antar konsep penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 1. Kerangka Implementasi *Co-firing* pada PLTU di Indonesia

Sumber: Diolah oleh Penulis, 2026

Berdasarkan kerangka tersebut, penelitian ini berupaya menganalisis bagaimana implementasi *co-firing* pada PLTU di Indonesia mampu mendukung transformasi energi berkelanjutan melalui pendekatan ekonomi sirkular dan inovasi model bisnis.

II.D. Kebijakan Energi Nasional dan Daerah

Akselerasi implementasi program *co-firing* di Indonesia secara makro dikendalikan oleh Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang tertuang dalam Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014, yang menargetkan bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) sebesar 23% pada bauran energi nasional. Untuk sektor ketenagalistrikan, PT PLN (Persero) mengoperasikannya melalui Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030 yang secara spesifik menetapkan *co-firing* biomassa pada 52 lokasi PLTU sebagai strategi dekarbonisasi jangka pendek-menengah yang paling *cost-effective*. Regulasi ini diperkuat oleh Peraturan Menteri ESDM Nomor 12 Tahun 2023 tentang Pemanfaatan Biomassa sebagai Campuran Bahan Bakar pada PLTU, yang menetapkan substitusi bertahap hingga minimum 5%–10% bauran termal pada pembangkit batubara eksisting tanpa memerlukan modifikasi masif pada komponen boiler. Tata kelola pasokan dan standar kualitas komoditas biomassa ini diatur ketat guna menjamin keekonomian harga bahan bakar alternatif agar tidak melampaui Biaya Pokok Penyediaan (BPP) listrik regional.

Pada tingkat daerah, Provinsi Jawa Timur memiliki posisi geografis yang sangat strategis dengan potensi biomassa melimpah yang mendukung kebijakan sirkular tersebut, sebagaimana dipetakan dalam Rencana Umum Energi Daerah (RUED) Provinsi Jawa Timur (Perda Jatim No. 6 Tahun 2019). Sebagai lumbung pangan nasional, data Dinas Pertanian dan Ketahanan Pangan Provinsi Jawa Timur menunjukkan adanya residu agrikultur berupa sekam padi dan bonggol jagung dalam skala masif yang menjadi basis pasokan utama bagi PLTU di koridor utara seperti PLTU Tanjung Awar-Awar Tuban. Sementara itu, wilayah Jawa Timur bagian selatan didominasi oleh perbukitan dan hutan rakyat yang menghasilkan potensi vegetasi kayu energi seperti Kaliandra Merah dan Sengon berdasarkan data Perum Perhutani Divre Jatim, yang menjadi jangkar pasokan *wood chips* bagi PLTU Pacitan. Di sisi lain, tingginya densitas industri

pengolahan kayu perkotaan dan timbunan sampah domestik di koridor Surabaya-Pasuruan-Probolinggo menciptakan substitusi ganda berupa serbuk gergaji (*sawdust*) bagi PLTU Paiton serta pasokan *Refuse-Derived Fuel* (RDF) hasil konversi sampah kota, menjadikannya sebuah ekosistem rantai pasok sirkular yang terintegrasi dengan karakteristik keunggulan ekonomi lokal.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain deskriptif komparatif untuk menganalisis secara mendalam implementasi *co-firing* biomassa sebagai inovasi model bisnis ekonomi sirkular pada sektor energi (Safrudin et al., 2023; Sugiyono, 2023). Fokus penelitian utamanya diarahkan pada penggambaran kondisi aktual, evaluasi realisasi target, serta identifikasi tantangan dan strategi keberlanjutan program tanpa melakukan pengujian hipotesis. Objek dalam studi ini adalah implementasi program *co-firing* pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Indonesia, di mana pemilihan lokasi amatan dilakukan secara *purposive sampling* berdasarkan kriteria relevansi, ketersediaan data, dan keterwakilan wilayah (Sugiyono, 2023). Berdasarkan pertimbangan tersebut, ditetapkan tiga PLTU skala besar di Jawa Timur yang berkontribusi signifikan terhadap sistem ketenagalistrikan Jawa-Bali serta memiliki variasi karakteristik rantai pasok, yaitu PLTU Paiton (Probolinggo), PLTU Tanjung Awar-Awar (Tuban), dan PLTU Pacitan.

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang dikumpulkan melalui teknik studi pustaka dan studi dokumentasi dengan batasan temporal sepanjang tahun fiskal 2024. Pembatasan ini diambil secara metodologis karena pada tahun 2024 ketiga PLTU tersebut telah melewati fase penyesuaian awal (*ramp-up*) dan mengoperasikan skema komersialisasi secara penuh dengan kondisi logistik pasca-pandemi yang sudah stabil. Data sekunder tersebut bersumber dari dokumen resmi Kementerian ESDM (Ditjen EBTKE), Laporan Keberlanjutan PT PLN (Persero), laporan *Institute for Essential Services Reform* (IESR), serta artikel ilmiah bereputasi yang diakses melalui Google Scholar. Data yang telah terkumpul kemudian dianalisis menggunakan model interaktif yang meliputi reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan (Ahmad & Muslimah, 2021; Spradley & Huberman, 2024).

Secara sistematis, tahapan analisis komparatif dalam penelitian ini dijalankan melalui empat fase utama yang terintegrasi. Analisis diawali dengan studi deskriptif untuk mengidentifikasi implementasi awal *co-firing* dan prinsip ekonomi sirkular di setiap PLTU, yang kemudian dilanjutkan dengan analisis komparatif untuk membandingkan capaian bauran energi, jenis biomassa, serta kendala operasional antarlokus. Selanjutnya, dilakukan *gap analysis* untuk mengevaluasi kesenjangan antara target bauran energi hijau pemerintah dengan realisasi aktual lapangan, serta *analisis Green Supply Chain Management* (GSCM) untuk mengidentifikasi hambatan logistik dari hulu hingga hilir. Pada tahap akhir, hasil analisis diinterpretasikan menggunakan sintesis teori *Circular Economy*, *Sustainable Business Model*, dan *Triple Bottom Line* untuk menyusun matriks strategi keberlanjutan program dalam mendukung target *Net Zero Emission* Indonesia.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.A Profil dan Kinerja *Co-firing* PLTU Terbaik Jawa Timur

IV.A.1 Profil PLTU *Co-firing* di Jawa Timur

Provinsi Jawa Timur menjadi salah satu wilayah strategis dalam implementasi program *co-firing* biomassa nasional karena memiliki beberapa PLTU berskala besar yang terintegrasi dalam sistem kelistrikan Jawa-Bali. Berdasarkan laporan PT PLN (Persero), PLTU Paiton, PLTU Tanjung Awar-Awar, dan PLTU Pacitan termasuk pembangkit yang telah menerapkan program *co-firing* sebagai bagian dari strategi transisi energi dan pengurangan karbon emisi nasional.

Tabel 1. Profil Komparatif Operasional Tiga PLTU *Co-firing* di Jawa Timur

PLTU Paiton	PLTU Tanjung Awar-Awar	PLTU Pacitan
----------------	------------------------	--------------

Lokasi	Probolinggo	Tuban	Pacitan
Kapasitas Unit	4 X 400 MW + 2 X 610 MW	2 X 350 MX	2 X 315 MW
Jenis Biomassa Utama	<i>Wood pellet</i> , serbuk gergaji (<i>sawdust</i>)	Sekam padi, bonggol jagung, RDF	Serpihan kayu (<i>wood chips kaliandra & sengon</i>)
Realisasi Bauran	4,2% - 4,8%	1,5% - 2,1%	1,8% - 2,4%
Kapasitas Serapan Ton/Tahun	185.200 Ton	42.600 Ton	54.300 Ton

Sumber: Diolah dari Laporan Kinerja Ditjen EBTKE ESDM dan Laporan Keberlanjutan PLN, 2024

Berdasarkan Tabel 1, profil teknis operasional menunjukkan bahwa ketiga objek studi memiliki karakteristik kapasitas serapan dan jenis biomassa yang sangat dipengaruhi oleh potensi biogeografis masing-masing wilayah di Jawa Timur. Tingginya performa PLTU Paiton didukung oleh kestabilan pasokan bahan baku komersial berupa *wood pellet* dan serbuk gergaji (*sawdust*). Hal ini sejalan dengan temuan Cardozo et al (2014) yang menyatakan bahwa standarisasi geometri dan kadar kalor pada jenis biomassa kayu ter fabrikasi memberikan efisiensi termal yang jauh lebih konstan pada boiler dibandingkan limbah pertanian mentah.

