

Evaluasi Tekno-Ekonomi dan Lingkungan Co-Firing Biomassa pada PLTU CFB di Nusa Tenggara Timur

Andi Wulan^{*a)}, M. Ahsin Sidqi^{a)}

(Received 4 Mei 2026 || Revised 25 Juni 2026 || Published 9 Juli 2026)

Abstract: *This study evaluates the technical, economic, and environmental performance of biomass co-firing implementation at the Bolok Coal-Fired Power Plant (CFB type) in East Nusa Tenggara. The study aims to assess the impact of biomass substitution on plant performance and to analyze uncertainty associated with key operational parameters. A deterministic analysis was conducted using what-if scenarios, while uncertainty was evaluated through Monte Carlo simulation with 10,000 iterations. Technical performance was assessed using Specific Coal Consumption (SCC), economic performance was evaluated based on fuel cost, and environmental performance was measured through CO₂ emission reduction. The results indicate that SCC ranges from 0.85 to 1.08 kg/kWh with an average value of 0.96 kg/kWh. Fuel cost ranges from IDR 991,314.93 to IDR 1,352,002.53 per MWh, while CO₂ emission reduction ranges from 2,711.85 to 5,796.49 tonCO₂. The findings show that increasing the co-firing ratio contributes to significant emission reduction while maintaining fuel cost within an acceptable range, although specific fuel consumption tends to increase due to the lower calorific value of biomass. Monte Carlo simulation reveals that economic variables, particularly biomass price, have the greatest influence on uncertainty compared with technical and environmental variables. The main contribution of this study lies in the integration of technical, economic, environmental, and probabilistic analyses using actual operational data from a CFB power plant, providing a more comprehensive basis for evaluating biomass co-firing implementation under uncertain operating conditions.*

Keywords: *biomass co-firing, circulating fluidized bed, fuel cost, CO₂ emission reduction, Monte Carlo simulation*

1. Pendahuluan

Pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar pendamping batubara melalui skema co-firing menjadi salah satu strategi yang banyak dikembangkan untuk mendukung transisi energi dan menekan emisi gas rumah kaca pada sektor pembangkitan listrik. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa substitusi sebagian batubara dengan biomassa mampu menurunkan emisi karbon tanpa memerlukan perubahan besar pada infrastruktur pembangkit yang telah beroperasi. Arifin et al. melaporkan bahwa penerapan co-firing biomassa pada PLTU batubara memiliki potensi untuk menurunkan emisi sekaligus meningkatkan pemanfaatan sumber daya energi terbarukan [1]. Selain itu, implementasi co-firing pada boiler tipe Circulating Fluidized Bed (CFB) dilaporkan memberikan keuntungan dari sisi lingkungan meskipun masih menimbulkan konsekuensi terhadap kebutuhan bahan bakar dan kinerja pembangkit [2].

Meskipun penelitian mengenai co-firing biomassa telah berkembang cukup luas, sebagian besar kajian masih berfokus pada aspek teknis, ekonomi, atau lingkungan secara terpisah. Di sisi lain, evaluasi implementasi co-firing pada kondisi operasi aktual masih banyak menggunakan pendekatan deterministik yang menghasilkan satu nilai keluaran tunggal. Padahal, parameter yang memengaruhi kinerja sistem seperti nilai kalor bahan bakar, harga biomassa, harga batubara, dan rasio co-firing memiliki tingkat variabilitas yang dapat berubah selama operasi pembangkit berlangsung. Kondisi tersebut menyebabkan hasil analisis deterministik belum sepenuhnya mampu menggambarkan ketidakpastian yang terjadi pada sistem energi [3].

PLTU Bolok di Nusa Tenggara Timur merupakan salah satu pembangkit yang menggunakan boiler tipe Circulating Fluidized Bed (CFB) dengan kapasitas terpasang 2 × 16,5 MW dan memiliki fleksibilitas untuk memanfaatkan biomassa sebagai bahan bakar pendamping batubara. Karakteristik boiler CFB yang mampu mengakomodasi variasi kualitas bahan bakar menjadikan pembangkit ini relevan sebagai objek penelitian implementasi co-firing biomassa [2], [4]. Namun demikian, kajian yang mengintegrasikan evaluasi teknis, ekonomi, lingkungan, dan

ketidakpastian secara simultan menggunakan data operasi aktual masih relatif terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh implementasi co-firing biomassa terhadap kinerja teknis, ekonomi, dan lingkungan pada PLTU Bolok tipe CFB serta mengevaluasi ketidakpastian hasil menggunakan simulasi Monte Carlo. Analisis dilakukan melalui kombinasi pendekatan deterministik menggunakan skenario what-if dan pendekatan probabilistik berbasis Monte Carlo. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi analisis Specific Coal Consumption (SCC), biaya bahan bakar, dan penurunan emisi CO₂ dalam satu kerangka evaluasi berbasis data operasi aktual sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai peluang dan risiko implementasi co-firing biomassa.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis studi kasus pada PLTU Bolok, Nusa Tenggara Timur. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi dampak penerapan co-firing biomassa terhadap kinerja teknis, ekonomi, dan lingkungan pembangkit. Untuk memperoleh hasil yang lebih komprehensif, penelitian mengombinasikan pendekatan deterministik melalui analisis skenario (*what-if analysis*) dan pendekatan probabilistik menggunakan simulasi Monte Carlo. Data yang digunakan meliputi data operasional pembangkit, konsumsi bahan bakar, produksi energi listrik netto, nilai kalor bahan bakar, serta parameter ekonomi dan lingkungan yang relevan.

