

Studi Life Cycle Assessment (LCA) Pengaruh Variasi Persentase Biomassa dalam Skema Co-Firing pada PLTU Pelabuhan Ratu terhadap Dampak Lingkungan dan Emisi CO₂

Syafrudin*, Wawan Aries Widodo

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: 6007241026@student.its.ac.id*, wawanaries@its.co.id

Keywords:

co-firing; sawdust; Life Cycle Assessment; Global Warming Potential; open LCA.

Abstract

Coal-fired steam power plants (PLTU) still dominate Indonesia's electricity supply while being a major contributor to greenhouse gas emissions. Biomass co-firing is a low-carbon energy-transition strategy applicable to existing plants without major modification. This study evaluates the environmental impacts and CO₂ emissions of varying sawdust co-firing percentages at Pelabuhan Ratu power plant (3×350 MW) using Life Cycle Assessment (LCA) with a cradle-to-grave boundary and a functional unit of 1 kWh of electricity. Five scenarios were analysed: a 100% coal baseline (S0) and sawdust co-firing of 5%, 10%, 15%, and 20% on an energy basis (S1–S4). Modelling used openLCA 2.6.1 with ReCiPe 2016 Midpoint (H) across four impact categories—Global Warming Potential (GWP100), Terrestrial Acidification, Particulate Matter Formation, and Ozone Formation—complemented by a Carbon Economic Value (NEK) indicator. All impact categories declined consistently with increasing co-firing. At 20% substitution (S4), GWP100 decreased by 19.6% (from 0.5983 to 0.4809 kg CO₂-eq/kWh), Terrestrial Acidification by 41.0%, Particulate Matter Formation by 37.1%, and Ozone Formation by 18.9% relative to baseline. The upstream coal stage (cradle) was the dominant GWP100 hotspot (≈74%). All scenarios fell below the PTBAE-PU cap (1.011 t CO₂e/MWh), yielding a carbon surplus with potential revenue rising from IDR 12,381/MWh (S0) to IDR 15,902/MWh (S4). Sawdust co-firing up to 20% is environmentally and economically viable as a decarbonisation strategy for existing power plants.

Kata Kunci:

Ko-firing; Serbuk Gergaji; Penilaian Daur Hidup; Potensi Pemanasan Global; OpenLCA.

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara masih mendominasi penyediaan listrik nasional sekaligus menjadi penyumbang utama emisi gas rumah kaca. Co-firing biomassa merupakan strategi transisi energi rendah karbon yang dapat diterapkan pada PLTU eksisting tanpa modifikasi besar. Penelitian ini mengevaluasi dampak lingkungan dan emisi CO₂ dari variasi persentase co-firing sawdust pada PLTU Pelabuhan Ratu (3×350 MW) menggunakan metode Life Cycle Assessment (LCA) dengan batas sistem cradle-to-grave dan satuan fungsional 1 kWh listrik. Lima skenario dianalisis: baseline 100% batubara (S0) dan co-firing sawdust 5%, 10%, 15%, dan 20% berbasis energi (S1–S4). Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak openLCA 2.6.1 dan metode ReCiPe 2016 Midpoint (H) pada empat kategori dampak: Global Warming Potential (GWP100), Terrestrial Acidification, Particulate Matter Formation, dan Ozone Formation, dilengkapi indikator Nilai Ekonomi Karbon (NEK). Hasil menunjukkan seluruh kategori dampak menurun konsisten seiring naiknya persentase co-firing. Pada substitusi 20% (S4), GWP100 menurun 19,6% (dari 0,5983 menjadi 0,4809 kg CO₂-eq/kWh), Terrestrial Acidification 41,0%, Particulate Matter Formation 37,1%, dan Ozone Formation

18,9% dibandingkan baseline. Tahap hulu batubara (cradle) menjadi hotspot dominan GWP100 ($\approx 74\%$). Seluruh skenario berada di bawah cap PTBAE-PU (1,011 ton CO₂e/MWh) sehingga menghasilkan surplus karbon, dengan potensi pendapatan meningkat dari Rp12.381/MWh (S0) menjadi Rp15.902/MWh (S4). Co-firing sawdust hingga 20% terbukti layak secara lingkungan dan ekonomi sebagai strategi dekarbonisasi PLTU eksisting.