Sebaliknya, PLTU Tanjung Awar-Awar dan PLTU Pacitan menunjukkan realisasi bauran energi hijau yang cenderung moderat akibat ketergantungan pada rantai pasok berbasis kerakyatan dan limbah agro-industri lokal. Fragmentasi penyediaan bahan baku di tingkat tapak domestik sering kali memicu *underperformance* pada pencapaian target bauran energi nasional (Arsyad et al., 2023). Meskipun memiliki pasokan yang melimpah pasca-panen, tantangan kontinuitas musiman dan kerapatan energi (*energy density*) yang rendah menjadi faktor utama penghambat maksimalisasi bauran termal pembangkit utara ini. Sementara itu, PLTU Pacitan yang beroperasi di wilayah selatan Jawa Timur memanfaatkan topografi pegunungan dengan menyerap serpihan kayu (*wood chips*) dari hasil hutan tanaman energi kerakyatan (kaliandra dan sengon) sebesar 54.300 ton/tahun. Integrasi model komparatif ini menegaskan bahwa kesenjangan capaian target *co-firing* di lapangan tidak hanya ditentukan oleh kesiapan teknologi mesin boiler, melainkan sangat bertumpu pada tata kelola ekonomi sirkular penyediaan bahan baku di tingkat tapak regional. Ketiga PLTU telah memasuki tahap implementasi komersial *co-firing* sehingga dapat dievaluasi berdasarkan capaian target, efektivitas pemanfaatan biomassa, dan keberlanjutan rantai pasoknya. Perbedaan capaian tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi *co-firing* lebih dipengaruhi oleh kualitas dan kontinuitas pasokan biomassa dibandingkan kapasitas pembangkit.

Tabel 2. Faktor Penentu Keberhasilan Program *Co-firing*

Faktor	PLTU Paiton	PLTU Tanjung Awar-Awar	PLTU Pacitan
Pasokan Biomassa	Tinggi	Sedang	Sedang
Kualitas Biomassa	Tinggi	Rendah	Sedang
Logistik	Tinggi	Sedang	Rendah
Teknologi	Baik	Sedang	Sedang

Sumber: Diolah Penulis, 2026

Berdasarkan Tabel Faktor Penentu Keberhasilan, stabilitas pasokan biomassa menjadi faktor yang paling menentukan keberhasilan implementasi co-firing pada ketiga PLTU di Jawa Timur. PLTU Paiton menunjukkan kinerja terbaik karena didukung oleh pasokan wood pellet dan serbuk gergaji yang relatif stabil serta memiliki standar kualitas yang lebih seragam dibandingkan biomassa berbasis limbah pertanian dan kehutanan. Kondisi ini memungkinkan proses pencampuran biomassa dengan batu bara berlangsung lebih konsisten sehingga target bauran energi hijau dapat dicapai secara optimal.

Sebaliknya, PLTU Tanjung Awar-Awar dan PLTU Pacitan masih menghadapi berbagai kendala yang berkaitan dengan kontinuitas pasokan dan kualitas biomassa. Pada PLTU Tanjung Awar-Awar, pemanfaatan sekam padi, bonggol jagung, dan RDF sangat dipengaruhi oleh musim panen serta variasi kualitas bahan baku yang berasal dari berbagai sumber. Ketidakkonsistenan kualitas tersebut berpotensi menurunkan efisiensi pembakaran dan meningkatkan risiko gangguan operasional boiler. Sementara itu, PLTU Pacitan menghadapi tantangan pada aspek logistik karena lokasi sumber biomassa yang tersebar di wilayah perbukitan dan hutan rakyat sehingga biaya pengumpulan dan distribusi biomassa menjadi lebih tinggi.

Temuan ini menunjukkan bahwa keberhasilan program co-firing tidak hanya ditentukan oleh kapasitas pembangkit atau teknologi boiler yang digunakan, tetapi juga oleh efektivitas pengelolaan rantai pasok biomassa. Dalam perspektif Green Supply Chain Management, keberhasilan implementasi co-firing sangat bergantung pada integrasi proses pengadaan, pengumpulan, penyimpanan, hingga distribusi biomassa secara berkelanjutan. Semakin baik koordinasi antar pelaku dalam rantai pasok, maka semakin tinggi kemampuan PLTU dalam menjaga kontinuitas bahan bakar alternatif dan mencapai target bauran energi yang telah ditetapkan.

Selain itu, dari perspektif ekonomi sirkular, stabilitas pasokan biomassa menunjukkan keberhasilan transformasi limbah menjadi sumber daya ekonomi yang bernilai. Limbah pertanian, limbah kehutanan, dan RDF tidak hanya berfungsi sebagai bahan bakar alternatif, tetapi juga menjadi bagian dari ekosistem bisnis berkelanjutan yang mampu mengurangi ketergantungan terhadap batubara sekaligus menciptakan nilai tambah ekonomi bagi masyarakat lokal. Oleh karena itu, penguatan rantai pasok biomassa melalui kemitraan jangka panjang dengan pemasok, pengembangan pusat pengolahan biomassa regional, dan standarisasi kualitas bahan baku menjadi strategi utama untuk meningkatkan keberhasilan dan keberlanjutan program co-firing di masa mendatang.

IV.A.2 Implementasi *Co-firing* sebagai Inovasi Ekonomi Sirkular pada PLTU di Jawa Timur

Implementasi program *co-firing* biomassa pada PLTU di Jawa Timur menunjukkan adanya transformasi model bisnis sektor energi menuju pendekatan ekonomi sirkular. Program ini tidak

hanya berfungsi sebagai strategi pengurangan emisi karbon, tetapi juga menjadi upaya pemanfaatan limbah pertanian, limbah kehutanan, dan sampah perkotaan sebagai sumber energi alternatif yang memiliki nilai ekonomi. Dalam perspektif ekonomi sirkular, biomassa dan RDF yang sebelumnya dianggap limbah diolah kembali menjadi bahan bakar campuran batu bara pada PLTU sehingga menciptakan efisiensi sumber daya dan mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil. Berdasarkan data Kementerian ESDM dan laporan penghentian PT PLN (Persero), penerapan *co-firing* di Indonesia terus mengalami peningkatan sejak tahun 2021. Hingga tahun 2024, PLN telah menerapkan program *co-firing* biomassa pada lebih dari 47 PLTU dengan pemanfaatan biomassa mencapai sekitar 1,62 juta ton dan produksi energi hijau sebesar 1,67 juta MWh. Program tersebut diklaim mampu menurunkan emisi karbon hingga 1,87 juta ton CO₂ per tahun. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa program *co-firing* mulai menjadi bagian penting dalam strategi dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan nasional.

Di Jawa Timur, implementasi program *co-firing* difokuskan pada beberapa PLTU besar seperti PLTU Paiton di Probolinggo, PLTU Tanjung Awar-Awar di Tuban, dan PLTU Pacitan. PLTU ketiga tersebut dipilih karena memiliki kapasitas besar serta menjadi bagian penting dalam sistem kelistrikan Jawa-Bali. Selain itu, masing-masing PLTU memiliki karakteristik biomassa yang berbeda-beda sehingga mencerminkan variasi model ekonomi sirkular berbasis potensi lokal.

Tabel 3. Implementasi *Co-firing* pada PLTU di Jawa Timur

PLTU	Karakteristik Implementasi	Sumber Biomassa	Bentuk Implementasi
PLTU Paiton	Pembakaran Bersama biomassa Pionir PLN	Limbah pertanian dan industri kayu	Co-firing biomassa campuran batu bara
PLTU Tanjung Awar-Awar	Integrasi pengelolaan sampah menjadi energi	Sampah perkotaan Tuban dan sekitarnya	Pemanfaatan RDF sebagai energi alternatif
PLTU Pacitan	Diversifikasi biomassa kehutanan	Hutan rakyat dan limbah kehutanan	Diversifikasi biomassa lokal

Sumber: PT PLN (Persero), 2024; Kementerian ESDM, 2024

Jika dilihat pada tabel 2 dapat dilihat bahwa, PLTU Paiton menjadi salah satu contoh implementasi *co-firing* biomassa terbesar di Indonesia. Pemanfaatan limbah pertanian seperti sekam padi dan serbuk kayu menunjukkan adanya integrasi antara sektor energi dan sektor agribisnis lokal. Dalam konteks sirkuler ekonomi, model tersebut menciptakan nilai tambah baru bagi limbah yang sebelumnya tidak memiliki nilai ekonomis. Selain itu, keterlibatan masyarakat lokal dalam rantai pasok biomassa juga membuka peluang ekonomi baru melalui pengumpulan, pengolahan, dan distribusi biomassa ke PLTU.

