

Evaluasi Ketersediaan Biomassa Pertanian untuk Implementasi Co-firing pada PLTU Batubara Jawa Tengah Periode 2025–2030 Berbasis Low Emissions Analysis Platform (LEAP)

Muhammad Ali Akbar Sholahuddin¹, Priyo Adi Sesotyo¹, Fahrudin Ahmad¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Semarang, Jl. Soekarno-Hatta, Semarang, 50196, Indonesia

Penulis Korespondensi : Priyo Adi Sesotyo (e-mail: psesotyo@usm.ac.id)

ABSTRAK

Provinsi Jawa Tengah menanggung kapasitas PLTU batubara terbesar di Indonesia sebesar 10.222,40 MW, sementara fraksi energi baru terbarukan baru mencapai 21,08 % dari target RUED sebesar 21,32 % pada 2025. Penelitian ini mengevaluasi ketersediaan biomassa pertanian Jawa Tengah untuk co-firing pada delapan PLTU batubara periode 2025 sampai 2030 menggunakan perangkat lunak Low Emissions Analysis Platform (LEAP). Massa biomassa yang tersedia diestimasi menggunakan metode Residue to Product Ratio yang dikoreksi dengan collection factor, diproyeksikan dari data produksi BPS 2020–2024. Hasil proyeksi menunjukkan biomassa tersedia turun dari 16,81 juta ton pada 2025 menjadi 15,79 juta ton pada 2030. Enam skenario co-firing, mengombinasikan dua rasio massa (2 % dan 5 %) dengan tiga skenario nilai kalor biomassa, menghasilkan penurunan input energi panas maksimum sebesar 2,77 %, jauh di bawah batas toleransi operasional 3 % yang lazim diterapkan pada boiler eksisting. Skenario 5 % rata-rata menghindarkan emisi 2,98 juta ton CO₂ ekuivalen per tahun dan menaikkan fraksi EBT sektor ketenagalistrikan menjadi 22,51 %, di atas ambang RUED. Penghematan biaya bahan bakar netto berkisar Rp 0,95 sampai Rp 5,86 triliun per tahun tergantung skenario harga batubara. Temuan ini menunjukkan bahwa surplus biomassa pertanian Jawa Tengah memadai untuk mendukung implementasi co-firing, baik secara teknis maupun ekonomi.

KATA KUNCI biomassa pertanian; co-firing; LEAP; emisi terhindarkan; RUED Jawa Tengah.

ABSTRACT

Central Java carries the largest coal-fired power plant capacity in Indonesia, reaching 10,222.40 MW, while its renewable energy share stood at only 21.08 percent against the 2025 RUED target of 21.32 percent. This study evaluates the availability of Central Java agricultural biomass for co-firing across eight coal power plants over 2025–2030 using the Low Emissions Analysis Platform (LEAP). Biomass mass is estimated with the Residue to Product Ratio method corrected by a collection factor, projected from 2020–2024 BPS production data. The projection shows available biomass declining from 16.81 million tonnes in 2025 to 15.79 million tonnes in 2030. Six co-firing scenarios, combining two mass ratios (2% and 5%) with three biomass calorific value cases, yield a maximum heat input reduction of 2.77 percent, well below the 3 percent operational tolerance commonly applied to existing boilers. The 5 percent average scenario avoids 2.98 million tonnes of CO₂-equivalent emissions per year and raises the electricity-sector renewable fraction to 22.51 percent, above the RUED threshold. Net fuel cost savings range from IDR 0.95 to 5.86 trillion per year depending on the coal price scenario. These findings confirm that Central Java agricultural biomass carries a surplus sufficient to support co-firing implementation, technically and economically.

KEYWORD agricultural biomass; co-firing; LEAP; emission avoidance; RUED Jawa Tengah.

1. PENDAHULUAN

Sistem ketenagalistrikan Indonesia hingga saat ini masih bertumpu secara dominan pada batubara sebagai sumber energi primer. PT PLN (Persero) tercatat mengonsumsi 71,7 juta ton batubara setiap tahun untuk

membangkitkan 114.158 GWh listrik dari unit pembangkitnya sendiri, sementara secara nasional pembangkit berbasis batubara menyuplai sekitar 66 % dari total produksi listrik nasional sebesar 344 TWh [1]. Ketergantungan yang tinggi ini berimplikasi langsung

pada beban emisi gas rumah kaca sektor energi, yang tercatat menyumbang 790.566 GgCO₂eq pada 2024 dan diproyeksikan menjadi penyumbang 69 % emisi gas rumah kaca nasional pada 2050 apabila tidak dilakukan intervensi struktural [2]. Kondisi ini menuntut percepatan dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan sejalan dengan komitmen Indonesia menurunkan emisi sebesar 29 % pada 2030 sesuai Paris Agreement, tanpa mengorbankan keandalan pasokan listrik yang sudah berjalan.

Provinsi Jawa Tengah menempati posisi yang secara strategis paling relevan dalam persoalan ini. Kapasitas PLTU batubara provinsi ini mencapai 10.222,40 MW, tertinggi di seluruh Indonesia, dan menyumbang 78,90 % dari total kapasitas pembangkit provinsi sebesar 12.953 MW [2]. Pemerintah Provinsi Jawa Tengah telah menetapkan target bauran energi baru terbarukan (EBT) sebesar 21,32 % pada 2025 melalui Peraturan Daerah Nomor 12 Tahun 2018 tentang Rencana Umum Energi Daerah (RUED) [3], sementara realisasi kapasitas EBT yang sudah berjalan baru menghasilkan fraksi 21,08 %, atau masih tertinggal 0,24 poin persentase di bawah target. Dengan tingkat ketergantungan batubara sebesar ini, pertanyaan mendasar yang muncul adalah dari sumber mana target bauran EBT tersebut dapat dipenuhi secara realistis dalam waktu dekat, tanpa harus menunggu pembangunan infrastruktur EBT baru yang membutuhkan waktu perencanaan dan investasi yang panjang.

Di sisi lain, sebagai salah satu lumbung pangan nasional, Jawa Tengah menghasilkan jutaan ton limbah pertanian setiap tahun dari komoditas padi, jagung, tebu, kelapa, dan ubi kayu. Limbah pertanian ini pada dasarnya merupakan sumber energi biomassa yang bersifat karbon netral, karena CO₂ yang dilepaskan saat pembakaran dianggap setara dengan karbon yang sebelumnya diserap tanaman selama masa pertumbuhannya, sehingga tidak menambah stok karbon baru ke atmosfer [4]. Sayangnya, potensi ini belum dimanfaatkan secara optimal. Sebagian besar limbah pertanian di Jawa Tengah masih dibakar langsung di lahan atau dibiarkan membusuk secara alami, suatu proses yang justru menghasilkan gas metana dengan potensi pemanasan global 25 kali lipat dibandingkan CO₂ [4].

Co-firing biomassa, yaitu pencampuran sebagian batubara dengan biomassa pada boiler PLTU yang sudah beroperasi, menawarkan jalan keluar dengan kebutuhan investasi yang relatif rendah karena tidak memerlukan pembangunan pembangkit baru. Program co-firing nasional yang dijalankan PLN pada 2023 telah mengonsumsi 1 juta ton biomassa pada 43 PLTU dan berhasil menghindari emisi CO₂ sebesar 1,05 juta ton [5]. Bertolak dari capaian awal ini, pemerintah berencana memperluas program co-firing ke 114 PLTU dengan proyeksi kebutuhan biomassa mencapai 9 juta ton per tahun [6], sebuah target yang jauh melampaui skala program yang berjalan saat ini.

Meskipun demikian, kajian kuantitatif yang secara spesifik membahas potensi Jawa Tengah, mencakup proyeksi ketersediaan biomassa per komoditas hingga 2030, dampak teknis co-firing terhadap heat rate boiler

pada berbagai kombinasi skenario, serta kontribusinya terhadap pencapaian target RUED provinsi, hingga saat ini belum tersedia secara menyeluruh. Kajian pemodelan energi Jawa Tengah menggunakan LEAP yang sudah ada umumnya berfokus pada sisi permintaan energi kelistrikan secara agregat [7], [8], sementara integrasi antara proyeksi ketersediaan biomassa sisi pasokan dengan evaluasi teknis co-firing dan kontribusinya terhadap target EBT daerah belum banyak dieksplorasi. Studi terbaru berskala nasional yang memetakan kesenjangan pasokan-permintaan biomassa untuk co-firing di seluruh Indonesia [29] memberikan gambaran menyeluruh mengenai keterbatasan biomassa limbah pada skala arsipelago, namun analisisnya berhenti pada level provinsi tanpa menelusuri dampak teknis pada boiler individual maupun keterkaitannya dengan target bauran energi daerah. Penelitian ini melengkapi kesenjangan tersebut dengan menyediakan tiga elemen sekaligus yang belum pernah diintegrasikan dalam satu kerangka analisis untuk konteks Jawa Tengah, yaitu proyeksi ketersediaan biomassa berbasis LEAP hingga 2030, evaluasi dampak ΔQ_{rel} pada delapan PLTU spesifik dengan karakteristik boiler berbeda, dan kuantifikasi kontribusinya terhadap target RUED provinsi, sehingga hasilnya dapat langsung digunakan sebagai basis perencanaan operasional di tingkat provinsi, bukan hanya gambaran umum tingkat nasional.