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) masih menjadi tulang punggung penyediaan energi listrik nasional di Indonesia, dengan dominasi batubara mencapai lebih dari 60% (KESDM, 2021; PLN, 2022). Ketergantungan tinggi terhadap batubara di satu sisi mendukung keandalan pasokan, namun di sisi lain menjadikannya sumber utama emisi gas rumah kaca (GRK), terutama karbon dioksida (CO₂). Berdasarkan data Kementerian ESDM (2023), sektor ketenagalistrikan berkontribusi sekitar 35% dari total emisi karbon nasional dengan PLTU sebagai penyumbang terbesar. Dalam upaya menurunkan emisi GRK dan mendukung komitmen Net Zero Emission (NZE) pada tahun 2060, implementasi teknologi co-firing biomassa pada PLTU eksisting menjadi salah satu langkah strategis pemerintah (Fachrizal, R., & Susanto, 2021) dan (Rizaldi & Adiansyah, 2022).

Co-firing memungkinkan sebagian batubara digantikan biomassa tanpa modifikasi besar pada sistem pembakaran (Susanto & Rahardjo, 2020), sehingga secara teknis dan ekonomi lebih efisien dibandingkan membangun pembangkit energi baru terbarukan. Jenis biomassa yang banyak digunakan adalah sawdust (serbuk kayu) karena ketersediaannya tinggi, mudah dikeringkan, dan memiliki nilai kalor relatif stabil (Haryanto & Wibowo, 2022; Rini et al., 2021), serta berpotensi mendekati netral karbon karena bersumber dari karbon yang dapat diperbarui (Ghani & Alias, 2020). PLTU Pelabuhan Ratu (3×350 MW) di Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat, merupakan salah satu PLTU strategis milik PLN Indonesia Power yang menjadi lokasi percontohan implementasi co-firing biomassa. Namun, penggunaan biomassa dalam sistem co-firing tidak serta-merta menjamin penurunan dampak lingkungan secara keseluruhan. Proses pengumpulan, transportasi, dan pra-pengolahan biomassa turut menyumbang emisi dan dampak lingkungan lain seperti acidification dan particulate matter formation. Oleh karena itu diperlukan pendekatan komprehensif untuk menilai keseluruhan dampak sistem. Life Cycle Assessment (LCA) merupakan metode yang sesuai untuk mengevaluasi dampak lingkungan suatu sistem sepanjang siklus hidupnya, mulai dari ekstraksi bahan baku, transportasi, produksi, penggunaan, hingga pembuangan akhir (ISO 14040, 2006; García et al., 2019; JRC, 2010).

Kajian terdahulu menunjukkan hasil yang bervariasi. Pambudi et al. (2022) melaporkan co-firing 10% sawdust pada PLTU Suralaya menurunkan GWP 8,5% namun meningkatkan particulate matter formation 3,2%, sementara Rahman & Lee (2021) menekankan bahwa manfaat reduksi GWP sangat sensitif terhadap jarak transportasi biomassa. Sebagian besar studi tersebut menggunakan satu nilai persentase co-firing tetap dan/atau data PLTU di luar Indonesia. Belum terdapat studi LCA multi-skenario yang secara spesifik mengkaji PLTU Pelabuhan Ratu menggunakan data operasional aktual fasilitas tersebut. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan menganalisis lima skenario operasi (S0–S4) untuk membandingkan total dampak lingkungan, mengidentifikasi tahapan siklus hidup yang menjadi hotspot, serta menilai implikasinya terhadap Nilai Ekonomi Karbon (NEK).