2.1 Model Analisis Kinerja Teknis

Evaluasi kinerja teknis dilakukan menggunakan parameter *Specific Coal Consumption* (SCC), yaitu rasio antara total konsumsi bahan bakar terhadap energi listrik netto yang dihasilkan pembangkit. Parameter SCC digunakan untuk menggambarkan tingkat kebutuhan bahan bakar dalam menghasilkan satu satuan energi listrik serta menilai perubahan efisiensi penggunaan bahan bakar akibat penerapan co-firing biomassa [4] [5].

$$SCC = \frac{m_{total}}{P_{nett}} \quad (2-1)$$

*Korespondensi: andi2410021@itpln.ac.id

a) Prodi Magister, Jurusan Teknik Elektro, Sekolah Pasca Sarjana, Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

di mana:

SCC = *Specific Coal Consumption* (kg/kWh)

m_{total} = total konsumsi bahan bakar (kg)

P_{net} = energi listrik netto (kWh)

Pada sistem co-firing, nilai SCC dipengaruhi oleh karakteristik bahan bakar yang digunakan, terutama nilai kalor biomassa dan batubara. Perbedaan nilai kalor tersebut dapat memengaruhi jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik pada tingkat output yang sama [2].

2.2 Model Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi difokuskan pada biaya bahan bakar (*fuel cost*) sebagai komponen utama biaya operasional pembangkit. Perhitungan dilakukan dengan mempertimbangkan jumlah konsumsi masing-masing bahan bakar serta harga satuannya untuk setiap skenario rasio co-firing yang dianalisis [6][7].

$$Fuel\ Cost = (m_{coal} \times H_{coal}) + (m_{biomass} \times H_{biomass}) \quad (2-2)$$

di mana:

m_{coal} = konsumsi batubara (ton)

$m_{biomass}$ = konsumsi biomassa (ton)

H_{coal} = harga batubara (Rp/ton)

$H_{biomass}$ = harga biomassa (Rp/ton)

Analisis ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan rasio co-firing terhadap biaya bahan bakar dengan mempertimbangkan variasi harga batubara dan biomassa pada berbagai skenario operasi. Dengan demikian, pengaruh implementasi co-firing terhadap aspek ekonomi dapat dievaluasi secara lebih representatif terhadap kondisi operasi aktual pembangkit [8].

2.3 Model Analisis Emisi CO₂

Evaluasi aspek lingkungan dilakukan melalui perhitungan emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan dari penggunaan bahan bakar pada pembangkit. Perhitungan emisi mengacu pada pendekatan faktor emisi yang direkomendasikan oleh *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [8][9].

$$Emisi\ CO_2 = (m_{coal} \times EF_{coal}) + (m_{biomass} \times EF_{biomass}) \quad (2-3),$$

dengan:

EF_{coal} = faktor emisi batubara

$EF_{biomass}$ = faktor emisi biomassa

Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi potensi penurunan emisi CO₂ akibat substitusi sebagian batubara dengan biomassa pada berbagai rasio co-firing. Penggunaan biomassa sebagai bahan bakar pendamping berpotensi mengurangi emisi karbon dari sektor pembangkitan listrik karena sebagian energi yang dihasilkan berasal dari sumber energi terbarukan [9][10].

2.4 Analisis What-if

Analisis *what-if* digunakan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan rasio co-firing biomassa terhadap kinerja teknis, ekonomi, dan lingkungan pembangkit. Pendekatan ini dilakukan dengan mensimulasikan beberapa skenario rasio pencampuran biomassa terhadap batubara untuk mengetahui sensitivitas perubahan parameter keluaran terhadap variasi komposisi bahan bakar.

Skenario co-firing disusun berdasarkan variasi rasio biomassa yang merepresentasikan kemungkinan implementasi operasional pada PLTU tipe CFB. Pada setiap skenario, dilakukan perhitungan nilai SCC , biaya bahan bakar, dan emisi CO₂ untuk mengidentifikasi perubahan kinerja pembangkit akibat peningkatan

proporsi biomassa dalam campuran bahan bakar.

Hasil analisis *what-if* selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penyusunan model simulasi Monte Carlo untuk mengevaluasi pengaruh ketidakpastian parameter input terhadap hasil analisis [11].