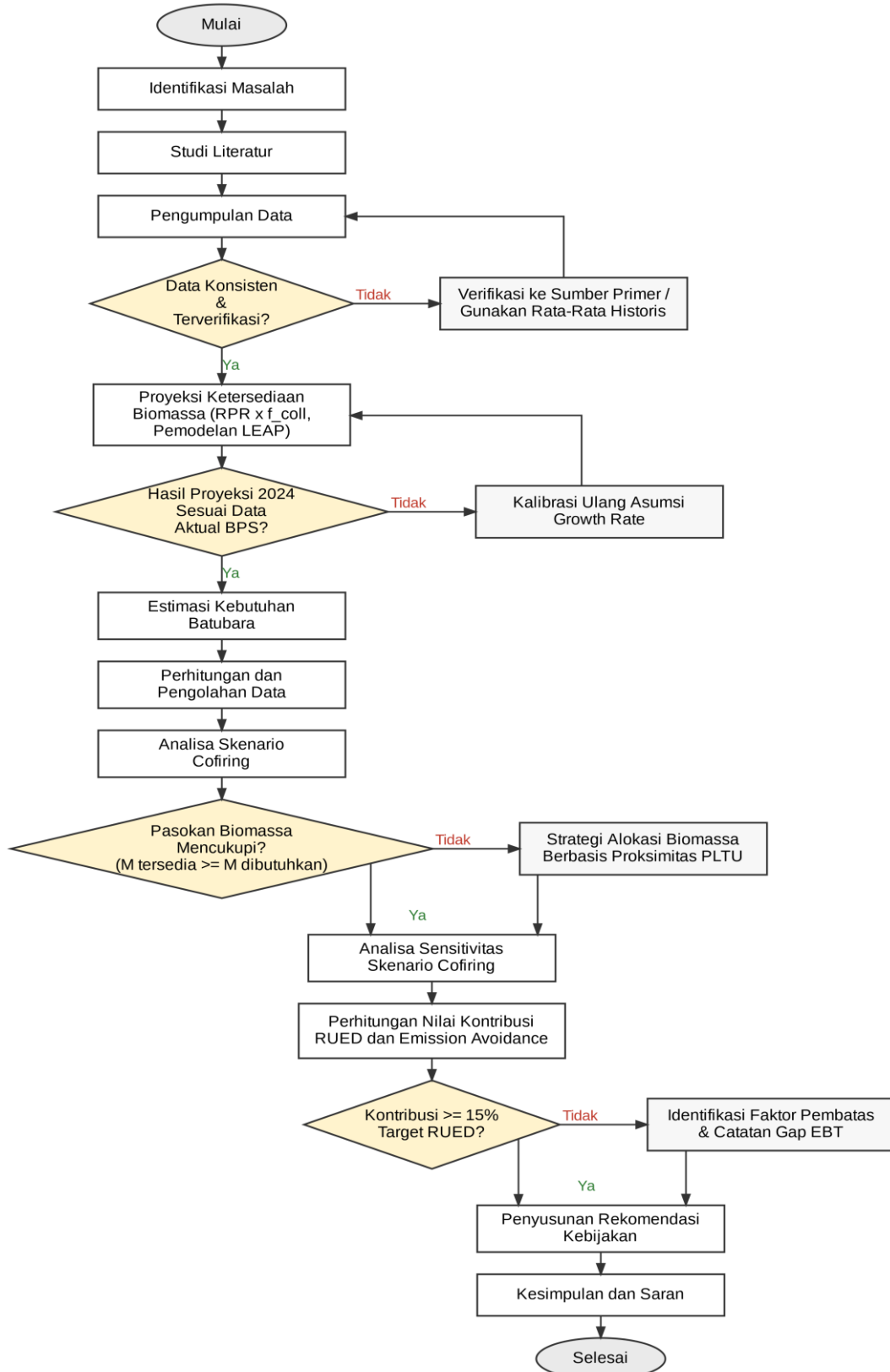
Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini disusun untuk menjawab tiga pertanyaan penelitian. Pertama, berapa proyeksi ketersediaan netto biomassa pertanian Jawa Tengah pada periode 2025 sampai 2030. Kedua, bagaimana pengaruh co-firing pada rasio 2 % dan 5 % terhadap penurunan heat rate boiler serta besaran emisi yang dapat dihindarkan. Ketiga, seberapa besar kontribusi co-firing biomassa terhadap pencapaian target bauran EBT RUED Provinsi Jawa Tengah. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan basis data kuantitatif bagi operator PLTU dan pengambil kebijakan energi daerah dalam menyusun strategi pengadaan biomassa dan peta jalan implementasi co-firing di Jawa Tengah.

Penelitian ini juga membatasi cakupan analisis pada aspek ketersediaan biomassa dan dampak teknis co-firing terhadap input energi panas boiler secara termodinamis. Risiko operasional lain yang berpotensi timbul akibat pencampuran bahan bakar, yaitu slagging, fouling, maupun korosi pada permukaan boiler, tidak dibahas dalam penelitian ini, sehingga hasil yang disajikan tidak memperhitungkan aspek keandalan jangka panjang boiler (boiler reliability) akibat perubahan karakteristik abu dan gas hasil pembakaran biomassa. Evaluasi terhadap risiko tersebut memerlukan kajian tersendiri berbasis pengujian material dan pemantauan operasional yang berada di luar lingkup penelitian ini.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif berbasis pemodelan komputasi, memanfaatkan data sekunder produksi pertanian dan data teknis operasional delapan PLTU batubara di Jawa Tengah. Analisis dilakukan melalui tiga tahapan utama

yang saling berurutan, yaitu proyeksi ketersediaan biomassa, estimasi baseline konsumsi batubara, dan evaluasi dampak skenario co-firing terhadap kinerja boiler serta emisi. Diagram alur tahapan penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alur tahapan penelitian

Ketersediaan biomassa dihitung dengan metode Residue to Product Ratio (RPR) yang dikoreksi faktor pengumpulan (collection factor), mengikuti pendekatan Koopmans dan Koppejan [9] serta Esteban dan Carrasco [10], sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (1).

$$M_{tersedia} = P_{panen} \times RPR \times f_{coll} \quad (1)$$

P_{panen} merupakan data produksi panen tahunan yang bersumber dari BPS Provinsi Jawa Tengah periode 2020–2024 [11] untuk lima komoditas utama beserta sepuluh jenis limbahnya. Nilai kalor efektif biomassa (LHV_{Var}) dikoreksi terhadap kadar air mengikuti Persamaan (2) [12].

$$LHV_{Var} = LHV_{db} \times (1 - MC) - 585 \times MC \quad (2)$$

Guna menjamin replikabilitas, nilai RPR, f_{coll} , kadar air (MC), LHV basis kering (LHV_{db}), dan LHV as-received (LHV_{Var}) hasil Persamaan (2) untuk seluruh sepuluh jenis limbah disajikan lengkap pada Tabel 1a. f_{coll} berkisar 0,50–0,85 tergantung konsentrasi limbah pada titik pengumpulan; limbah terkonsentrasi seperti ampas tebu pabrik gula memiliki f_{coll} jauh lebih tinggi dibandingkan limbah tersebar seperti jerami padi. Rentang RPR dan MC yang lebar, khususnya pada kulit ubi kayu (MC 60–70 %) dan ampas tebu (MC 45–52 %), mencerminkan variabilitas antar sumber literatur, keterbatasan umum pada pendekatan RPR secara global [31]. Penelitian ini menggunakan nilai tengah (midpoint) tiap rentang sebagai estimasi titik tunggal; implikasi ketidakpastiannya dibahas pada Sub-bab 3.8.