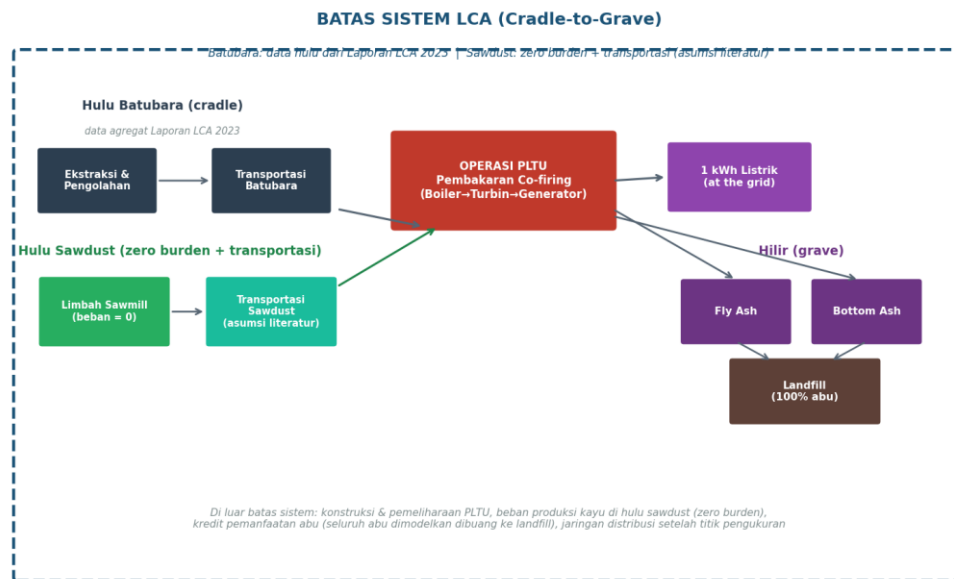
Kebaruan penelitian ini terletak pada beberapa aspek. Pertama, penelitian ini merupakan studi LCA multi-skenario (5 skenario: 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% co-firing) yang secara spesifik mengkaji PLTU Pelabuhan Ratu menggunakan data operasional aktual fasilitas tersebut. Kedua, penelitian ini menggunakan pendekatan cradle-to-grave dengan mempertimbangkan seluruh tahapan siklus hidup: ekstraksi batubara (cradle), transportasi, pembakaran (gate), dan pembuangan abu (grave). Ketiga, penelitian ini mengidentifikasi hotspot emisi sepanjang siklus hidup untuk memberikan rekomendasi strategis bagi pengelola PLTU. Keempat, penelitian ini menilai implikasi ekonomi dari pengurangan emisi melalui co-firing dalam kerangka Nilai Ekonomi Karbon (NEK) berdasarkan UU No. 7 Tahun 2021 dan Perpres No. 98 Tahun 2021. Penelitian oleh Febijanto et al. (2024) menggunakan pendekatan LCA dengan batas sistem cradle-to-gate dan menemukan bahwa co-firing sawdust 11,80% menurunkan GWP sebesar 19,83%. Penelitian oleh Hadiyati & Adi (2026) menunjukkan bahwa co-firing 5% EFB menurunkan emisi GRK sebesar 13,13% dan menurunkan biaya bahan bakar sebesar 6,55%.

Tujuan penelitian ini adalah membandingkan dampak lingkungan sistem pembangkitan listrik PLTU Pelabuhan Ratu pada lima skenario: baseline 100% batubara (S0) dan co-firing sawdust 5%, 10%, 15%, dan 20% berbasis energi (S1–S4) dengan menggunakan metode Life Cycle Assessment (LCA). Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi berupa data empiris tentang dampak lingkungan co-firing sawdust pada berbagai persentase substitusi, identifikasi hotspot emisi sepanjang siklus hidup, serta rekomendasi strategis bagi pengelola PLTU dan pembuat kebijakan dalam mengimplementasikan co-firing biomassa sebagai strategi dekarbonisasi.

METODE PENELITIAN

Tujuan, Satuan Fungsional, dan Batas Sistem

Penelitian ini bertujuan membandingkan dampak lingkungan sistem pembangkitan listrik PLTU Pelabuhan Ratu pada lima skenario: baseline 100% batubara (S0) dan co-firing sawdust 5%, 10%, 15%, dan 20% berbasis energi (S1–S4) dengan menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Satuan fungsional yang digunakan adalah 1 kWh listrik yang dihasilkan dan dikirimkan ke jaringan transmisi (at the grid), konsisten dengan studi LCA pembangkit listrik terdahulu (Pambudi et al., 2022; Rahman & Lee, 2021). Penelitian menggunakan batas sistem cradle-to-grave. Untuk batubara, seluruh tahapan hulu (ekstraksi, pengolahan, transportasi hingga ke PLTU) mengacu pada data agregat Laporan LCA PLTU Pelabuhan Ratu (2023). Sawdust diperlakukan dengan pendekatan *zero burden* sebagai limbah industri pengolahan kayu, sehingga beban produksi kayu dibebankan pada produk utama, hanya transportasi sawdust dari sawmill ke PLTU yang diperhitungkan, tanpa proses pengeringan. Tahap akhir (grave) didefinisikan sebagai pembuangan fly ash dan bottom ash ke landfill. Transportasi sawdust dimodelkan pada jarak 100 km menggunakan moda truk, mengacu pada rentang umum studi co-firing biomassa di Indonesia.