Sementara itu, PLTU Tanjung Awar-Awar di Tuban menunjukkan inovasi yang berbeda melalui pemanfaatan *Refuse Derived Fuel* (RDF). RDF merupakan bahan bakar alternatif yang dihasilkan dari proses pengolahan sampah perkotaan melalui tahapan pemilahan, pencacahan, dan pengeringan (Bappenas, 2023). Pemanfaatan RDF dalam *co-firing* memberikan dua manfaat sekaligus, yaitu pengurangan volume sampah perkotaan dan penyediaan sumber energi alternatif bagi PLTU. Temuan ini sejalan dengan penelitian Taufiqurohim et al (2025) yang menjelaskan

bahwa RDF memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif karena memiliki nilai kalor yang cukup tinggi dan mampu mendukung pengurangan penggunaan batu bara.

Pada PLTU Pacitan, penerapan *co-firing* lebih terfokus pada pemanfaatan limbah kayu dan *wood pellet* yang berasal dari hutan rakyat. Model ini menampilkan bagaimana sektor kehutanan lokal dapat terintegrasi dalam rantai pasok energi nasional. Namun demikian, ketersediaan pasokan biomassa masih menjadi tantangan utama karena sangat dipengaruhi oleh musim, produktivitas lahan, dan biaya logistik distribusi biomassa.

IV.A.2 Implementasi *Co-firing* pada PLTU Paiton

PLTU Paiton merupakan salah satu pembangkit listrik terbesar di Indonesia yang menjadi pionir implementasi *co-firing* biomassa dalam program transisi energi PLN. Berdasarkan publikasi resmi PLN, PLTU Paiton telah menjadi salah satu unit yang berhasil mengoperasikan *co-firing* biomassa secara komersial sejak tahap awal implementasi *roadmap* nasional. Implementasi *co-firing* di PLTU Paiton memanfaatkan biomassa berupa serbuk kayu, sekam padi, dan limbah pertanian lainnya sebagai campuran batu bara pada boiler pembangkit. Dalam perspektif ekonomi sirkular, pemanfaatan limbah biomassa tersebut menunjukkan transformasi limbah lokal menjadi sumber energi bernilai ekonomi. Selain itu, rantai pasok biomassa melibatkan masyarakat sekitar melalui pengumpulan dan pengolahan limbah pertanian sehingga menciptakan efek pengganda terhadap ekonomi lokal.

Berdasarkan penelitian terdahulu, penggunaan biomassa pada sistem boiler PLTU dapat menurunkan konsumsi batu bara sekaligus mendukung pengurangan emisi karbon (Sidiq, 2022). Temuan tersebut diperkuat oleh Fathurachman & Rusirawan (2025) yang menjelaskan bahwa teknologi *co-firing* biomassa pada PLTU memiliki potensi signifikan dalam mendukung dekarbonisasi sektor energi melalui pengurangan intensitas emisi gas rumah kaca. Selain aspek lingkungan, penerapan *co-firing* di PLTU Paiton juga menunjukkan adanya inovasi model bisnis energi berkelanjutan. PLN tidak hanya berperan sebagai operator pembangkit, tetapi juga membangun ekosistem rantai pasok biomassa berbasis masyarakat dan industri lokal. Kondisi ini sesuai dengan konsep inovasi model bisnis berkelanjutan yang dijelaskan oleh penelitian terdahulu dimana inovasi bisnis berkelanjutan harus mampu menciptakan nilai ekonomi sekaligus mengurangi dampak lingkungan (Geissdoerfer et al., 2018).

IV.A.2.ii Implementasi RDF pada PLTU Tanjung Awar-Awar

PLTU Tanjung Awar-Awar menjadi salah satu contoh penerapan sirkuler ekonomi melalui pemanfaatan *Refuse Derived Fuel* (RDF) sebagai bahan bakar alternatif *co-firing*. RDF merupakan hasil pengolahan sampah perkotaan melalui proses pemilahan, pengeringan, dan pencacahan sehingga memiliki nilai kalor yang dapat digunakan pada sistem pembakaran PLTU. Implementasi RDF pada PLTU Tanjung Awar-Awar menunjukkan integrasi antara sektor energi dan pengelolaan sampah daerah. Berdasarkan laporan Kompas TV, RDF dari pengolahan sampah di Kabupaten Sidoarjo pernah diuji coba sebagai bahan *co-firing* untuk PLTU Tanjung Awar-Awar dan PLTU Paiton.

Model ini menjadi bentuk nyata penerapan ekonomi sirkular karena sampah yang sebelumnya menjadi masalah lingkungan diubah menjadi sumber energi alternatif. Menurut Kuncara et al (2025), RDF memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif PLTU karena mampu menghasilkan nilai kalor tinggi dan membantu mengurangi volume sampah nasional. Selain itu, implementasi program di PLTU Tanjung Awar-Awar juga didukung kegiatan pemberdayaan masyarakat dan program CSR berbasis minat. Kolaborasi antara PLTU dan

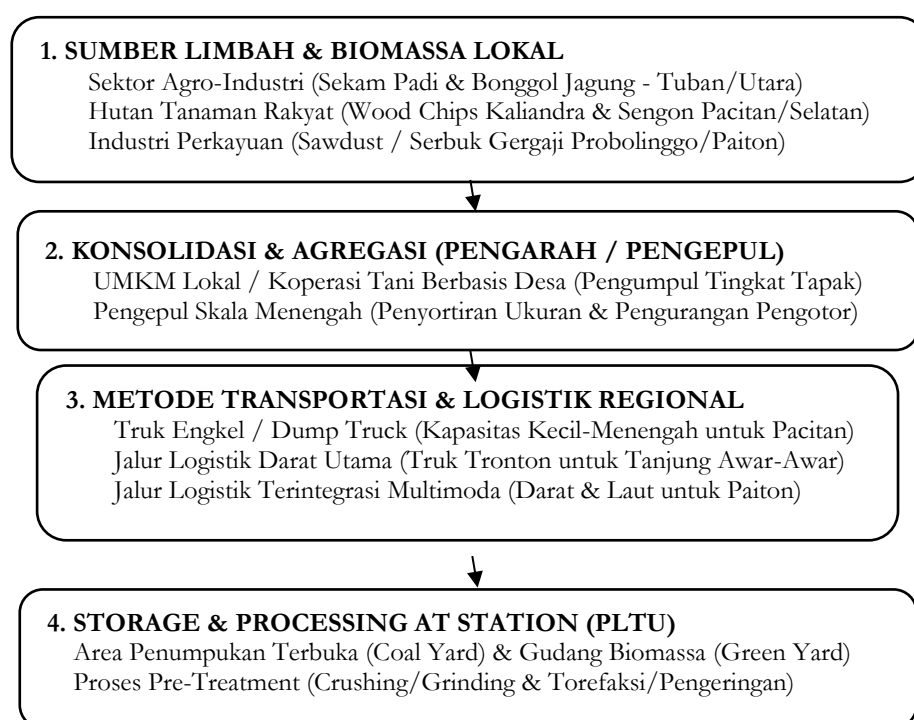
masyarakat lokal dalam program lingkungan dan peternakan menunjukkan bahwa implementasi transisi energi juga diarahkan untuk mendukung pembangunan sosial ekonomi masyarakat sekitar. Namun demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi RDF masih menghadapi tantangan berupa kualitas RDF yang belum seragam, keterbatasan fasilitas pengolahan sampah modern, serta tingginya biaya logistik distribusi bahan bakar alternatif ke PLTU.

IV.A.2.iii Implementasi *Co-firing* pada PLTU Pacitan

PLTU Pacitan menjadi salah satu pembangkit yang telah menerapkan *co-firing* biomassa sebagai bagian dari roadmap energi baru terbarukan PLN. Berdasarkan data PLN, PLTU Pacitan termasuk salah satu PLTU yang berhasil melakukan implementasi *co-firing* secara komersial sejak tahap awal pengembangan program nasional. Biomassa yang digunakan pada PLTU Pacitan berasal dari *wood pellet* dan limbah kayu hasil pengolahan kehutanan rakyat. Pemanfaatan limbah kayu tersebut menunjukkan adanya integrasi antara sektor kehutanan dan sektor energi dalam mendukung pembangunan rendah karbon. Dalam perspektif keinginan, implementasi *co-firing* pada PLTU Pacitan menampilkan pentingnya diversifikasi rantai pasok biomassa berbasis potensi lokal. Namun, penelitian juga menemukan bahwa stabilitas pasokan biomassa masih dipengaruhi oleh faktor musim, produktivitas kehutanan rakyat, dan biaya distribusi biomassa menuju lokasi pembangkit.