Tabel 1. Parameter RPR, Collection Factor, Kadar Air, dan LHV per Jenis Limbah Biomassa

Komoditas	Jenis Limbah	RPR	f_{coll}	MC (%)	LHV _{db} (kkal/kg)	LHV _{Var} (kkal/kg)
Padi	Sekam Padi	0,22–0,27	0,80	8–14	3.200–3.500	2.900–3.100
	Jerami Padi	1,10–1,76	0,60	12–20	3.500–3.900	2.700–2.900
Jagung	Tongkol Jagung	0,27–0,30	0,75	8–12	3.800–4.000	3.300–3.600
	Batang Jagung	1,00–2,00	0,50	15–25	3.400–4.000	2.700–3.200
Tebu	Ampas Tebu	0,25–0,29	0,85	45–52	3.800–4.300	1.800–2.200
	Pucuk/Daun Tebu	0,12–0,30	0,50	30–40	3.300–4.200	2.200–2.800
Kelapa	Tempurung Kelapa	0,12	0,70	6–10	4.300–4.450	3.900–4.200
	Sabut Kelapa	0,35–0,42	0,60	15–20	4.200–4.450	3.500–3.900
Ubi Kayu	Batang Ubi Kayu	0,06–0,17	0,55	10–20	3.500–4.200	2.900–3.700
	Kulit Ubi Kayu	0,02–0,05	0,70	60–70	3.344–3.800	900–1.400

Sumber: Koopmans & Koppejan [9]; Esteban & Carrasco [10]; Febriani et al. [5]; Das et al. [26]; Paredes-Páliz et al. [27]; Samomssa et al. [28], diolah. LHV_{Var} dihitung pada nilai MC titik tengah rentang menggunakan Persamaan (2).

Perangkat lunak LEAP (Low Emissions Analysis Platform) digunakan untuk memproyeksikan suplai biomassa periode 2025 sampai 2030. Struktur model dibangun dengan lima cabang Supply merepresentasikan lima komoditas utama; data massa biomassa tersedia hasil Persamaan (1) untuk 2020–2024 digunakan sebagai base year data, dan asumsi laju pertumbuhan (growth rate) tiap komoditas diturunkan dari regresi tren historis BPS 2020–2024, dikalibrasi terhadap target RPJMD Provinsi Jawa Tengah. Perlu ditegaskan bahwa pemeriksaan keluaran model 2024 terhadap data aktual BPS 2024 merupakan pemeriksaan konsistensi tahun dasar (base-year consistency check), bukan validasi prediktif out-of-sample, karena 2024 turut menjadi salah satu titik data dasar model. Validasi prediktif yang lebih ketat, misalnya kalibrasi hanya pada 2020–2022 dengan pengujian terhadap data aktual 2023–2024, belum dapat dilakukan pada penelitian ini karena keterbatasan panjang deret waktu data BPS yang tersedia; hal ini dibahas lebih lanjut sebagai keterbatasan metodologis pada Sub-bab 3.8.

Perlu ditegaskan pula bahwa LEAP secara konseptual turut mempertimbangkan sisi permintaan (demand side) di luar co-firing, terutama konsumsi rumah tangga pedesaan dan industri kecil (misalnya pembakaran langsung sekam dan jerami padi sebagai

bahan bakar tradisional), yang pada prinsipnya mengurangi (net-off) ketersediaan biomassa hasil RPR. Namun demikian, basis data konsumsi tersebut secara kuantitatif per kabupaten tidak tersedia secara terbuka pada rentang waktu penelitian ini, sehingga pengurangan tersebut TIDAK diterapkan sebagai faktor koreksi numerik eksplisit pada Persamaan (1); massa $M_{tersedia}$ yang dilaporkan pada Sub-bab 3.1 tetap merupakan potensi $RPR \times f_{coll}$ tanpa pengurangan konsumsi rumah tangga, sehingga berpotensi sedikit overestimate terhadap ketersediaan neto aktual, konsisten dengan keterbatasan yang umum dilaporkan pada literatur estimasi residu berbasis RPR [31]. Penyempurnaan dengan data survei konsumsi energi rumah tangga yang lebih granular menjadi arah pengembangan lanjutan penelitian ini.

Konsumsi batubara delapan PLTU diestimasi melalui pendekatan Capacity Factor sebagaimana Persamaan (3).

$$B = P_{terpasang} \times CF \times 8.760 \times SFC \quad (3)$$

Specific Fuel Consumption (SFC) fleet rata-rata PLN Nusantara Power sebesar 0,6617 kilogram per kWh diturunkan dari Net Plant Heat Rate (NPHR) 3.064,73 kilokalori per kWh [13]. Capacity Factor unit BUMN ditetapkan 59 % [14] dan unit IPP 65 % [15], mengikuti data realisasi operasional masing-masing kelompok

pembangkit. Hasil perhitungan menunjukkan kebutuhan batubara total sebesar 29,23 juta ton per tahun, setara dengan produksi listrik 55.387 GWh. Nilai SFC dan efisiensi termal yang digunakan berada pada rentang yang konsisten dengan hasil pengukuran empiris pada PLTU sejenis di Jawa Tengah, sebagaimana dilaporkan pada evaluasi konsumsi bahan bakar spesifik PLTU Tanjung Jati B Unit 2 [24].

Enam skenario co-firing dievaluasi dengan mengombinasikan dua rasio massa, yaitu 2 % dan 5 %, dengan tiga skenario nilai kalor biomassa (Best, Average, dan Worst). Penurunan energi input relatif akibat substitusi sebagian batubara oleh biomassa dihitung melalui Persamaan (4), dengan kriteria skenario dinyatakan aman secara operasional apabila nilainya berada di bawah batas toleransi 3 % mengikuti Sidiq [12].

$$\Delta Q_{rel} = x \times \left(1 - \frac{LHV_{ar_{bio}}}{CV_{bb}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

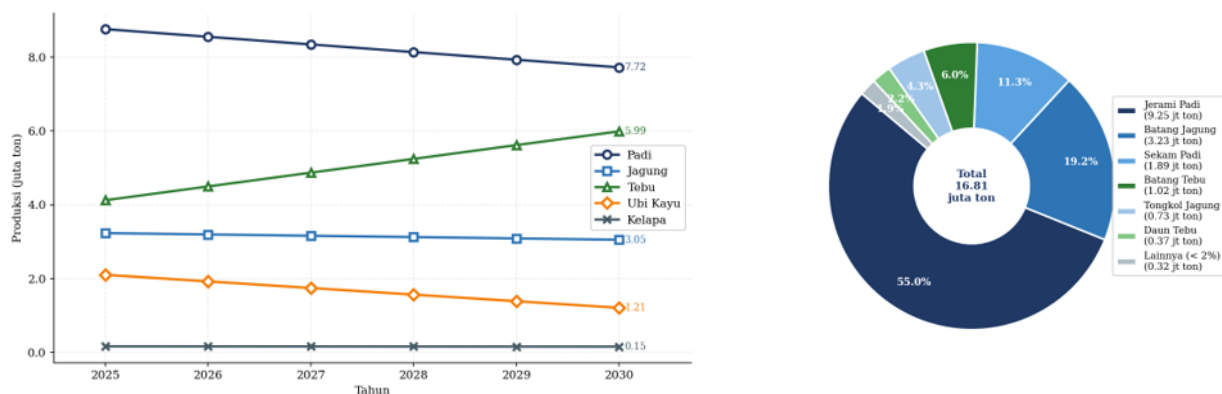
Emisi yang terhindarkan dihitung dari dua mekanisme mengikuti pedoman IPCC [16], [17]. Mekanisme pertama berasal dari substitusi batubara, dirumuskan sebagai $EA_{CO_2} = M_{batubara_tersubstitusi} \times EF_{coal}$. Mekanisme kedua berasal dari pencegahan dekomposisi anaerobik limbah pertanian yang seharusnya membusuk di lahan, dirumuskan sebagai $EA_{CH_4} = M_{bio} \times EF_{CH_4} \times GWP_{CH_4}$, dengan nilai GWP metana sebesar 25 [17]. Kedua mekanisme dihitung berbasis massa (bukan berbasis energi) mengikuti batasan masalah penelitian ini; implikasi pilihan ini terhadap kestabilan nilai EA_{CO_2} dan EA_{CH_4} dari tahun ke tahun dibahas pada Sub-bab 3.3, sementara keterbatasan terkait faktor emisi CH_4 default IPCC yang belum divalidasi secara empiris untuk kondisi dekomposisi residu pertanian tropis

Indonesia dibahas pada Sub-bab 3.8. Kontribusi co-firing terhadap fraksi EBT dihitung dari energi biomassa yang dimanfaatkan, dikonversi ke kapasitas ekivalen menggunakan pendekatan beban penuh 8.760 jam per tahun, kemudian dibandingkan terhadap total kapasitas terpasang Jawa Tengah sebesar 12.953 MW [18]. Perlu digarisbawahi sejak awal bahwa nilai kontribusi yang dihasilkan merupakan padanan (equivalent) pada sektor ketenagalistrikan semata, bukan pemenuhan langsung terhadap target RUED 21,32 % yang mencakup bauran energi primer total [3]; interpretasi selengkapnya diuraikan pada Sub-bab 3.4. Untuk mengukuhkan validitas temuan, hasil-hasil utama penelitian ini kemudian dibandingkan dengan empat penelitian terdahulu yang relevan sebagai bagian dari proses validasi silang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Proyeksi Ketersediaan Biomassa Pertanian Jawa Tengah