Gambar 1. Batas Sistem LCA

Inventarisasi Siklus Hidup (LCI)

Data operasional dikumpulkan dari laporan teknis PLN Indonesia Power PLTU Pelabuhan Ratu tahun 2023, meliputi kapasitas terpasang dan faktor kapasitas, konsumsi batubara, efisiensi termal neto (diasumsikan konstan antar-skenario), emisi langsung cerobong (CO_2 , SO_2 , NO_x , partikulat) dari pengujian Continuous Emission Monitoring System (CEMS), serta volume dan metode pembuangan abu. Nilai kalor batubara 18,56 MJ/kg dan efisiensi termal neto 27,91% digunakan sesuai data aktual. Komposisi campuran ditetapkan berbasis energi agar keluaran listrik setara antar-skenario. Faktor emisi pembakaran mengacu pada IPCC (2019), sedangkan proses background transportasi sawdust dan pembuangan abu mengacu pada basis data Ecoinvent. Rangkuman inventori per skenario disajikan pada Tabel 1.

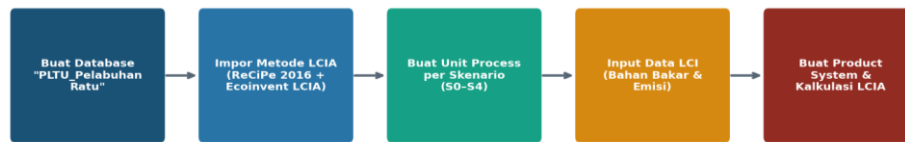
Tabel 1. Data Inventori Siklus Hidup (LCI) per Skenario per 1 kWh Listrik

Skenario	Batubara (kg)	Sawdust (kg)	CO_2 (kg)	SO_2 (kg)	NO_x (kg)	PM (kg)
S0	0,6952	0,0000	0,13200	0,00173	0,00055	0,00014
S1	0,6604	0,0570	0,12540	0,00165	0,00052	0,00013
S2	0,6257	0,1141	0,11880	0,00111	0,00047	0,00011
S3	0,5909	0,1711	0,11220	0,00104	0,00044	0,00011
S4	0,5562	0,2281	0,10560	0,00098	0,00042	0,00010

Sumber: Laporan Teknis PLN Indonesia Power PLTU Pelabuhan Ratu (2023)

Pemodelan Sistem dan Skenario

Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak openLCA versi 2.6.1 yang terintegrasi dengan basis data Ecoinvent sebagai sumber data background.



Gambar 2. Tahapan Pemodelan Sistem LCA pada openLCA 2.6.1

Setiap skenario didefinisikan sebagai unit process tersendiri dengan flow keluaran “Electricity, PLTU Pelabuhan Ratu” sebesar 1,0 kWh sebagai referensi kuantitatif, kemudian dibangun product system untuk keperluan kalkulasi LCIA. Kelima skenario yang dibandingkan dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Skenario Co-firing dalam Penelitian

Skenario	Komposisi Bahan Bakar	Keterangan
S0	100% batubara	Baseline / kondisi eksisting
S1	95% batubara + 5% sawdust	Co-firing 5%
S2	90% batubara + 10% sawdust	Co-firing 10%
S3	85% batubara + 15% sawdust	Co-firing 15%
S4	80% batubara + 20% sawdust	Co-firing 20%

Penilaian Dampak (LCIA) dan Nilai Ekonomi Karbon

Metode penilaian dampak yang digunakan adalah ReCiPe 2016 Midpoint (H). Empat kategori dampak yang dievaluasi adalah Global Warming Potential (GWP100, kg CO₂-eq), Terrestrial Acidification (kg SO₂-eq), Particulate Matter Formation (kg PM_{2,5}-eq), dan Ozone Formation (kg NO_x-eq). Kategori Eutrophication dan Fossil Resource Scarcity yang semula direncanakan menghasilkan nilai nol pada seluruh scenario karena inventarisasi difokuskan pada emisi udara langsung dan beban hulu batubara dimodelkan sebagai data agregat emisi, sehingga digantikan oleh Ozone Formation yang memiliki hasil terukur. Identifikasi hotspot dilakukan melalui contribution analysis pada openLCA, dengan validasi terhadap neraca massa-energi dan kesesuaian GWP skenario baseline (S0) dengan Laporan LCA PLTU Pelabuhan Ratu (2023). Nilai Ekonomi Karbon (NEK) dihitung sebagai indikator ekonomi turunan yang menerjemahkan GWP100 ke dalam besaran biaya/insentif pajak karbon, mengacu pada UU No. 7 Tahun 2021 (Harmonisasi Peraturan Perpajakan) dan Perpres No. 98 Tahun 2021. Mekanismenya mengikuti skema *cap and tax*. Intensitas emisi tiap skenario dibandingkan dengan batas atas emisi (cap) PTBAE-PU sebesar 1,011 ton CO₂e/MWh untuk PLTU non-mulut tambang kapasitas 100 - 400 MW. Selisih emisi terhadap cap dihitung sebagai $\Delta E = E_{\text{aktual}} - E_{\text{cap}}$, lalu $NEK = \Delta E \times \text{tarif pajak karbon (Rp30.000/ton CO}_2\text{e)}$. Nilai ΔE negatif menandakan surplus (di bawah cap) sehingga NEK negatif yang berarti potensi pendapatan dari penjualan surplus karbon.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Inventarisasi Emisi Langsung