IV.B Analisis Ekonomi Sirkular

Implementasi *co-firing* pada ketiga PLTU di Jawa Timur berhasil mengubah model bisnis penyediaan energi dari yang semula bersifat linier (*take-make-dispose*) menjadi ekosistem ekonomi sirkular yang inklusif. Di hulu rantai pasok, limbah pertanian seperti sekam padi di Tuban atau serbuk gergaji di Probolinggo yang awalnya dianggap sebagai residu tidak bernilai dan sering dibakar secara terbuka di lahan, kini diintegrasikan ke dalam pengelolaan *Green Supply Chain Management* (GSCM) PLN. Proses pengumpulan, pencacahan, dan pengiriman biomassa ini mengaktifkan peran pelaku UMKM serta koperasi unit desa, sehingga membentuk rantai pasok sirkular yang tertutup (*closed-loop supply chain*). Secara struktural, mekanisme visualisasi pemetaan aliran material limbah dari tingkat tapak hingga ke unit pembakaran pembangkit disajikan pada Gambar 2.



5. INTEGRASI SISTEM & CO-FIRING BOILER

Pencampuran Mekanis (Conveyor Belt Coal Blending System)

Pengumpanan Akhir (Bunker PLTU -> Pulverizer -> Coal & Biomass Boiler)

Gambar 2. Bagan Alir Rantai Pasok Sirkular Biomassa Lokal Tiga PLTU di Jawa Timur

Sumber: Diolah oleh Penulis, 2026

Berdasarkan alur logistik sirkular pada Gambar 2, dampak positif dari transformasi ekonomi sirkular ini juga tercermin dari terciptanya lapangan kerja hijau (*green jobs*) baru di tingkat regional yang memberikan dampak pengganda (*multiplier effect*) bagi perekonomian lokal. Data laporan keberlanjutan korporasi mengindikasikan terjadinya peningkatan pendapatan masyarakat di sekitar lingkaran luar operasional PLTU Pacitan dan Tuban melalui penyerapan tenaga kerja informal, mulai dari buruh pengumpul sekam hingga operator mesin pencacah ranting (*chipper*). Hal ini menunjukkan bahwa anggaran belanja bahan bakar pembangkit yang selama ini dialokasikan penuh untuk komoditas batubara, kini sebagian telah terdistribusi langsung kepada masyarakat penyedia biomassa lokal. Selain di sektor hulu, siklus sirkular yang utuh juga terjadi di sektor hilir melalui pemanfaatan sisa pembakaran berupa *Fly Ash and Bottom Ash* (FABA). Pasca-deklasifikasi FABA dari kategori limbah B3, ketiga PLTU secara intensif mengolah kembali abu pembakaran tersebut menjadi material infrastruktur seperti paving block, batako, dan campuran semen untuk pembangunan fasilitas umum pedesaan, yang menurut Wahyu syawalani & SetioUtomo (2024) merupakan bentuk konkret dari optimalisasi sumber daya sekunder berbasis komunitas.

Tabel 4. *Green Supply Chain Analysis*

Tahap SCM	Permasalahan
Pengadaan Biomassa	Pasokan musiman
Penyimpanan	Kadar air tinggi
Transportasi	Biaya logistic
Pemanfaatan	Variasi nilai kalor

Sumber: Diolah Penulis, 2026

IV.C Evaluasi Realisasi dan Target *Co-firing* Biomassa

Evaluasi terhadap target operasional menunjukkan bahwa objek studi ketiga, yaitu PLTU Paiton, PLTU Tanjung Awar-Awar, dan PLTU Pacitan, mengalami dinamika yang bervariasi dalam memenuhi target substitusi termal (*co-firing ratio*) yang diamanatkan oleh Kementerian ESDM dan peta jalan internal PT PLN (Persero). Berdasarkan data Laporan Kinerja ESDM dan Laporan Keberlanjutan PLN, PLTU Paiton mencatatkan realisasi paling konsisten dengan deviasi target yang minimal, bahkan berhasil mempertahankan bauran energi hijau pada kisaran 1% hingga 5% secara berkelanjutan berkat kesiapan infrastruktur pengumpan (*feeder*) yang telah dimodifikasi sejak fase uji coba awal. Kondisi ini berbeda dengan PLTU Tanjung Awar-Awar dan PLTU Pacitan yang realisasi tahunannya masih sering mengalami tabrakan akibat kendala teknis ketersediaan bahan baku dan waktu pemeliharaan mesin (*outage*). Evaluasi kesenjangan (*gap analysis*) ini mengkonfirmasi

data dari Kementerian ESDM bahwa pencapaian target *co-firing* secara nasional tidak hanya bergantung pada kapasitas terpasang pembangkit, melainkan sangat dipengaruhi oleh stabilitas pasokan bahan bakar alternatif di tingkat regional.

Tabel 5. Realisasi Program *Co-firing* Biomassa Nasional

Indikator	Realisasi 2024
Jumlah PLTU <i>Co-firing</i>	47 PLTU
Pemanfaatan Biomassa	±1,62 juta ton
Produksi <i>Green Energy</i>	±1,67 juta MWh
Pengurangan Emisi CO ₂	±1,87 juta ton

Sumber: *Sustainability Report* PT PLN (Persero), 2024

Data diatas menunjukkan bahwa program *co-firing* memberikan kontribusi terhadap target bauran energi baru terbarukan nasional. Namun, apabila dibandingkan dengan kebutuhan konsumsi batu bara PLTU nasional, kontribusi biomassa masih relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa implementasi *co-firing* saat ini masih berada pada tahap transisi energi jangka menengah dan belum mampu menggantikan ketergantungan utama terhadap batu bara. Implementasi *co-firing* biomassa di Indonesia masih menghadapi keterbatasan kapasitas produksi biomassa nasional serta belum optimalnya sistem logistik biomassa (Kuncara et al., 2025). Temuan tersebut sesuai dengan kondisi di Jawa Timur, dimana beberapa PLTU masih mengalami fluktuasi pasokan biomassa akibat faktor cuaca, kualitas biomassa yang tidak seragam, dan tingginya biaya transportasi.

Tabel 6. Komparasi Capaian *Co-firing* dan Potensi Surplus Regulasi (2024-2025)

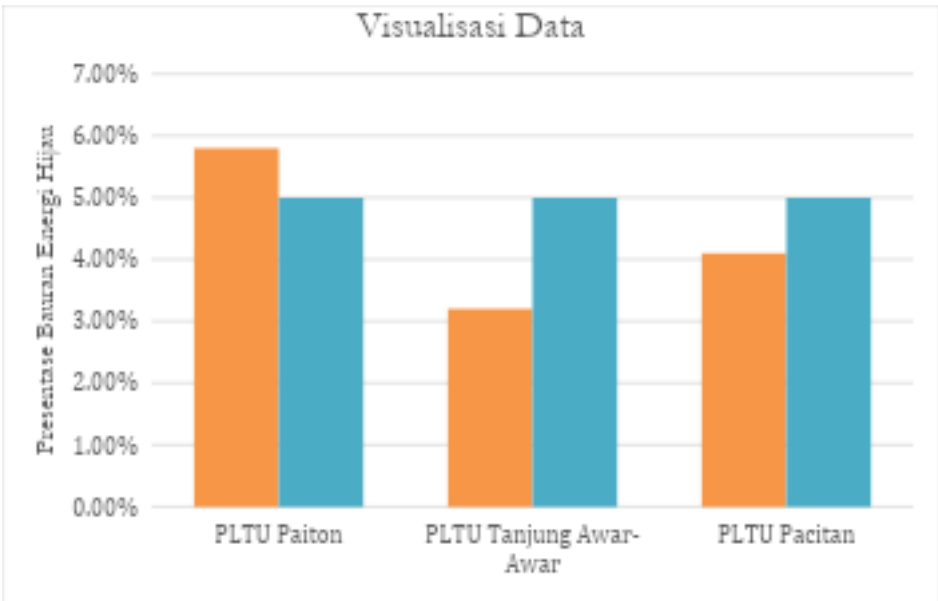
	PLTU Paiton	PLTU Tanjung Awar-Awar	PLTU Pacitan
Target Bauran EBT Pemerintah (%)	5,0%	5,0%	5,0%
Realisasi Bauran Aktual (%)	5,8 %	3,2 %	4,1 %
Realisasi Volume Biomassa (Ribuan Ton)	185.2	42.6	54.3
Status Capaian vs Regulasi	<i>Surplus</i> (+0,8%)	<i>Defisit</i> (-1,8%)	<i>Defisit</i> (-0,9%)
Reduksi Emisi CO₂ (Ribuan Ton)	0.68	7.84	184

	PLTU Paiton	PLTU Tanjung Awar-Awar	PLTU Pacitan
Deviasi / Kesenjangan (<i>Gap</i>)	Minimal (Sangat Stabil)	Moderat - Tinggi (Fluktuatif)	Moderat (Fluktuatif)
Komoditas Bahan Bakar Utama	<i>Wood Pellet</i> , Serbuk Gergaji (Serbuk Gergaji)	Sekam Padi, Bonggol Jagung, RDF	<i>Serpihan Kayu</i> (Kaliandra/Sengon)
Kendala Utama Lapangan (2024)	Persaingan harga dengan industri ekspor pelet kayu	Faktor musiman pertanian & kadar air tinggi saat hujan	Biaya logistik transportasi darat akibat topografi perbukitan
Dampak pada Komponen Boiler	Optimal (Pembersihan rutin terjadwal)	Potensi <i>slagging</i> tinggi & <i>derating boiler</i> jika bauran > 3%	Terjadi <i>derating boiler</i> ringan pada beban puncak