Hasil proyeksi menunjukkan bahwa biomassa pertanian yang tersedia di Jawa Tengah menurun dari 16,81 juta ton pada 2025 menjadi 15,79 juta ton pada 2030, atau turun sebesar 6,11 % dalam kurun waktu enam tahun. Penurunan ini terutama didorong oleh kontraksi produksi padi rata-rata 2,37 % per tahun, yang mencerminkan tekanan alih fungsi lahan sawah ke peruntukan non-pertanian, serta penurunan produksi ubi kayu yang jauh lebih tajam, mencapai 8,51 % per tahun, akibat pergeseran preferensi petani menuju komoditas dengan margin keuntungan yang lebih tinggi. Pola berlawanan ditunjukkan oleh produksi tebu yang justru tumbuh 9,06 % per tahun sejalan dengan kebijakan nasional peningkatan produksi gula. Tren produksi kelima komoditas serta perubahan komposisi biomassa yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Tren produksi dan komposisi biomassa pertanian Jawa Tengah

Jerami padi tetap mendominasi komposisi biomassa dengan porsi 55,02 % dari total massa tersedia sepanjang periode proyeksi. Pergeseran komposisi akibat perbedaan laju pertumbuhan antar komoditas ini secara tidak langsung memengaruhi kualitas kalor campuran biomassa; nilai LHV_{ar} campuran turun tipis dari 2.826,30 kalori per kilogram pada 2025 menjadi 2.795,75 kalori per kilogram pada 2030, atau hanya turun 1,08 %, jauh lebih landai dibandingkan penurunan massa totalnya. Hal ini terjadi karena porsi biomassa

tebu yang memiliki nilai kalor lebih baik justru meningkat seiring waktu, sementara ubi kayu dengan nilai kalor terendah di antara seluruh jenis limbah yang dievaluasi mengalami penurunan produksi paling tajam [26], [28]. Sementara itu, kontribusi tempurung dan sabut kelapa terhadap campuran relatif kecil dan stabil sepanjang periode proyeksi, sejalan dengan karakteristik kelapa sebagai komoditas dengan produksi yang landai serta potensinya sebagai bahan bakar biomassa yang

telah dikonfirmasi pada studi lingkungan limbah kelapa [27].

Dari sisi kecukupan pasokan, kebutuhan biomassa untuk skenario co-firing 5 % pada 2030 tercatat sebesar 1.461.590 ton per tahun, hanya menyerap 9,26 % dari total biomassa yang tersedia pada tahun tersebut. Rasio surplus minimum sepanjang periode proyeksi berada pada angka 10 berbanding 1, sehingga cukup untuk mendukung seluruh delapan PLTU berpartisipasi dalam

program co-firing tanpa memerlukan strategi alokasi biomassa antar-PLTU yang rumit.

3.2. Dampak Teknis Co-firing terhadap Penurunan Input Energi Panas

Evaluasi dampak teknis co-firing dilakukan pada enam kombinasi skenario, sebagaimana dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan Enam Skenario Co-firing, Nilai Tahunan 2025–2030

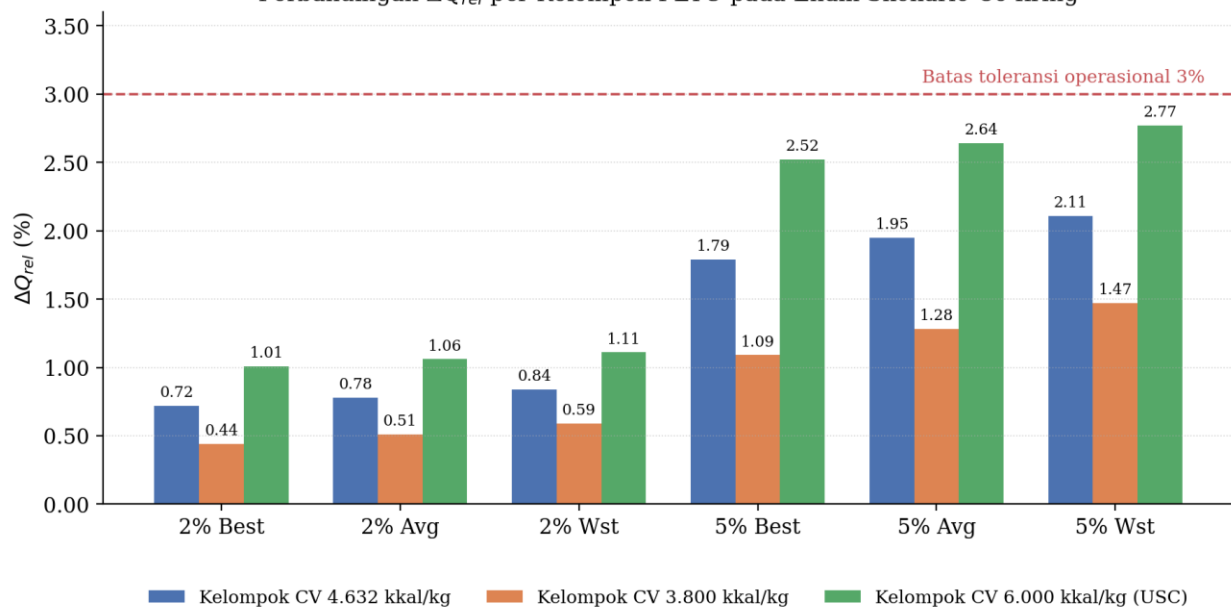
Parameter	2% Best	2% Avg	2% Wst	5% Best	5% Avg	5% Wst
Biomassa (juta ton/th)	0,58	0,58	0,58	1,46	1,46	1,46
ΔQ agregat (%)	0,72	0,78	0,85	1,80	1,96	2,11
ΔQ maks PLTU USC (%)	1,01	1,06	1,11	2,52	2,64	2,77
Status ΔQ vs batas 3%	< 3%	< 3%	< 3%	< 3%	< 3%	< 3%

Sumber: diolah dari data penelitian. LHV_{ar} 2025: Best 2.972,19; Average 2.826,30; Worst 2.680,41 kkal/kg. Status merujuk semata pada neraca energi input (ΔQ_{rel}), bukan evaluasi menyeluruh keandalan boiler.

Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai ΔQ tertinggi terjadi pada skenario 5 % kondisi Worst untuk kelompok PLTU Ultra Super Critical (USC), mencapai 2,77 %. Kondisi ini terjadi karena selisih relatif antara nilai kalor batubara dan nilai kalor biomassa membesar pada PLTU dengan nilai kalor batubara tinggi, sehingga kelompok USC secara konsisten menunjukkan ΔQ paling besar di antara ketiga kelompok PLTU yang dievaluasi [25]. Meskipun demikian, seluruh enam skenario tetap berada jauh di bawah batas toleransi operasional 3 % yang lazim diterapkan pada boiler eksisting tanpa modifikasi [12]. Perlu ditegaskan bahwa kesimpulan ini terbatas pada neraca energi input (ΔQ_{rel}) semata; sebagaimana

telah dinyatakan pada batasan masalah, penelitian ini tidak mengevaluasi risiko slagging, fouling, korosi, maupun perubahan karakteristik abu akibat pencampuran biomassa, sehingga hasil ini TIDAK dapat ditafsirkan sebagai jaminan kelayakan teknis boiler secara menyeluruh. Ketiadaan perubahan energi input yang signifikan hanya mengindikasikan bahwa co-firing pada rasio yang dievaluasi tidak akan menimbulkan defisit energi yang berarti pada keluaran boiler, sementara kelayakan operasional jangka panjang tetap memerlukan kajian tersendiri sebagaimana diuraikan pada Sub-bab 3.8.