Inventarisasi siklus hidup menghimpun aliran masukan bahan bakar dan keluaran emisi langsung tiap skenario per 1 kWh. Karena komposisi ditetapkan berbasis energi, keluaran listrik tetap setara sementara massa batubara berkurang dan massa sawdust bertambah seiring naiknya persentase co-firing. Hasil inventarisasi emisi langsung disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Inventarisasi Emisi Langsung per Skenario (per 1 kWh)

Parameter	Satuan	S0	S1	S2	S3	S4
CO ₂ total	kg	0,5983	0,5689	0,5396	0,5102	0,4809
SO ₂	kg	1,73E-03	1,65E-03	1,11E-03	1,04E-03	9,80E-04
NO _x	kg	5,18E-04	5,20E-04	4,70E-04	4,40E-04	4,20E-04
PM _{2,5}	kg	1,26E-04	1,30E-04	1,10E-04	1,10E-04	1,00E-04

Sumber: Keluaran openLCA 2.6.1, diolah penulis

Seluruh parameter emisi langsung cenderung menurun seiring meningkatnya persentase co-firing. Penurunan CO₂ merupakan konsekuensi langsung berkurangnya massa batubara yang dibakar, sedangkan penurunan SO₂ mencerminkan kandungan sulfur sawdust yang jauh lebih rendah dibandingkan batubara. Emisi NO_x menunjukkan sedikit kenaikan pada S1 sebelum menurun pada skenario berikutnya, berkaitan dengan karakteristik pembakaran campuran biomassa pada proporsi rendah.

Penilaian Dampak Siklus Hidup (LCIA)

Hasil penilaian dampak komparatif kelima skenario per 1 kWh disajikan pada Tabel 4. Keempat kategori dampak menurun secara konsisten dari S0 ke S4.

Tabel 4. Hasil Penilaian Dampak Siklus Hidup Komparatif S0–S4 (per 1 kWh)

Kategori Dampak	Satuan	S0	S1	S2	S3	S4
Global Warming Potential	kg CO ₂ -eq	0,5983	0,5689	0,5396	0,5102	0,4809
Terrestrial Acidification	kg SO ₂ -eq	1,917E-03	1,837E-03	1,279E-03	1,198E-03	1,131E-03
Particulate Matter Formation	kg PM _{2,5} -eq	6,847E-04	6,657E-04	4,836E-04	4,600E-04	4,304E-04
Ozone Formation	kg NO _x -eq	5,180E-04	5,200E-04	4,700E-04	4,400E-04	4,200E-04

Sumber: Keluaran openLCA 2.6.1 (ReCiPe 2016 Midpoint H), nilai GWP terkoreksi, diolah penulis

Penurunan terbesar terjadi pada Terrestrial Acidification (–41,0%), diikuti Particulate Matter Formation (–37,1%), Global Warming Potential (–19,6%), dan Ozone Formation (–18,9%). Pola ini menegaskan bahwa substitusi sebagian batubara dengan sawdust memberikan manfaat lingkungan pada seluruh kategori yang dikaji, dengan magnitudo perbaikan yang berbeda antar kategori.