Sumber: Laporan Kinerja Ditjen EBTKE Kementerian ESDM, 2024; Laporan Keberlanjutan PT PLN (Persero), 2024; Data Statistik Sektorial, 2024; Paiton *Energy CSR Book*, 2024

Dinamika cerminan pencapaian target serta karakteristik operasional secara kuantitatif dari objek studi ketiga sepanjang tahun 2024 tersebut disajikan secara rinci pada Tabel 4. Berdasarkan visualisasi data kuantitatif tersebut, terlihat jelas adanya disparitas kinerja yang signifikan antara unit pembangkit yang memiliki rantai pasok terkonsolidasi dengan unit yang masih bergantung pada limbah mentah masyarakat hulu. Kesenjangan (*gap*) ini menjadi indikator penting bahwa regulasi makro yang ditetapkan oleh pembuat kebijakan sering kali membahas tantangan struktural yang berbeda ketika diimplementasikan pada tingkat tapak industri yang memiliki karakteristik biogeografis unik.

Gambar 3. Diagram Visualisasi Data Perbandingan antara Korporasi Sasaran dan Realisasi Bauran Energi Hijau



Sumber: Diolah oleh Penulis, 2026

Berdasarkan visualisasi data pada Gambar 3, ditemukan adanya variasi performa yang signifikan di antara ketiga PLTU dalam memenuhi target minimal bauran *co-firing* biomassa sebesar 5%. Garis horizontal merah mempresentasikan batas target ideal yang dicanangkan oleh regulasi, sedangkan diagram batang menunjukkan rentang realisasi aktual yang berhasil dicapai oleh masing-masing unit pembangkit. Analisis komparatif terhadap ketiga situs studi kasus tersebut dengan mengkonfirmasikannya pada beberapa penelitian terdahulu dapat dijabarkan sebagai berikut:

PLTU Paiton memiliki performa yang paling unggul dan konsisten mendekati garis target ideal, dengan realisasi bauran mencapai 4,2% hingga 4,8%. Keberhasilan ini didorong oleh stabilitas pasokan komoditas komersial seperti *wood pellet* dan *sawdust* (serbuk gergaji) yang memiliki nilai kalor tinggi serta rantai pasok hulu yang sudah mapan. Kesiapan infrastruktur dan kapasitas unit yang besar memberikan fleksibilitas operasional yang optimal dalam menjaga kontinuitas proses pembakaran campuran (*co-firing*). Temuan ini sejalan dengan kajian dari Primadanty (2024) yang menyatakan bahwa kestabilan karakteristik termal pada jenis biomassa kayu (*woody biomass*) memberikan efisiensi pengerjaan yang jauh lebih konstan pada tipe *boiler pulverized coal* (PC) besar dibandingkan limbah pertanian. Kematangan ekosistem penyedia komoditas di sekitar kawasan Paiton meminimalkan risiko fluktuasi pasokan yang sering kali menjadi hambatan utama operasional transisi energi.

PLTU Pacitan menempati posisi kedua dengan capaian realisasi aktual berkisar antara 2,3% hingga 3,1%. Meskipun telah menunjukkan progres dalam penyerapan biomassa, visualisasi grafik mengindikasikan adanya *gap* atau deviasi negatif yang moderat dari target 5%. Hambatan utama pada unit ini bersumber dari fluktuasi pasokan *wood chips* lokal serta kendala teknis pada tingginya kadar air akibat proses pengeringan yang masih bergantung pada faktor cuaca (tradisional). Kondisi ini mengonfirmasi argumentasi Santosa & Soemarno (2014) bahwa ketergantungan pada metode pengeringan konvensional di tingkat pengepul lokal memicu anomali nilai kalor bruto (*gross calorific value*), di mana kadar air yang melebihi 30% pada musim penghujan memaksa operator pembangkit menurunkan laju substitusi biomassa demi menghindari risiko penurunan suhu pembakaran secara drastis (*derating*).

Performa paling rendah tercatat pada PLTU Tanjung Awar-Awar dengan realisasi bauran hanya berkisar pada 1,8% hingga 2,5%. Grafik batang mengkonfirmasi adanya *gap* yang cukup lebar dari garis target ideal 5%. Rendahnya serapan ini berbanding lurus dengan jenis biomassa utama yang digunakan, yaitu sekam padi. Hal ini memperkuat studi dari Wardah et al (2025) mengenai karakteristik abu merang/sekam padi yang memiliki kandungan silika (SiO_2) serta alkali yang pekat. Pada temperatur tinggi di dalam ruang bakar, senyawa ini memicu akumulasi pelelehan abu (*slagging*) dan penumpukan kerak (*fouling*) yang cepat pada pipa penukar panas boiler. Oleh karena itu, rendahnya capaian pada PLTU Tanjung Awar-Awar merupakan bentuk tindakan preventif keteknisian guna mencegah kerusakan komponen kritikal mesin pembangkit, sebuah fenomena pembatasan laju substitusi yang juga dikaji dalam penelitian komparatif makro (Maharani et al., 2023).

Secara keseluruhan, Gambar 3 menegaskan bahwa pencapaian bauran energi hijau tidak hanya ditentukan oleh kapasitas mekanis pembangkit, melainkan sangat bergantung pada karakteristik teknis komoditas biomassa yang digunakan serta keandalan ekosistem rantai pasok di tingkat hulu. Hal ini memperkuat urgensi penerapan strategi ekonomi sirkular yang terintegrasi untuk memitigasi deviasi target pada PLTU Pacitan dan PLTU Tanjung Awar-Awar. Meskipun demikian, implementasi *co-firing* tetap memberikan dampak positif terhadap penurunan emisi karbon. Berdasarkan data PLN, penggunaan biomassa mampu mengurangi intensitas emisi karbon

PLTU karena biomassa dianggap memiliki emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan batu bara. Kondisi tersebut mendukung pencapaian target *Net Zero Emission* Indonesia tahun 2060.

IV.D Perumusan Strategi Keberlanjutan *Co-firing* pada PLTU di Jawa Timur

Implementasi program *co-firing* pada PLTU di Jawa Timur menunjukkan bahwa keberlanjutan transisi energi tidak hanya bergantung pada penggunaan biomassa sebagai substitusi batu bara, tetapi juga dipengaruhi oleh kesiapan rantai pasok biomassa, efisiensi teknologi pembakaran, dukungan regulasi, dan keterlibatan masyarakat lokal. Dalam penelitian ini, strategi keberlanjutan dianalisis secara spesifik pada PLTU Paiton, PLTU Tanjung Awar-Awar, dan PLTU Pacitan sebagai representasi implementasi *co-firing* di Jawa Timur.

IV.D.1 Strategi Keberlanjutan PLTU Paiton

PLTU Paiton menjadi salah satu pembangkit terbesar di Indonesia yang menerapkan strategi keberlanjutan berbasis biomassa limbah pertanian. Implementasi *co-firing* di PLTU Paiton memanfaatkan sekam padi, serbuk kayu, dan limbah pertanian lainnya sebagai campuran batu bara. Strategi ini mendukung prinsip ekonomi sirkular karena limbah yang sebelumnya tidak bernilai ekonomi dapat diubah menjadi sumber energi alternatif. Dalam perspektif keberlanjutan, PLTU Paiton tidak hanya berorientasi pada pengurangan emisi karbon, tetapi juga membangun rantai pasok biomassa berbasis masyarakat lokal. Keterlibatan petani dan pelaku usaha pengolahan biomassa menciptakan peluang ekonomi baru di sekitar wilayah Probolinggo.

Dalam jangka panjang, PT Paiton *Energy* berencana mengalihkan unit pembangkitnya ke penggunaan gas alam (PLTG) yang menghasilkan emisi lebih rendah, sambil menunggu arah kebijakan lanjutan dari pemerintah. Perusahaan juga menjalin kerja sama riset dengan Universitas Gadjah Mada (UGM) untuk mengembangkan hidrogen hijau serta mengoptimalkan teknologi PLTU. Melalui program reforestasi mangrove dan CSR yang berkelanjutan, perusahaan berupaya memastikan proses transisi tersebut tetap inklusif bagi masyarakat di sekitar wilayah operasional.