Perbandingan ΔQ_{rel} per Kelompok PLTU pada Enam Skenario Co-firing



Gambar 3. Perbandingan ΔQ_{rel} per kelompok PLTU

Sensitivitas nilai ΔQ terhadap periode proyeksi 2025–2030 dihitung dengan menelusuri perubahan LHV_{ar} campuran biomassa tahunan sebagaimana dibahas pada bagian sebelumnya. Nilai ΔQ tertinggi

sepanjang periode proyeksi terjadi pada 2030, mencapai 2,80 % pada skenario 5 % Worst kelompok USC, masih menyisakan margin 0,20 poin persentase terhadap batas 3 %. Dengan demikian, neraca energi input co-firing

tetap berada dalam batas toleransi yang ditetapkan sepanjang seluruh periode proyeksi, meskipun kualitas biomassa mengalami sedikit penurunan seiring waktu; sebagaimana ditekankan sebelumnya, kesimpulan ini tidak mencakup evaluasi keandalan boiler jangka panjang. Perlu ditegaskan bahwa penurunan nilai kalor campuran biomassa dari tahun ke tahun inilah satu-satunya sumber variasi temporal dalam penelitian ini;

efeknya tercermin sepenuhnya pada kenaikan ΔQ_{rel} di atas, bukan pada besaran emisi terhindarkan yang dibahas pada Sub-bab 3.3.

3.3. Emisi Terhindarkan (Emission Avoidance)

Perhitungan emisi terhindarkan dari dua mekanisme, yaitu substitusi batubara dan pencegahan dekomposisi anaerobik limbah, dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan Emission Avoidance per Skenario, Nilai Tahunan dan Kumulatif 2025–2030

Komponen	2% Avg (juta ton/th)	5% Avg (juta ton/th)	Kumulatif 2% 6 th	Kumulatif 5% 6 th
EA_CO2	1,13	2,83	6,80	16,99
EA_CH4	0,06	0,15	0,35	0,88
Total	1,19	2,98	7,15	17,87

Sumber: IPCC [16], [17]. EF_coal 96,1 kgCO₂/GJ untuk SubC, 94,6 kgCO₂/GJ untuk USC.

Nilai emisi terhindarkan dari kedua mekanisme bersifat konstan pada level tahunan karena keduanya diturunkan dari besaran massa yang tidak berubah sepanjang periode proyeksi: massa batubara yang disubstitusi mengikuti rasio co-firing (2 % atau 5 %) dikalikan baseline konsumsi batubara delapan PLTU yang tetap mengacu pada RUPTL PLN 2021–2030 [19], sementara massa biomassa yang dialihkan dari dekomposisi mengikuti massa co-firing yang sama. Sesuai batasan masalah penelitian ini, substitusi co-firing dievaluasi berbasis massa, bukan berbasis energi,

sehingga penurunan nilai kalor (LHVar) campuran biomassa dari tahun ke tahun tidak mengubah besaran EA_CO₂ maupun EA_CH₄; pengaruh penurunan LHVar tersebut sepenuhnya tercermin pada kenaikan ΔQ_{rel} yang telah dibahas pada Sub-bab 3.2, bukan pada emisi terhindarkan. Yang berubah dari tahun ke tahun adalah proporsi biomassa tersedia yang terserap untuk co-firing, meningkat dari 8,69 % pada 2025 menjadi 9,26 % pada 2030 seiring menyusutnya total biomassa tersedia, sebagaimana dirinci pada Tabel 4.

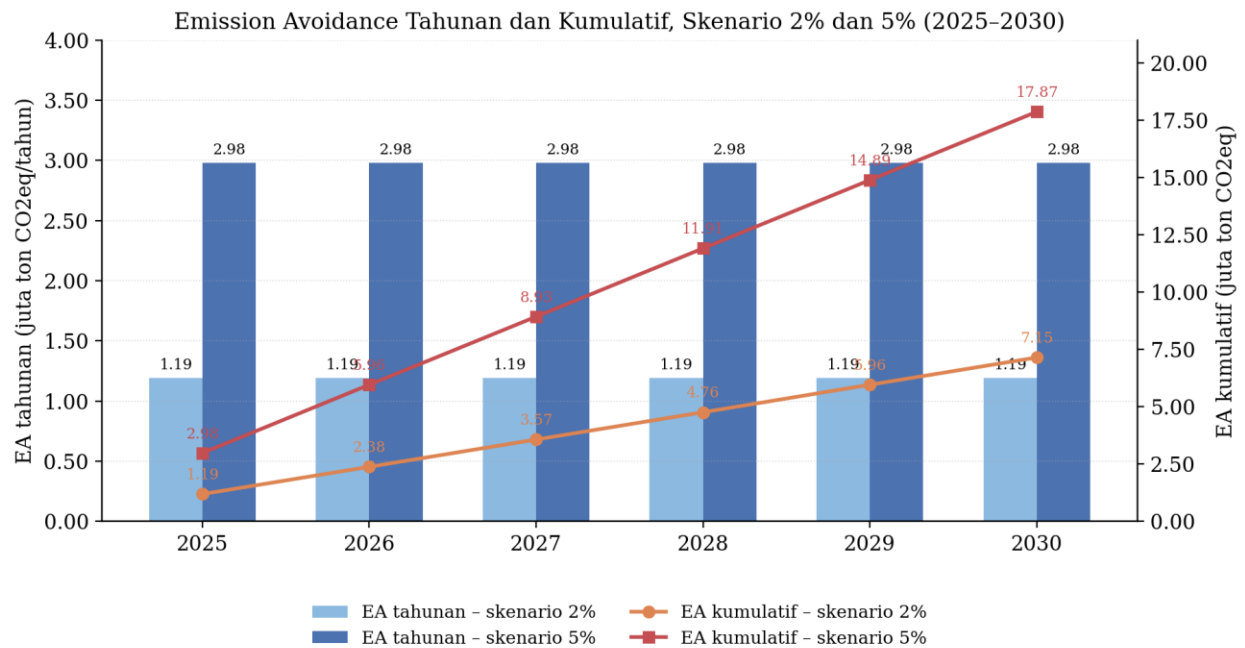
Tabel 4. Proyeksi Emission Avoidance Tahunan dan Kumulatif 2025–2030

Tahun	Bio Tersedia (juta ton)	Kebutuhan Co-firing 5% (juta ton)	% Bio Digunakan	EA Tahunan 2% (juta ton)	EA Tahunan 5% (juta ton)	EA Kumulatif 2% (juta ton)	EA Kumulatif 5% (juta ton)
2025	16,81	1,46	8,69%	1,19	2,98	1,19	2,98
2026	16,61	1,46	8,80%	1,19	2,98	2,38	5,96
2027	16,40	1,46	8,91%	1,19	2,98	3,57	8,93
2028	16,20	1,46	9,02%	1,19	2,98	4,76	11,91
2029	15,99	1,46	9,14%	1,19	2,98	5,96	14,89
2030	15,79	1,46	9,26%	1,19	2,98	7,15	17,87

Sumber: diolah dari data penelitian terkoreksi. EA tahunan tetap konstan (mass-basis); kolom % Bio Digunakan naik seiring menyusutnya total biomassa tersedia.

Akumulasi selama enam tahun pada skenario 5 % mencapai 17,87 juta ton CO₂ ekuivalen, setara sekitar 17 kali lipat total emisi terhindarkan dari program co-firing nasional pada 43 PLTU sepanjang 2023 [5]. Skala

temuan ini menunjukkan bahwa potensi kontribusi Jawa Tengah, apabila program co-firing diimplementasikan secara konsisten, jauh melampaui capaian program nasional yang berjalan saat ini.



Gambar 4. Emission avoidance tahunan dan kumulatif

3.4. Kontribusi terhadap Target RUED Jawa Tengah

Evaluasi kontribusi co-firing terhadap bauran EBT dirangkum pada Tabel 5.

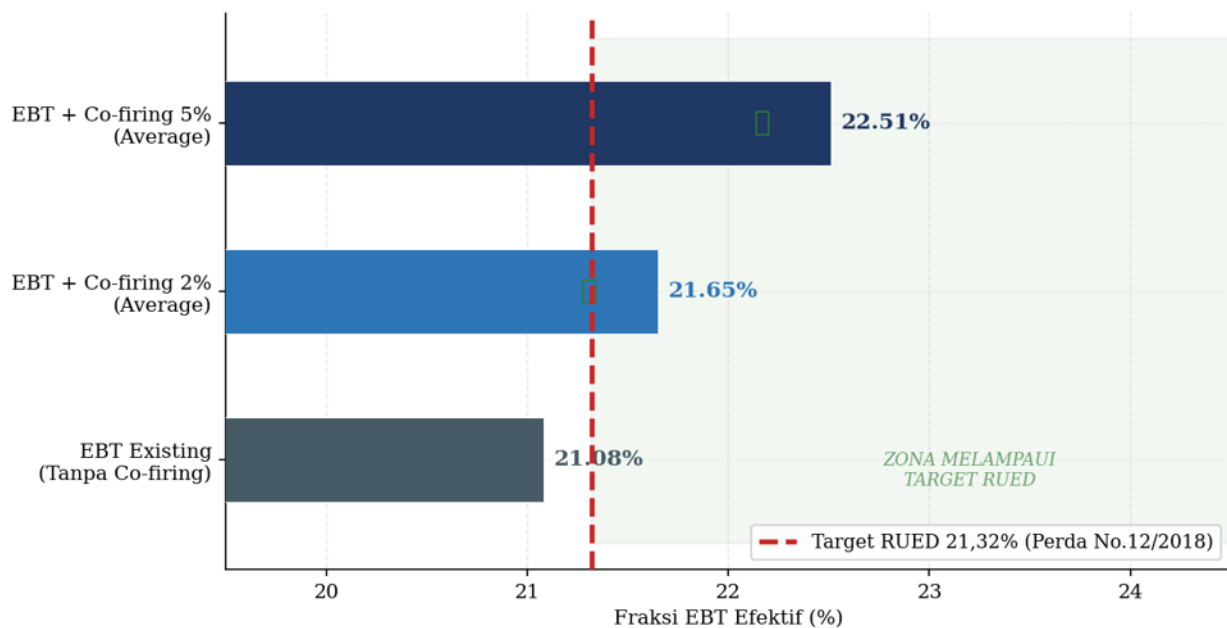
Tabel 5. Estimasi Kontribusi Co-firing terhadap Fraksi EBT Sektor Ketenagalistrikan