Global Warming Potential dan Analisis Hotspot

GWP100 menurun dari 0,5983 kg CO₂-eq/kWh pada S0 menjadi 0,4809 kg CO₂-eq/kWh pada S4 (reduksi 19,6% pada substitusi 20%). Penurunan ini hampir linier terhadap persentase

co-firing karena pengurangan CO₂ fosil dari pembakaran batubara mendominasi neraca karbon, sementara CO₂ biogenik dari pembakaran sawdust diperlakukan netral karbon sesuai pendekatan zero burden. Untuk mengidentifikasi hotspot, nilai GWP100 didekomposisi menurut tahap siklus hidup sebagaimana disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Dekomposisi GWP100 per Tahap Siklus Hidup (kg CO₂-eq/kWh)

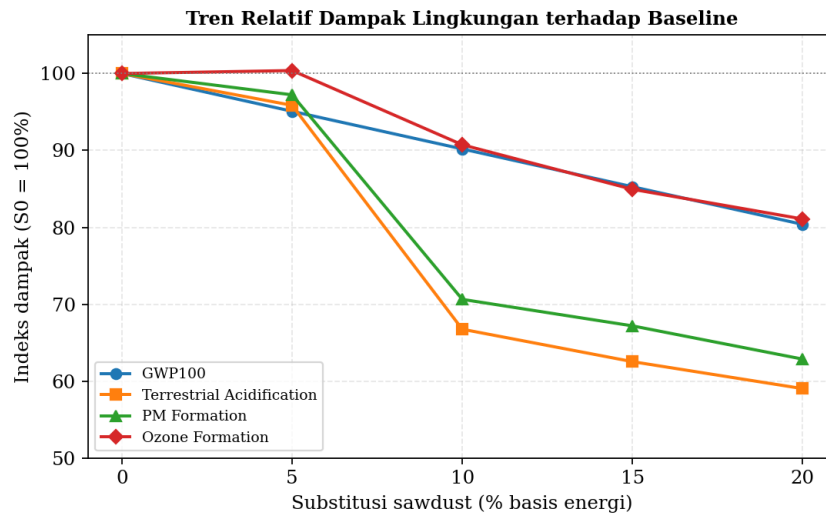
Skenario	Cradle	Gate	Grave	Transport	Total
S0	0,4450	0,1320	0,02130	0,00000	0,5983
S1	0,4227	0,1254	0,02024	0,00057	0,5689
S2	0,4005	0,1188	0,01917	0,00114	0,5396
S3	0,3782	0,1122	0,01811	0,00171	0,5102
S4	0,3560	0,1056	0,01704	0,00228	0,4809

Sumber: Keluaran openLCA 2.6.1, diolah penulis

Tahap cradle (hulu batubara) merupakan hotspot dominan GWP100 dengan kontribusi sekitar 74% pada seluruh skenario, diikuti tahap gate (pembakaran) sekitar 22%, grave (penimbunan abu) sekitar 3,5%, dan transportasi sawdust yang meningkat dari nol pada S0 menjadi 0,47% pada S4. Dominasi cradle menegaskan bahwa beban karbon terbesar berasal dari rantai pasok batubara di hulu, bukan semata proses pembakaran. Meskipun kontribusi transportasi sawdust bertambah seiring naiknya co-firing, besarnya tetap jauh lebih kecil daripada penghematan emisi dari pengurangan batubara, sehingga efek netonya tetap berupa penurunan GWP100.

Kategori Dampak Lainnya

Terrestrial Acidification menunjukkan penurunan paling tajam (-41,0%, dari $1,917 \times 10^{-3}$ menjadi $1,131 \times 10^{-3}$ kg SO₂-eq/kWh), terutama didorong berkurangnya emisi SO₂ mengingat kandungan sulfur sawdust yang sangat rendah dan faktor karakterisasi pengasaman SO₂ yang tinggi. Particulate Matter Formation menurun 37,1% (dari $6,847 \times 10^{-4}$ menjadi $4,304 \times 10^{-4}$ kg PM_{2,5}-eq/kWh) seiring penurunan PM_{2,5} langsung maupun prekursor sekunder (SO₂ dan NO_x), menjadikan substitusi sawdust bermanfaat ganda yaitu menurunkan emisi karbon sekaligus memperbaiki kualitas udara lokal. Ozone Formation menurun 18,9% (dari $5,18 \times 10^{-4}$ menjadi $4,20 \times 10^{-4}$ kg NO_x-eq/kWh). Pada model ini nilainya identik dengan emisi NO_x karena NO_x merupakan satu-satunya prekursor yang termuat dalam inventarisasi. Seluruh kategori berada di bawah garis baseline 100% pada setiap tingkat co-firing.