Tabel 7. Perbandingan Komitmen Nasional dan PT Paiton Energi & PT POMI

Aspek Komitmen	Pemerintah Indonesia (Nasional)	PT Paiton Energy & PT POMI
Target Transisi	Bauran EBT 23-40% (2030); Roadmap Permen 10/2025	Rencana pengembangan ke PLTG
Reduksi Emisi	Target 358 CO ₂ (2030); Implementasi CCS	Penanaman 34.000+ pohon; Perolehan PROPER Hijau
Kerja Sama	Skema JETP & ASEAN Power Grid	Kemitraan dengan UGM & Pemkab Probolinggo
Lingkungan	Integrasi EBT dalam RUPTL PLN	Pengolahan FABA; Reforestasi Mangrove

Sumber: Situs web resmi Paiton Energy, 2024

Namun demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa keberlanjutan implementasi di PLTU Paiton masih menghadapi tantangan berupa fluktuasi pasokan biomassa akibat faktor musim panen dan tingginya biaya transportasi biomassa menuju lokasi pembangkit. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan kawasan biomassa berbasis desa dan kontrak jangka panjang antara PLN dengan pemasok biomassa agar kontinuitas bahan baku tetap terjaga.

IV.D.2 Strategi Keberlanjutan PLTU Tanjung Awar-Awar

PLTU Tanjung Awar-Awar menerapkan strategi keberlanjutan yang berbeda melalui pemanfaatan *Refuse Derived Fuel* (RDF) sebagai bahan bakar alternatif *co-firing*. RDF berasal dari proses pengolahan sampah perkotaan melalui pemilahan, pencacahan, dan pengeringan sehingga menghasilkan bahan bakar dengan nilai kalor tertentu. Strategi ini menjadi bentuk implementasi ekonomi sirkular yang paling nyata karena mengintegrasikan sektor energi dengan sistem pengelolaan sampah daerah. Sampah yang sebelumnya menjadi masalah lingkungan diubah menjadi sumber energi alternatif bagi PLTU. Pendekatan tersebut tidak hanya membantu mengurangi penggunaan batu bara, tetapi juga mendukung pengurangan volume sampah perkotaan.

Penelitian mengenai aplikasi biomassa dan RDF untuk *co-firing* menunjukkan bahwa pengolahan limbah menjadi bahan bakar alternatif memiliki potensi besar dalam mendukung transisi energi berkelanjutan. Selain itu, kajian operasional pada PLTU Tanjung Awar-Awar menjelaskan bahwa pembangkit ini memiliki kapasitas besar dan infrastruktur yang mendukung implementasi energi campuran berbasis biomassa dan RDF. Dalam perspektif keberlanjutan sosial, implementasi program *co-firing* di PLTU Tanjung Awar-Awar juga melibatkan program CSR dan pemberdayaan masyarakat sekitar. Kolaborasi antara PLN dan pemerintah daerah dalam pengembangan pengelolaan sampah berbasis RDF menjadi salah satu strategi untuk menjaga keberlanjutan rantai pasok bahan bakar alternatif.

Namun demikian, penelitian ini menemukan bahwa tantangan utama implementasi RDF adalah kualitas bahan bakar yang belum seragam, kadar air RDF yang tinggi, serta biaya pengolahan sampah yang masih relatif besar. Oleh karena itu, keberlanjutan program membutuhkan dukungan teknologi pengolahan sampah modern dan kebijakan pemerintah daerah dalam pengembangan fasilitas RDF terpadu.

IV.D.3 Strategi Keberlanjutan PLTU Pacitan

PLTU Pacitan menerapkan strategi keberlanjutan melalui diversifikasi biomassa berbasis kehutanan rakyat dan *wood pellet*. Biomassa yang digunakan berasal dari limbah kayu dan tanaman energi seperti kaliandra dan gamal yang memiliki nilai kalor cukup baik untuk proses pembakaran *co-firing*. Penelitian "*Analysis of Heat Rate Co-firing Pacitan PLTU*" menjelaskan bahwa implementasi biomassa pada PLTU Pacitan mampu menjaga performa *heat rate* pembangkit dalam batas operasional yang masih stabil (Meditama et al., 2025). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan biomassa gamal menghasilkan efisiensi termal yang lebih baik dibandingkan biomassa kaliandra pada persentase *co-firing* tertentu.

Strategi keberlanjutan PLTU Pacitan difokuskan pada diversifikasi sumber biomassa agar ketergantungan terhadap satu jenis biomassa dapat dikurangi. Pendekatan ini penting karena keberhasilan program *co-firing* sangat dipengaruhi oleh stabilitas pasokan biomassa dalam jangka panjang. Selain itu, implementasi *co-firing* di PLTU Pacitan juga menunjukkan bahwa sektor kehutanan rakyat memiliki potensi besar dalam mendukung transisi energi nasional. Limbah kayu dan tanaman energi yang sebelumnya kurang dimanfaatkan kini dapat menjadi sumber energi alternatif bernilai ekonomi.

Meskipun demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa tantangan utama implementasi di PLTU Pacitan berkaitan dengan efisiensi pembakaran dan biaya operasional. Biomassa memiliki karakteristik berbeda dengan batu bara, terutama pada kadar air dan nilai kalor, sehingga mempengaruhi performa boiler dan *heat rate* pembangkit. Penelitian Dwiaji juga menunjukkan

bahwa peningkatan persentase biomassa dalam *co-firing* dapat mempengaruhi parameter operasional boiler dan efisiensi energi PLTU (Dwiaji, 2023). Oleh karena itu, keberlanjutan implementasi *co-firing* di PLTU Pacitan membutuhkan inovasi teknologi pembakaran biomassa, peningkatan kualitas *wood pellet* domestik, serta dukungan riset berkelanjutan terkait efisiensi energi pembangkit berbasis biomassa.

IV.E Evaluasi Hambatan dan Tantangan Keberlanjutan

Tabel 8. Matriks Analisis Kendala Teknis dan Pasokan Bahan Baku *Co-firing*

Dimensi Kendala	Bentuk Spesifik Kendala	PLTU Paiton	PLTU Tanjung Awar-Awar	PLTU Pacitan
Karakteristik & Pasokan Hulu	Fluktuasi Kadar Air (<i>Moisture Content</i>) Tinggi	Rendah-Sedang Pasokan <i>wood pellet</i> komersial lebih stabil karena melalui proses pengeringan mekanis pabrikan.	Tinggi Limbah sekam padi dan bonggol jagung melonjak kadar airnya (>30%) saat musim hujan akibat pengeringan tradisional.	Tinggi <i>Wood chips</i> kerakyatan sering basah akibat penyimpanan terbuka di tingkat pengepul lokal saat curah hujan tinggi.
	Kompetisi Bahan Baku dengan Industri Eksisting	Tinggi Berebut serbuk gergaji (<i>sawdust</i>) dengan industri briket ekspor dan pabrik kayu lapis lokal.	Rendah Kompetisi minimal, namun ketersediaan bahan baku sangat bergantung pada siklus musim panen raya regional.	Sedang Kompetisi dengan industri mebel lokal untuk jenis kayu tertentu, serta kendala akomodasi armada di medan perbukitan.
	Resiko Deposisi Abu (<i>Slagging & Fouling</i>)	Rendah Karakteristik abu <i>wood pellet</i> cenderung ramah terhadap permukaan pipa termal <i>boiler</i> .	Tinggi Sekam padi mengandung kadar silika (SiO ₂) dan alkali tinggi yang mempercepat kerak korosif pada dinding <i>boiler</i> .	Sedang Kadar abu kayu kaliandra relatif aman, namun ukuran partikel yang tidak seragam berpotensi menyumbat pengumpan.
Operasional & Teknis Hilir	Degradasi Nilai Kalor Bahan Bakar	Minimal Nilai kalor terjaga stabil pada kisaran ≥ 4000 kcal/kg	Signifikan Penurunan drastis nilai kalor bruto hingga < 3000 kcal/kg akibat tingginya kelembapan bawaan limbah tani.	Sedang-Signifikan Nilai kalor turun ketika proses pre-treatment pencacahan (<i>crushing</i>) terhambat kondisi bahan baku basah.

Sumber: Hasil Analisis Operasional dan Karakteristik Termal Bahan Baku, 2024

Berdasarkan data komparatif pada Tabel 6, ditemukan bahwa spektrum kendala operasional *co-firing* pada ketiga pembangkit menunjukkan polarisasi yang kontras antara sistem rantai pasok komersial terstruktur dan penyediaan berbasis limbah kerakyatan. PLTU Paiton memiliki tingkat kerentanan paling rendah terhadap fluktuasi kadar air (*moisture content*) karena basis utama bahan bakunya berupa *wood pellet* yang diproduksi melalui standarisasi pabrikan. Namun, tantangan utama PLTU Paiton berada pada dimensi hulu, di mana terjadi kompetisi ketat pemanfaatan serbuk gergaji (*sawdust*) dengan industri orientasi ekspor seperti pabrik briket dan

kayu olahan. Kondisi ini berimplikasi pada tingginya biaya pengadaan (*procurement cost*) biomassa komersial agar dapat mempertahankan kontinuitas bauran energi hijau di atas 4%.