Parameter	2% Avg	5% Avg	Satuan
GWh dari biomassa	647	1.617	GWh/th
Kapasitas ekivalen	73,90	184,60	MW
Fraksi EBT efektif	21,65%	22,51%	%

Sumber: HESSI 2024 [18]; Perda Jawa Tengah No. 12 Tahun 2018 [3].

Sebagaimana telah digaribawahi pada Metode Penelitian, nilai fraksi EBT pada Tabel 3 merupakan padanan kontribusi co-firing pada sektor ketenagalistrikan semata, dihitung melalui pendekatan kapasitas ekivalen terhadap total kapasitas terpasang Jawa Tengah, dan BUKAN merupakan pemenuhan langsung terhadap target RUED 21,32 % yang sejatinya mengacu pada bauran energi primer total termasuk sektor transportasi, industri, dan komersial. Dengan mempertimbangkan keterbatasan cakupan tersebut, hasil menunjukkan bahwa co-firing pada rasio 2 % menghasilkan fraksi EBT sektor ketenagalistrikan sebesar 21,65 %, sementara skenario 5 % mendorong fraksi tersebut menjadi 22,51 %; kedua angka ini berada di atas ambang 21,32 % apabila dibandingkan secara langsung dengan nilai target, namun perbandingan

tersebut TIDAK setara (not apple-to-apple) karena berbeda cakupan sektor, sehingga kontribusi co-firing terhadap bauran energi provinsi secara keseluruhan pada kenyataannya akan lebih kecil dari angka yang ditampilkan. Perlu dicatat pula bahwa nilai kapasitas ekivalen pada Tabel 3 diperoleh melalui pendekatan beban penuh 8.760 jam per tahun, yang secara sengaja bersifat konservatif karena setara dengan asumsi Capacity Factor 100 %; apabila menggunakan Capacity Factor rata-rata fleet PLTU Jawa Tengah sebesar 62,70 %, kapasitas ekivalen yang dihasilkan justru akan lebih besar, sehingga kedua bias (cakupan sektor yang menyempitkan dan asumsi CF konservatif yang memperbesar) bekerja pada arah yang berlawanan dan sebagian saling mengompensasi tanpa dapat saling meniadakan sepenuhnya.



Gambar 5. Kontribusi co-firing terhadap fraksi EBT dan target RUED

Berdasarkan uraian di atas, co-firing biomassa pertanian tidak dapat diposisikan sebagai solusi tunggal bagi transisi energi Jawa Tengah maupun sebagai bukti pemenuhan target RUED secara harfiah, mengingat plafon kontribusinya dibatasi secara teknis pada kisaran 5 sampai 10 % massa tanpa modifikasi besar pada boiler, sementara sebagian besar bahan bakar, yaitu 95 sampai 98 % tergantung skenario, tetap berasal dari batubara. Co-firing lebih tepat diposisikan sebagai program transisi jangka pendek hingga menengah yang mempercepat kontribusi sektor ketenagalistrikan terhadap target RUED tanpa menunggu pembangunan infrastruktur EBT baru, sekaligus menjadi jembatan bagi PLN dan operator PLTU membangun kapasitas rantai pasokan biomassa sebelum bertransisi ke sumber energi terbarukan yang lebih struktural seperti pembangkit tenaga surya, panas bumi, dan bayu.

Jika kontribusi co-firing diukur sebagai peningkatan terhadap nilai target RUED itu sendiri, maka skenario 2 % hanya menyumbang sekitar 2,67 % dari nilai target dan skenario 5 % sekitar 6,71 %, keduanya di bawah ambang 15 % yang menjadi titik keputusan pada diagram alur penelitian (Gambar 1), sehingga memicu

identifikasi faktor pembatas berikut. Pertama, plafon teknis rasio co-firing pada boiler eksisting (5–10 % massa tanpa modifikasi besar). Kedua, cakupan evaluasi yang hanya mencakup sektor ketenagalistrikan, sebagaimana telah dijelaskan di atas. Ketiga, keterbatasan rantai pasokan dan kompetisi pemanfaatan biomassa (Sub-bab 3.6). Keempat, pemanfaatan biomassa oleh sektor rumah tangga yang belum dikurangkan secara eksplisit dari M_{tersedia} (Metode Penelitian), sehingga potensi RPR yang benar-benar dapat dialokasikan untuk PLTU kemungkinan lebih kecil dari angka yang dilaporkan. Peningkatan kontribusi ke depan terbuka melalui kombinasi peningkatan rasio co-firing pada boiler termodifikasi, percepatan EBT non-biomassa, dan penguatan kelembagaan rantai pasokan.

3.5. Validasi terhadap Penelitian Terdahulu

Untuk mengukuhkan validitas temuan, hasil-hasil utama penelitian ini dibandingkan dengan empat penelitian terdahulu yang menjadi acuan metodologis dan faktual, sebagaimana dirangkum pada Tabel 6.

Tabel 6. Komparasi Hasil Penelitian dengan Literatur Terdahulu

Aspek Perbandingan	Penelitian Terdahulu	Penelitian Ini	Interpretasi
EA_CO2 program co-firing [5]	1,05 juta ton CO ₂ /th dari 43 PLTU nasional	1,13 juta ton CO ₂ /th dari 8 PLTU Jateng (skenario 2%)	Konsisten secara orde besaran; perbedaan berasal dari cakupan wilayah dan nilai EF
Keamanan operasional ΔQ [12]	Co-firing 1% di PLTU Suralaya: gap efisiensi minimum 1,08%	ΔQ _{rel} 2%=0,72–0,85%; 5%=1,80–2,11%, seluruhnya < 3%	Terkonfirmasi; penelitian ini mengekstrapolasi validasi Sidiq dari rasio 1% ke rasio lebih tinggi dengan hasil tetap aman
Kecukupan pasokan biomassa 5% [6]	Kebutuhan ±3,34 juta ton biopellet untuk 14 PLTU Jawa dan 12 Sumatera	Kebutuhan 1,46 juta ton untuk 8 PLTU Jateng, hanya 9,26% dari 15,79 juta ton tersedia	Sangat konsisten; Jawa Tengah memiliki surplus pasokan yang besar
Efektivitas co-firing multi-rasio [4]	Co-firing 25–30% pada PLTU uji: penurunan emisi signifikan, masih operasional	Rasio rendah 2–5%: ΔQ hanya 0,72–2,11%, EA 1,19–2,98 juta ton CO ₂ eq	Konsisten secara arah; rasio rendah jauh dari batas operasional

Sumber: diolah peneliti dari Nasution et al. [4]; Febriani et al. [5]; Ahmudi et al. [6]; Sidiq [12].

Hasil komparasi menunjukkan bahwa seluruh temuan utama penelitian ini konsisten, baik secara arah maupun orde besaran, dengan literatur terdahulu yang relevan. Tidak ditemukan adanya inkonsistensi fundamental yang dapat mempertanyakan validitas metodologi yang diterapkan. Perbedaan nilai numerik yang muncul dapat dijelaskan oleh perbedaan skala analisis, pilihan nilai faktor emisi, dan asumsi teknis antar studi, bukan oleh kesalahan perhitungan, sehingga menempatkan penelitian ini pada posisi yang cukup kokoh secara metodologis dalam mengevaluasi potensi co-firing biomassa spesifik Jawa Tengah.