Gambar 3. Tren Relatif Dampak Lingkungan terhadap Baseline (S0 = 100%)

Nilai Ekonomi Karbon (NEK)

Intensitas emisi tiap skenario dibandingkan terhadap cap PTBAE-PU sebesar 1,011 ton CO₂e/MWh dengan tarif pajak karbon Rp30.000/ton CO₂e. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perhitungan Nilai Ekonomi Karbon (NEK) per Skenario

Skenario	Intensitas Emisi (ton CO ₂ e/MWh)	Cap PTBAE-PU (ton CO ₂ e/MWh)	ΔE (ton CO ₂ e/MWh)	NEK (Rp/MWh)
S0	0,59830	1,011	-0,41270	-Rp12.381
S1	0,56891	1,011	-0,44209	-Rp13.263
S2	0,53961	1,011	-0,47139	-Rp14.142
S3	0,51022	1,011	-0,50078	-Rp15.023
S4	0,48092	1,011	-0,53008	-Rp15.902

Sumber: Hasil perhitungan penulis berdasarkan GWP100 terkoreksi dan ketentuan PTBAE-PU (Kementerian ESDM)

Intensitas emisi seluruh skenario, termasuk baseline S0, berada di bawah cap PTBAE-PU sehingga seluruh skenario menghasilkan ΔE negatif (surplus) dan NEK negatif, yang dalam mekanisme cap and tax berarti potensi pendapatan dari penjualan surplus unit karbon bukan kewajiban pajak. Potensi surplus meningkat dari Rp12.381/MWh pada S0 menjadi Rp15.902/MWh pada S4, dengan selisih sekitar Rp3.521/MWh yang menggambarkan insentif ekonomi tambahan dari penerapan co-firing 20% di luar manfaat lingkungannya. Nilai ini dihitung pada tarif batas bawah; pada harga pasar karbon yang lebih tinggi, insentif ekonomi co-firing akan meningkat secara proporsional.

Keterbatasan

Beberapa keterbatasan perlu disampaikan. Kategori Freshwater Eutrophication dan Fossil Resource Scarcity menghasilkan nilai nol akibat batas sistem yang berfokus pada emisi udara langsung dan penggunaan data agregat emisi untuk hulu batubara, sehingga tidak dianalisis sebagai kategori utama. Perlakuan zero burden terhadap sawdust dan penggunaan

data agregat untuk hulu batubara menyebabkan dominasi tahap cradle tidak dapat diuraikan lebih lanjut menjadi sub-proses penyusunnya. Asumsi jarak transportasi sawdust 100 km bersifat representatif dan tidak diverifikasi terhadap kondisi pasok aktual, meskipun pengaruhnya terhadap total dampak relatif kecil pada rentang substitusi yang dikaji.

KESIMPULAN

Studi LCA terhadap PLTU Pelabuhan Ratu untuk baseline 100% batubara (S0) dan co-firing sawdust 5–20% (S1–S4) menggunakan ReCiPe 2016 Midpoint (H) dengan satuan fungsional 1 kWh menghasilkan simpulan sebagai berikut. Peningkatan persentase co-firing menurunkan seluruh parameter emisi langsung. Massa batubara berkurang dari 0,6952 kg (S0) menjadi 0,5562 kg (S4) seiring bertambahnya massa sawdust hingga 0,2281 kg, diikuti penurunan CO₂, SO₂, NO_x, dan partikulat. Co-firing memberikan perbaikan konsisten pada keempat kategori dampak. Pada substitusi 20% (S4), GWP100 menurun 19,6%, Terrestrial Acidification 41,0%, Particulate Matter Formation 37,1%, dan Ozone Formation 18,9% dibandingkan baseline, tanpa burden shifting yang signifikan.

Tahap cradle (hulu batubara) merupakan kontributor dominan GWP100 ($\approx 74\%$), diikuti gate ($\approx 22\%$), grave ($\approx 3,5\%$), dan transportasi sawdust (0 - 0,47%), sehingga upaya dekarbonisasi lebih lanjut perlu menysasar rantai pasok batubara di hulu. Dari sisi ekonomi, intensitas emisi seluruh skenario berada di bawah cap PTBAE-PU sehingga menghasilkan surplus karbon, dengan potensi pendapatan meningkat dari Rp12.381/MWh (S0) menjadi Rp15.902/MWh (S4). Secara keseluruhan, skenario co-firing 20% (S4) memberikan manfaat lingkungan dan ekonomi paling optimal, sehingga co-firing sawdust layak diterapkan sebagai strategi transisi energi rendah karbon pada PLTU eksisting, sejalan dengan target Net Zero Emission nasional. Penelitian lanjutan disarankan melengkapi model hulu batubara dengan dataset background ekstraksi sumber daya fosil dan aliran nutrien ke badan air, memverifikasi jarak transportasi sawdust aktual, serta memperluas kajian pada variasi jenis biomassa lain dan analisis ketidakpastian.