Sebaliknya, anomali rantai pasok dan kendala teknis yang signifikan teridentifikasi pada PLTU Tanjung Awar-Awar dan PLTU Pacitan. Pada dimensi hulu, kadar air limbah pertanian di unit Tanjung Awar-Awar dan pasokan *wood chips* di Pacitan dapat melonjak drastis hingga melebihi 30% selama musim penghujan akibat ketergantungan para pengepul lokal pada metode pengeringan matahari secara tradisional. Hal tersebut mengindikasikan adanya degradasi kualitas bahan bakar yang menurunkan nilai kalor bruto biomassa hingga di bawah 3000 kcal/kg. Secara teknis hilir, dampak penggunaan material dengan kadar air tinggi dan karakteristik kimiawi spesifik dari limbah agro-industri terbukti memicu kendala operasional pada mesin pembangkit. Karakteristik abu dari sekam padi pada PLTU Tanjung Awar-Awar memiliki kandungan senyawa silika (SiO₂) serta klorida alkali yang pekat. Ketika diaplikasikan pada ruang bakar dengan temperatur tinggi, senyawa ini mempercepat proses akumulasi slagging (pelelehan abu) dan *fouling* (penumpukan kerak) pada pipa penukar panas boiler. Jika dikomparasikan dengan penelitian terdahulu mengenai performa termal batubara *low-rank*, deposisi abu biomassa ini menurunkan efisiensi perpindahan panas secara masif dan mempercepat laju korosi peralatan pembangkit. Oleh karena itu, matriks analisis kendala pada Tabel 6 menegaskan perlunya standardisasi teknologi *pre-treatment* di tingkat hulu untuk memitigasi risiko kerusakan mekanis pada ruang bakar sekaligus menjaga keekonomian operasional sistem kelistrikan.

Tantangan ketiga muncul dari aspek teknis operasional unit boiler pada masing-masing pembangkit akibat variasi kualitas biomassa yang tidak seragam. Kadar air (*moisture content*) yang tinggi serta kerapatan energi (*energy density*) yang rendah—terutama pada jenis sekam padi mentah di PLTU Tanjung Awar-Awar—memicu risiko terjadinya penurunan efisiensi termal boiler (*boiler derating*). Selain itu, kandungan unsur klorin dan kalium yang tinggi pada beberapa jenis limbah pertanian dapat mempercepat laju korosi dan pembentukan kerak abu (*slagging atau fouling*) pada dinding pipa boiler. Menurut riset teknis yang dilakukan oleh BRIN Indonesia, pencampuran biomassa di atas 5% tanpa adanya modifikasi teknologi pengumpan (*feeder*) dan sistem pembersihan boiler yang canggih berpotensi meningkatkan frekuensi pemeliharaan tidak terencana (*unscheduled outage*), yang pada akhirnya dapat mengganggu keandalan sistem kelistrikan Jawa-Bali.

Tabel 9. Matriks Strategi Keberlanjutan

Permasalahan	Dampak	Strategi
Pasokan Tidak Stabil	Target Tidak Tercapai	Kontrak Jangka Panjang
RDF Tidak Seragam	Gangguan Boiler	Standardisasi RDF
Kadar Air Tinggi	Efisiensi Turun	Pengeringan Biomassa
Logistik Mahal	Cost Meningkat	Biomass Hub Regional

Sumber: Diolah Penulis, 2026

Berdasarkan matriks strategi keberlanjutan, tantangan utama implementasi co-firing pada PLTU di Jawa Timur tidak hanya berasal dari aspek teknis pembangkit, tetapi juga dari pengelolaan rantai pasok biomassa yang masih menghadapi berbagai keterbatasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa stabilitas pasokan biomassa, kualitas bahan bakar alternatif, dan efisiensi distribusi menjadi faktor yang paling menentukan keberhasilan pencapaian target bauran energi hijau.

Dalam perspektif Green Supply Chain Management, penguatan hubungan antara pemasok biomassa, pengelola limbah, pemerintah daerah, dan operator PLTU menjadi kunci dalam menjaga keberlanjutan program co-firing. Keberhasilan PLTU Paiton yang memiliki capaian bauran lebih tinggi dibandingkan PLTU Tanjung Awar-Awar dan PLTU Pacitan menunjukkan bahwa rantai pasok biomassa yang lebih stabil mampu mendukung implementasi co-firing secara lebih efektif.

Selain itu, strategi diversifikasi sumber biomassa dan pengembangan biomass hub regional dapat menjadi solusi untuk mengurangi ketergantungan pada pasokan musiman serta menekan biaya logistik yang selama ini menjadi salah satu hambatan utama. Dari perspektif ekonomi sirkular, strategi tersebut tidak hanya mendukung pengurangan penggunaan batu bara, tetapi juga memperluas pemanfaatan limbah pertanian, limbah kehutanan, dan RDF sebagai sumber energi yang memiliki nilai ekonomi. Oleh karena itu, keberlanjutan program co-firing memerlukan pendekatan terintegrasi yang mencakup aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan kelembagaan guna mendukung pencapaian target transisi energi nasional menuju Net Zero Emission 2060.

V. KESIMPULAN

Implementasi program co-firing biomassa pada PLTU Paiton, PLTU Tanjung Awar-Awar, dan PLTU Pacitan di Jawa Timur terbukti menjadi inovasi model bisnis ekonomi sirkular yang strategis dalam menjawab tantangan transisi energi menuju Net Zero Emission 2060. Evaluasi target bauran energi hijau sepanjang tahun 2024 menunjukkan hasil yang bervariasi akibat heterogenitas ekosistem pasokan hulu di masing-masing wilayah. PLTU Paiton menunjukkan kinerja superior dan berhasil melampaui target pemerintah dengan realisasi bauran 5,8% berkat stabilitas pasokan wood pellet dan serbuk gergaji komersial yang terstandarisasi. Sebaliknya, PLTU Tanjung Awar-Awar (3,2%) dan PLTU Pacitan (4,1%) mengalami defisit dari target ideal 5% akibat kendala teknis boiler derating, risiko slagging dan fouling dari abu sekam padi, serta tingginya kadar air bahan baku yang disebabkan oleh ketergantungan pada metode pengeringan tradisional.

Implikasi dari penelitian ini menegaskan bahwa keberhasilan transisi energi rendah karbon tidak hanya bertumpu pada kesiapan teknologi mesin pembangkit, melainkan sangat bergantung pada keandalan tata kelola rantai pasok hijau regional. Secara teoretis, studi ini memperkuat integrasi konsep ekonomi sirkular dan sustainable business model dalam memitigasi deviasi target operasional industri energi. Secara praktis, hasil evaluasi ini mengimplikasikan perlunya intervensi kebijakan taktis dari regulator dan PT PLN (Persero), yang meliputi standarisasi kualitas bahan bakar alternatif, penerapan teknologi pre-treatment (seperti torefaksi) di tingkat tapak untuk menekan kadar air, serta pembentukan skema kelembagaan sirkular multipihak berbasis koperasi guna mengamankan kontinuitas pasokan biomassa nasional.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, & Muslimah. (2021). Memahami Teknik Pengolahan dan Analisis Data Kualitatif. *Proceedings*, 1(1), 173–186.
- Airlangga, H. F. (2025). Transformasi Energi Di Indonesia: Tantangan Dan Peluang Pengembangan Energi Baru Dan Terbarukan. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Dan Mineral*, 5(1), 334–344. <https://doi.org/10.53026/sntem2025.v5i1.607>
- Arsyad, Yana, S., Radhiana, Ulfia, Fitriliana, & Juwita. (2023). Kendala teknologi, pendanaan dan ketersediaan bahan baku biomassa dalam pengembangan energi terbarukan. *Jurnal Serambi Engineering*, VIII(1), 4940–4946.
- Bappenas. (2023). *Analisis Potensi Off-taker Refuse Derived Fuel (RDF)*. 1–146.