3.6. Tantangan Implementasi dan Rantai Pasokan Biomassa

Seluruh analisis teknis pada bagian sebelumnya didasarkan pada asumsi bahwa biomassa dapat tersedia di gerbang PLTU sesuai spesifikasi yang dibutuhkan. Pada kenyataannya, jarak antara potensi fisik dan ketersediaan aktual di lapangan ditentukan oleh kualitas rantai pasokan biomassa, aspek yang secara konsisten menjadi hambatan utama implementasi program co-firing di berbagai negara [6], [9]. Jerami padi dan batang jagung, yang bersama-sama membentuk lebih dari 74 % total biomassa tersedia, merupakan limbah yang tersebar pada ribuan hektar lahan pertanian milik jutaan petani kecil di 29 kabupaten dan 6 kota Jawa Tengah. Karakteristik dispersi yang ekstrem ini menimbulkan tantangan logistik ganda, yaitu kepadatan curah yang rendah sehingga membutuhkan volume angkutan jauh lebih besar per satuan energi dibandingkan batubara, serta jarak yang tidak selalu dekat antara sentra produksi pertanian dan lokasi PLTU. Radius pengangkutan lebih dari 80 kilometer secara umum mulai menurunkan kelayakan ekonomis co-firing kecuali dilakukan densifikasi biomassa menjadi biopellet terlebih dahulu [6].

Produksi biomassa pertanian Jawa Tengah juga memiliki karakteristik musiman yang melekat, dengan dua puncak panen padi utama pada April sampai Mei dan Oktober sampai November, sementara PLTU beroperasi hampir sepanjang tahun dan membutuhkan pasokan biomassa yang kontinu, bukan episodik. Tanpa fasilitas penyimpanan biomassa bervolume besar dan tertutup untuk mencegah kenaikan kadar air selama musim hujan, operator berpotensi menghadapi ketidaksesuaian antara ritme panen pertanian dan ritme operasi pembangkit; studi pada konteks kepulauan Indonesia secara umum melaporkan kehilangan kalor akibat penyimpanan yang buruk dapat mencapai 5 sampai 25 % dalam kurun kurang dari sembilan bulan untuk residu berbasis lignoselulosa [29], sehingga kualitas biomassa saat tiba di PLTU berpotensi lebih rendah dari nilai LHV_{ar} yang diasumsikan pada Tabel 1a apabila rantai penyimpanan tidak dikelola dengan baik. Selain itu, sebagian jenis limbah seperti jerami padi memiliki pemanfaatan bersaing yang sudah mapan sebagai pakan ternak, bahan mulsa, dan media budidaya jamur, sehingga co-firing perlu bersaing secara harga untuk memperoleh pasokan, dan pengumpulan biomassa dari petani kecil membutuhkan mekanisme agregasi

melalui koperasi pertanian atau badan usaha pengumpul biomassa yang belum sepenuhnya terbangun di Jawa Tengah.

Mengingat tantangan tersebut, implementasi co-firing di Jawa Tengah akan lebih efektif jika dimulai dari sumber biomassa yang sudah terkonsentrasi dan memiliki collection factor tinggi, seperti batang tebu yang terpusat di lebih dari 60 pabrik gula dengan f_{coll} 0,85, serta sekam padi dari penggilingan padi besar dengan f_{coll} 0,80. Jerami padi dan batang jagung, meskipun secara massa jauh lebih besar, lebih tepat dijadikan target fase pengembangan lanjutan setelah infrastruktur rantai pasokan dan sistem agregasi petani terbangun dengan lebih matang.

3.7. Analisis Keekonomian

Analisis keekonomian dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan finansial co-firing pada berbagai skenario harga batubara. Dengan gate price biomassa rata-rata sebesar Rp 400.000 per ton, yang merepresentasikan sepuluh jenis limbah pertanian yang dievaluasi dalam penelitian ini dalam bentuk tercacah (sekam dan jerami padi, tongkol dan batang jagung, ampas dan daun/pucuk tebu, tempurung dan sabut kelapa, serta batang dan kulit ubi kayu) [20], [21], titik impas berbasis energi ekuivalen pada skenario harga batubara Domestic Market Obligation (DMO) sebesar USD 70 per ton [22] berada pada Rp 672.711 per ton, atau 68,20 % di atas harga aktual biomassa, yang berarti biomassa masih jauh lebih murah dibandingkan titik impasnya. Penghematan pada skenario 5 % berkisar antara Rp 0,95 triliun per tahun pada kondisi harga DMO hingga Rp 5,86 triliun per tahun pada kondisi Harga Batubara Acuan tinggi sebesar USD 280 per ton [23].

Perlu ditegaskan bahwa angka penghematan tersebut HANYA merepresentasikan selisih biaya bahan bakar (fuel-cost saving) antara harga gate price biomassa dan harga batubara yang disubstitusi, dan BELUM memperhitungkan biaya tambahan sepanjang rantai pasokan biomassa, yaitu pengumpulan dari petani, pengeringan, penyimpanan, densifikasi menjadi biopellet, transportasi ke PLTU, penanganan (handling) di gerbang pembangkit, maupun biaya persediaan (inventory carrying cost) untuk menjaga kontinuitas pasokan melintasi musim panen sebagaimana diuraikan pada Sub-bab 3.6. Praktik memisahkan perhitungan penghematan bahan bakar dari biaya logistik semacam ini juga menjadi keterbatasan yang diakui secara eksplisit pada studi co-firing skala nasional Indonesia terbaru [29], yang menyatakan bahwa taksiran emisi maupun keekonomian co-firing tanpa memasukkan biaya pengumpulan dan transportasi biomassa kemungkinan besar bersifat under-estimate terhadap biaya sesungguhnya. Dengan demikian, margin ekonomi Rp 0,95 sampai Rp 5,86 triliun per tahun yang dilaporkan pada penelitian ini sebaiknya dibaca sebagai batas atas (upper bound) penghematan kotor berbasis bahan bakar, bukan sebagai proyeksi penghematan bersih (net saving) yang telah memperhitungkan biaya operasional rantai pasokan secara menyeluruh;

kuantifikasi biaya logistik yang lebih rinci menjadi salah satu prioritas pengembangan lanjutan penelitian ini.

3.8. Keterbatasan dan Ketidakpastian Penelitian

Lima keterbatasan metodologis utama penelitian ini dirangkum di sini agar batas keberlakuan (scope of validity) temuan dapat dinilai secara proporsional. Pertama, cakupan analisis dibatasi pada neraca energi input boiler (ΔQ_{rel}); risiko slagging, fouling, korosi, dan keandalan boiler jangka panjang tidak dievaluasi (Sub-bab 3.2). Kedua, parameter RPR, f_{coll} , MC, dan LHV pada Tabel 1a menggunakan nilai tengah dari rentang literatur internasional, bukan pengukuran langsung di lapangan Jawa Tengah, sehingga $M_{tersedia}$ sebaiknya dibaca sebagai estimasi titik tengah [31], bukan angka presisi tunggal. Ketiga, pemeriksaan proyeksi LEAP terhadap data 2024 bersifat konsistensi tahun dasar, bukan validasi prediktif out-of-sample, berbeda dengan praktik ideal pada studi perencanaan energi regional dengan deret waktu lebih panjang [30]. Keempat, faktor emisi CH₄ default IPCC bersifat generik global dan belum dikalibrasi untuk kondisi dekomposisi residu pertanian tropis Indonesia. Kelima, analisis ekonomi (Sub-bab 3.7) terbatas pada selisih biaya bahan bakar dan belum mengintegrasikan biaya rantai pasokan. Secara bersama-sama, kelima keterbatasan ini menunjukkan bahwa angka-angka kuantitatif penelitian ini paling tepat dibaca sebagai indikasi orde besaran dan arah kebijakan awal, bukan angka presisi tinggi untuk perencanaan investasi rinci, dan penyempurnaan bertahap pada kelima aspek tersebut menjadi agenda penelitian lanjutan yang disarankan.

4. KESIMPULAN

1. Biomassa pertanian Jawa Tengah tersedia jauh melampaui kebutuhan co-firing sepanjang periode 2025 sampai 2030, dengan rasio surplus minimum 10 berbanding 1, meskipun terjadi penurunan massa total sebesar 6,11 % dari 16,81 juta ton menjadi 15,79 juta ton akibat kontraksi produksi padi dan ubi kayu yang tidak sepenuhnya diimbangi oleh pertumbuhan produksi tebu.

2. Skenario co-firing pada rasio 2 % dan 5 % tidak menimbulkan defisit neraca energi input yang berarti pada boiler PLTU eksisting, dengan nilai ΔQ_{rel} maksimum 2,77 % pada kondisi dasar dan 2,80 % pada 2030, keduanya tetap berada di bawah batas toleransi operasional 3 %; kesimpulan ini terbatas pada aspek energi input dan tidak mencakup evaluasi risiko slagging, fouling, korosi, maupun keandalan boiler jangka panjang yang berada di luar lingkup penelitian.