REFERENSI

- Fachrizal, R., & Susanto, H. (2021). Potential of biomass co-firing to support net zero emission roadmap in Indonesia. *Energy Procedia*.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2019). Life cycle assessment of coal-fired power plants: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 235–244.
- Ghani, W. A. W. A. K., & Alias, A. B. (2020). Co-firing biomass with coal for electricity generation: An overview of emission and cost impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110382. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110382>
- Haryanto, A., & Wibowo, A. (2022). Analisis potensi sawdust sebagai bahan bakar biomassa untuk co-firing pada PLTU di Indonesia. *Jurnal Energi dan Konversi*, 12(3), 115–126.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe 2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. IPCC.
- International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. ISO.

- International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. ISO.
- JRC European Commission. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook: General guide for life cycle assessment — Detailed guidance*. Publications Office of the European Union.
- Karampinis, E., Grammelis, P., Agraniotis, M., Violidakis, I., & Kakaras, E. (2014). Co-firing of biomass with coal in thermal power plants: Technology schemes, impacts, and future perspectives. *WIREs Energy and Environment*, 3(4), 384–399. <https://doi.org/10.1002/wene.100>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2021). *Laporan statistik energi Indonesia 2021*. Direktorat Jenderal EBTKE.
- Maulana, F., Setiawan, I., & Nugroho, P. (2023). Analisis pengaruh substitusi biomassa terhadap emisi CO₂ pada PLTU berbasis life cycle assessment. *Jurnal Rekayasa Energi dan Lingkungan*, 19(2), 121–135.
- Pambudi, N. A., Setiawan, B. A., & Yulistyorini, A. (2022). Life cycle assessment of biomass co-firing in coal-fired power plants: Case study of Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132428. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132428>
- PLN (PT Perusahaan Listrik Negara). (2022). *Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021–2030*. Kementerian ESDM dan PT PLN (Persero).
- Rahman, M. S., & Lee, S. (2021). Life cycle greenhouse gas emissions from co-firing biomass in coal power plants: A case study in Southeast Asia. *Energy Policy*, 156, 112430. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112430>
- Rini, E. S., Siregar, R., & Sitorus, D. (2021). Characterization of sawdust biomass as an alternative fuel for co-firing in steam power plants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 913(1), 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/913/1/012043>
- Rizaldi, R., & Adiansyah, J. S. (2022). Environmental benefits of biomass co-firing implementation in Indonesian coal power plants: LCA approach. *Energies*, 15(7), 2631. <https://doi.org/10.3390/en15072631>
- Sukarni, & Yulianto, T. (2021). Analysis of the environmental impact of co-firing biomass in coal-fired power plants using life cycle assessment. *International Journal of Energy Research*, 45(10), 14573–14588. <https://doi.org/10.1002/er.6795>
- Susanto, H., & Rahardjo, S. (2020). Performance evaluation of co-firing biomass with coal in pulverized boiler system. *Energy Reports*, 6, 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.170>
- Syafrudin, S., & Utami, D. P. (2022). Life cycle carbon emission assessment of coal power plants and mitigation through co-firing with biomass. *Environmental Challenges*, 9, 100708. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100708>
- Tanbar, F. (2021). Analisa karakteristik pengujian co-firing biomassa sawdust pada PLTU type pulverized coal boiler sebagai upaya bauran renewable energy. *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, 5(2).
- Yadav, V., & Samadder, S. R. (2018). A critical review of life cycle assessment studies on solid waste management in Asian countries. *Science of the Total Environment*, 643, 1460–1472. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.298>
- Zhao, X., Ma, X., & Chen, B. (2020). Environmental and economic performance of co-firing biomass with coal in power plants: A life cycle perspective. *Applied Energy*, 275, 115401. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115401>
- Zulkifli, I., & Hartono, D. (2021). Analisis potensi pengurangan emisi CO₂ pada PLTU dengan skema co-firing biomassa di Indonesia. *Jurnal Energi dan Teknologi Lingkungan*, 9(1), 34–42.