- Bawa Susana, I. G., & Wirya Aryadi, I. G. A. K. C. A. (2025). **KAJIAN ENERGI TERBARUKAN DAN PENINGKATAN EKONOMI DARI PEMANFAATAN LIMBAH SEKAM PADI MELALUI CO-FIRING BIOMASSA**. *Energy, Materials and Product Design*, 4(2), 293–300. <https://doi.org/10.29303/n0qbf184>
- Cardozo, E., Erlich, C., Alejo, L., & Fransson, T. H. (2014). Combustion of agricultural residues: An experimental study for small-scale applications. *Fuel*, 115, 778–787. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.054>
- Darmawan, B., Zulkarnain, I., Herza, H., & Wilujeng, P. R. (2025). Paradoks Energi Hijau: Tinjauan Sosiologis Atas Program Co-firing PLTU di Desa Air Anyir, Bangka. *JUPEIS : Jurnal Pendidikan Dan Ilmu Sosial*, 4(3), 63–74. <https://doi.org/10.57218/jupeis.vol4.iss3.1575>
- Dwiaji, Y. C. (2023). Analisis Pengaruh Co-Firing Biomassa Terhadap Kinerja Peralatan Boiler PLTU Batubara Unit 1 PT. XYZ. *Journal of Applied Mechanical Engineering and Renewable Energy*, 3(1), 7–15. <https://doi.org/10.52158/jamere.v3i1.445>
- Fahmi, M. A., Sunarko, Cahya, Y., & Hasan, Z. I. (2023). Analisis Penerimaan Implementasi Co-firing di PLN Group dengan Pendekatan Modified TAM 3 (Modified Technology Acceptance Model 3). *Jurnal Multidisiplin West Science*, 2(06), 401–421. <https://doi.org/10.58812/jmws.v2i6.390>
- Fathurachman, M., & Rusirawan, D. (2025). Review Teknologi Inovatif untuk Meningkatkan Efisiensi Termal dan Mengurangi Dampak Lingkungan pada PLTU. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 14(1), 111–120. <https://doi.org/10.24127/trb.v14i1.3988>
- Geissdoerfer, M., Morioka, S. N., Monteiro De Carvalho, M., & Evans, S. (2018). Business models and supply chains for the circular economy Keywords: Circular business models Circular supply chain Sustainable business models Sustainable development Circular Economy Business model innovation. *Journal of Cleaner Production*, 190, 712–721. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.159> [https://aspace.repository.cam.ac.uk/bitstream/handle/1810/280260/Geissdoerfer et al. 2018_Author%27s version.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aspace.repository.cam.ac.uk/bitstream/handle/1810/280260/Geissdoerfer_et_al.2018_Author%27s%20version.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Isikgor, F. H., & Becer, C. R. (2015). Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. *Polymer Chemistry*, 6(25), 4497–4559. <https://doi.org/10.1039/c5py00263j>
- Kuncara, J., Jamilatun, S., Febriani, A. V., Idris, M., & Setyawan, M. (2025). Potensi dan Tantangan Pemanfaatan Refuse Derived Fuel dalam Co-Firing PLTU di Indonesia : A Review. *Prosiding Semnas Intek*, (November), 208–220. <https://seminar.uad.ac.id/index.php/SNIT/article/view/19102>
- Maharani, D. A., Naryono, E., & Eko, A. (2023). PERHITUNGAN EFISIENSI PADA BOILER di PT. PLTU TANJUNG AWAR-AWAR. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 7(2), 414–420. <https://doi.org/10.33795/distilat.v7i2.232>
- Meditama, R. F., Fitriani, I. M., & Asshidiki, F. K. (2025). *G-Tech : Jurnal Teknologi Terapan Analysis of Heat Rate Co-firing Pacitan PLTU*. 9(1), 410–416.
- Morales Eguez, I. T. (2014). 済無No Title No Title No Title. In *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents* (Vol. 5, Number 2).
- Narputro, P., Marina Artiyasa, Cahya Laxa Eka Putra, Trisiani Dewi Hendrawati, & Fikri Arif Wicaksana. (2025). Analisis Tekno-Ekonomi Penerapan Co-Firing Biomassa Serbuk Kayu pada PLTU 3 × 350 MW. *Scientific Exploration: Journal of Indonesian Academic Research*, 3(1), 1–13. <https://doi.org/10.25134/jiar.v3i1.58>
- Nosratabadi, S., Mosavi, A., Shamshirband, S., Zavadskas, E. K., Rakotonirainy, A., & Chau, K. W. (2019). Sustainable business models: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 11(6), 1–30. <https://doi.org/10.3390/su11061663>
- Pahlevi, R., Thamrin, S., Ahmad, I., & Nugroho, F. B. (2024). Masa Depan Pemanfaatan Batubara sebagai Sumber Energi di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 5(2), 50–60.

- <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.22973>
- 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>
- Qalbie, A. S. S., & Rahmaniah, R. (2023). The Opportunity to Achieve Net Zero Emissions in Indonesia Through the Implementation of a Green Economy to Address Climate Change. *Global South Review*, 5(1), 80. <https://doi.org/10.22146/globalsouth.86381>
- Safrudin, R., Zulfamanna, Kustati, M., & Sepriyanti, N. (2023). Penelitian Kualitatif. *Journal Of Social Science Research*, 3(2), 1–15.
- Santosa, S., & Soemarno, D. (2014). Indonesian Green Technology Journal Peningkatan Nilai Kalor Produk pada Produk Proses Bio-drying Sampah Organik Improved Calor Value on Biodrying Production of Organic Waste. *Indonesian Green Technology Journal*, 3, 29–38.
- Sari, U., Rusdiantini, S., & Novianti, S. (2025). Ekonomi Sirkular dalam Industri Manufaktur: Strategi Untuk Mengurangi Limbah dan Meningkatkan Efisiensi. *Jurnal Ekonomi Dan Bisnis*, 13(2), 230–239. <http://e-journalppmunsa.ac.id/index.php/jebPp.230-239>
- 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>
- Spradley, P., & Huberman, M. (2024). Kajian Teoritis tentang Teknik Analisis Data dalam Penelitian Kualitatif : جاتنلا زاترحلا نع اطلخا في سابقلا ءاطلخاو نوكي نم ينتهج لولا نم ةهيج ةدالما يهو اما فيحننا ننعلما لنا نا لاق اماو نم فيحننا ننعلما نأبف سبتلت قيضق قدساف قيضق قداص بجاولا نم ةحص. *Journal of Management, Accounting and Administration*, 1(2), 77–84. <https://pub.nuris.ac.id/journal/jomaa/article/view/93>
- Subroto, P. (n.d.). *Inklusi energi*.
- Sugiyono. (2023). *Sugiyono Metode Penelitian Kualitatif*. 1–257.
- Susilo, R. F. N., Darmawan, A. J., & Putri, Y. H. (2023). Konsep Ekonomi Sirkular Dalam Model Bisnis Berkelanjutan Untuk Membangun Gaya Hidup Hijau Masyarakat Indonesia. *Jurnal IMAGINE*, 3(1), 2776–9836. <https://jurnal.std-bali.ac.id/index.php/imagine>
- Taufiqurohim, T., Krista, G. M., Sajida, G. N., Sari, H. K., & Ferawati, Y. F. (2025). Studi Potensi Pengolahan Sampah Anorganik Menjadi Refuse Derived Fuel (RDF). *Prosiding the 16th Industrial Research Workshop and National Seminar*, 16(1), 51–56.
- Triani, M., Anggoro, D. D., & Yunianto, V. D. (2024). Potensi Dekarbonisasi Pembangkit Listrik Batubara Melalui Cofiring Biomassa Dan Carbon Capture Utilization. *Metana*, 20(1), 57–68. <https://doi.org/10.14710/metana.v20i1.63102>
- Wahyu syawaliani, & SetioUtomo. (2024). Pemanfaatan Fly Ash Dan Bottom Ash (FABA) Sebagai Solusi Inovasi Pengolahan Limbah Dalam Mendukung Keberlangsungan UMKM Dalam Bidang Pembuatan Batako, Paving Blok Dan Pengecoran. *Jurnal Bisnis Dan Pembangunan*, 13(1), 97–108. <https://doi.org/10.20527/pcb2ty26>
- Wardah, S. A., Pratama, I., Kimia, T., Teknik, F., & Fajar, U. (2025). Pengaruh demineralisasi batubara dengan penambahan adsorben sekam padi terhadap potensi pembentukan slagging dan fouling. 7(02), 421–441.
- Widanti, F., Boedoyo, M. S., & Murtiana, S. (2025). Peralihan Bahan Bakar Cofiring Batubara - Biomassa untuk Mengurangi Dampak Lingkungan: Studi Kasus PLTU Bukit Asam, Sumatera Selatan. *PENDIPA Journal of Science Education*, 9(3), 781–789. <https://doi.org/10.33369/pendipa.9.3.781-789>
- Zein, A. I., & Azizullah, M. N. (2026). Inovasi Teknologi Ramah Lingkungan Sebagai Strategi Keberlanjutan Global Environmentally Friendly Technology Innovation as a Global Sustainability Strategy dari aktivitas manusia yang tidak terkendali (Missleini , 2023). Seiring dengan laju adalah penge. 9(2), 2097–2108. <https://doi.org/10.56338/jks.v9i2.10438>