3. Program co-firing menghasilkan emisi terhindarkan yang signifikan, dengan skenario 5 % mencapai akumulasi 17,87 juta ton CO₂ ekuivalen dalam enam tahun, serta mendorong fraksi EBT sektor ketenagalistrikan Jawa Tengah dari 21,08 % menjadi 22,51 %; angka ini merupakan padanan sektoral yang berbeda cakupan dengan target RUED 21,32 % yang mencakup bauran energi primer total, sehingga kontribusi co-firing perlu dipahami sebagai bagian dari transisi jangka pendek hingga menengah pada sektor ketenagalistrikan, bukan sebagai bukti pemenuhan

target RUED secara keseluruhan maupun solusi tunggal bagi dekarbonisasi Jawa Tengah.

4. Secara ekonomi, co-firing berpotensi menghasilkan penghematan biaya bahan bakar berkisar Rp 0,95 sampai Rp 5,86 triliun per tahun tergantung skenario harga batubara; angka ini merupakan batas atas penghematan kotor berbasis bahan bakar yang belum memperhitungkan biaya pengumpulan, pengeringan, penyimpanan, densifikasi, dan transportasi biomassa, sehingga keberhasilan implementasinya di lapangan tetap bergantung pada penyelesaian tantangan rantai pasokan, terutama dispersi geografis limbah pertanian, karakteristik musiman panen, serta pembangunan mekanisme agregasi biomassa dari petani kecil.

5. Temuan-temuan di atas perlu dibaca bersama lima keterbatasan metodologis yang diuraikan pada Sub-bab 3.8, mencakup cakupan analisis energi-saja, ketidakpastian parameter RPR/ f_{coll} /MC, sifat konsistensi tahun dasar dari pemeriksaan model LEAP, faktor emisi CH₄ generik IPCC, dan analisis ekonomi yang belum mengintegrasikan biaya rantai pasokan, sehingga seluruh angka kuantitatif pada penelitian ini paling sesuai digunakan sebagai indikasi orde besaran dan arah kebijakan awal, yang perlu diperkuat dengan data primer lapangan sebelum dijadikan dasar keputusan investasi.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa co-firing biomassa pertanian merupakan langkah yang secara prinsip dapat diimplementasikan menggunakan infrastruktur PLTU yang sudah berjalan, dengan indikasi awal neraca energi input yang terkendali, potensi kontribusi lingkungan yang signifikan, dan potensi nilai ekonomi yang positif, sepanjang keterbatasan metodologis pada Sub-bab 3.8 ditindaklanjuti dengan data primer lapangan dan tantangan rantai pasokan biomassa diantisipasi secara sistematis sejak tahap perencanaan program.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro Universitas Semarang dan dosen pembimbing atas arahan yang diberikan selama penyusunan penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian ESDM, Outlook Energi Indonesia 2017, Jakarta: Pusat Data ESDM, 2017.
- [2] Kementerian ESDM, Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2024 (HESSI), Jakarta: Pusat Data ESDM, 2024.
- [3] Pemerintah Provinsi Jawa Tengah, Peraturan Daerah No. 12 Tahun 2018 tentang RUED Provinsi Jawa Tengah, 2018.
- [4] A. H. Nasution, R. Syahputra, dan R. A. Wahyuono, "Potensi pengurangan emisi GRK melalui co-firing biomassa pertanian pada PLTU," *J. Energi Kelistrikan*, vol. 16, no. 2, hlm. 45–60, 2024.
- [5] D. Febriani, E. N. Yuniarto, dan H. Prabowo, "Evaluasi program co-firing biomassa pada PLTU PLN: capaian dan tantangan," *J. Ketenagalistrikan Energi Terbarukan*, vol. 23, no. 1, hlm. 12–28, 2024.
- [6] A. Ahmudi, H. Hadiyanto, dan H. Susanto, "Biomass supply chain optimization for co-firing in coal-fired

- power plants in Java and Sumatra,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, in press, 2025.
- [7] A. A. Musyafiq dan R. Purwanto, “Pemodelan permintaan energi wilayah Jawa Tengah menggunakan LEAP hingga tahun 2045,” *J. Energi Kelistrikan*, vol. 13, no. 1, hlm. 1–10, 2021.
- [8] A. C. Sawindu, “Perkiraan kebutuhan energi listrik menggunakan software LEAP: studi kasus UP3 Surakarta,” Skripsi, Univ. Muhammadiyah Surakarta, 2020.
- [9] A. Koopmans dan J. Koppejan, “Agricultural and forest residues: generation, utilization and availability,” dalam *Proc. Regional Consultation Modern Appl. Biomass Energy*, Kuala Lumpur, 1997.
- [10] L. S. Esteban dan J. E. Carrasco, “Biomass resources and costs: assessment in different EU countries,” *Biomass Bioenergy*, vol. 32, no. 5, hlm. 380–399, 2008.
- [11] BPS Provinsi Jawa Tengah, *Data Produksi Pertanian Provinsi Jawa Tengah 2020–2024*, Semarang: BPS Jawa Tengah, 2024.
- [12] M. F. Sidiq, “Analisis performa boiler PLTU Suralaya Unit 2 pada kondisi co-firing biomassa serbuk gergaji,” Skripsi, Inst. Teknologi Bandung, 2022.
- [13] PT PLN Nusantara Power, *Sustainability Report 2023*, Jakarta: PLN NP, 2024.
- [14] Institute for Energy Economics and Financial Analysis, “CFPP decarbonization in Indonesia,” IEEFA, 2023.
- [15] PT PLN Energi Primer Indonesia, “Realisasi pasokan batubara PLTU Cilacap S2P 2023,” PT PLN EPI, 2023.
- [16] IPCC, *IPCC Guidelines for National GHG Inventories*, Vol. 2: Energy, IGES, 2006.
- [17] IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis (AR4)*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007.
- [18] Kementerian ESDM, *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2024 (HESSI)*, 2024.
- [19] PT PLN (Persero), *RUPTL PT PLN (Persero) 2021–2030*, Jakarta: PLN, 2021.
- [20] IRENA, *Biomass for Power Generation (IRENA/REMAP 2021/BP-0697)*, IRENA, 2021.
- [21] Kementerian ESDM, *Road Map Pengembangan Bioenergi Indonesia*, Jakarta, 2021.
- [22] Keputusan Menteri ESDM No. 139.K/HK.02/MEM.B/2021 jo. No. 267.K/MB.01/MEM.B/2022 tentang Pemenuhan Kebutuhan Batubara Dalam Negeri.
- [23] Keputusan Menteri ESDM, *Harga Batubara Acuan bulanan, historikal puncak USD 360 per ton, Oktober 2022*.
- [24] B. Bono, S. Setiawan, dan E. Rohadi, “Analisis konsumsi bahan bakar spesifik dan efisiensi termal PLTU Tanjung Jati B Unit 2,” *J. Eksergi*, vol. 14, no. 2, hlm. 44–52, 2017.
- [25] M. F. Ariyanto, D. M. Kamal, dan A. Ekayuliana, “Analisis pengaruh nilai kalori batubara terhadap efisiensi boiler CFB,” *J. Teknik Mesin*, 2023.
- [26] P. Das, P. Tiwari, dan G. Nakhla, “Thermal characterization of sugarcane bagasse and leaf for co-firing applications,” *Biomass Bioenergy*, vol. 162, hlm. 106498, 2022.
- [27] K. I. Paredes-Páliz et al., “Environmental assessment of coconut husk and shell as biomass fuel,” *Bioresource Technol.*, vol. 397, hlm. 130472, 2025.
- [28] I. Samomssa et al., “Thermogravimetric analysis of cassava peels for co-combustion applications,” *Energy Sources Part A*, vol. 44, no. 3, hlm. 7230–7246, 2022.
- [29] C. V. Squire, J. Lou, dan T. C. Hilde, “The viability of co-firing biomass waste to mitigate coal plant emissions in Indonesia,” *Commun. Earth Environ.*, vol. 5, art. 423, 2024.
- [30] A. Maina, M. Makathimo, G. Adwek, dan C. Opiyo, “Analysis of planning strategies for sustainable electricity generation in Kenya from 2015 to 2035,” *Glob. Chall.*, vol. 6, no. 8, art. 2100108, 2022.
- [31] G. W. Sileshi, E. Barrios, J. Lehmann, dan F. N. Tubiello, “An organic matter database (OMD): consolidating global residue data from agriculture, fisheries, forestry and related industries,” *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 17, no. 2, hlm. 369–391, 2025.