2.5 Simulasi Monte Carlo

Untuk mengakomodasi ketidakpastian parameter input, penelitian ini menerapkan simulasi Monte Carlo sebagai pendekatan probabilistik. Metode ini memungkinkan evaluasi variasi hasil yang mungkin terjadi akibat perubahan parameter operasional yang tidak dapat direpresentasikan secara memadai melalui pendekatan deterministik tunggal [3][11].

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Oracle *Crystal Ball* dengan jumlah iterasi sebanyak 10.000 kali. Variabel input, seperti pada Tabel 2.1, didefinisikan sebagai *assumption*, sedangkan hasil analisis berupa *Specific Coal Consumption* (SCC), biaya bahan bakar (*fuel cost*), dan emisi CO₂ (Tabel 2.2) didefinisikan sebagai *forecast* sesuai pendekatan simulasi Monte Carlo yang umum digunakan dalam analisis ketidakpastian sistem energi [12][13].

Melalui pendekatan ini, hasil analisis tidak hanya berupa nilai tunggal, tetapi juga distribusi probabilitas yang mencerminkan tingkat ketidakpastian dan risiko dalam implementasi co-firing biomassa. Dengan demikian, evaluasi kinerja pembangkit dapat dilakukan secara lebih komprehensif dibandingkan pendekatan deterministik konvensional.

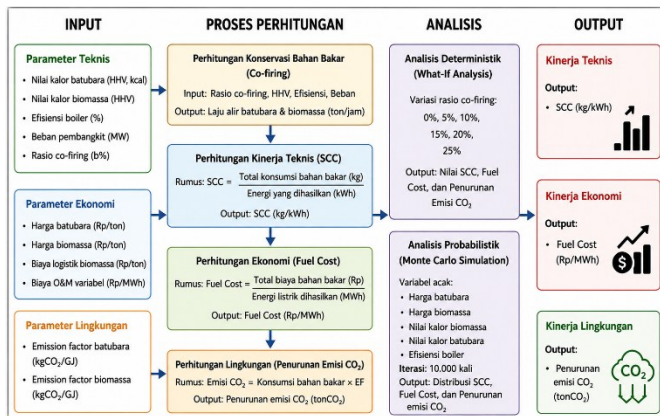
TABEL 2.1 PARAMETER INPUT SIMULASI MONTE CARLO

Parameter	Satuan	Variabel	Dasar Pemilihan
Nilai kalor batubara	Kcal/kg	Input	Mempengaruhi konsumsi bahan bakar dan SCC
Nilai kalor biomassa	kcal/kg	Input	Mempengaruhi SCC dan kebutuhan energi pembangkit
Harga batubara	Rp/ton	Input	Mempengaruhi biaya bahan bakar
Harga biomassa	Rp/ton	Input	Mempengaruhi biaya bahan bakar co-firing
Rasio co-firing	%	Input	Menentukan proporsi biomassa terhadap batubara

TABEL 2.2 PARAMETER OUTPUT SIMULASI MONTE CARLO

Parameter	Satuan	Variabel
Specific Coal Consumption (SCC)	Kg/kWh	Output
Fuel cost	Rp/MWh	Output
Emisi CO ₂	tonCO ₂	Output

Alur penelitian yang digunakan dalam studi ini ditunjukkan pada Gambar 2.1. Diagram tersebut menggambarkan hubungan antara parameter input, proses perhitungan, metode analisis, dan keluaran yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja teknis, ekonomi, dan lingkungan pada implementasi co-firing biomassa.

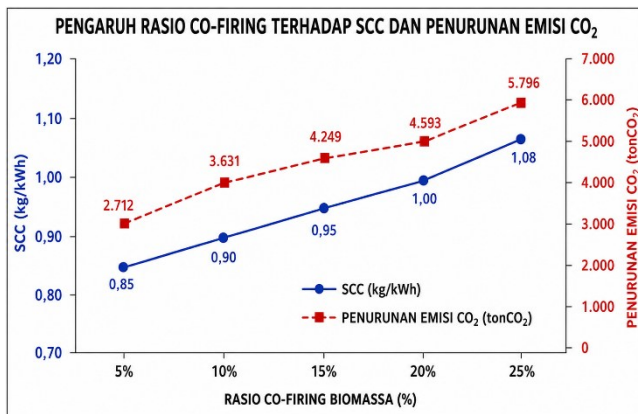


GAMBAR 2.1 DIAGRAM ALIR METODOLOGI PENELITIAN

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh Co-Firing terhadap Kinerja Teknis

Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan rasio co-firing biomassa memberikan pengaruh langsung terhadap kinerja teknis pembangkit yang direpresentasikan melalui parameter *Specific Coal Consumption* (SCC). Hubungan antara rasio co-firing, nilai SCC, dan penurunan emisi CO₂ ditunjukkan pada Gambar 3.1.

GAMBAR 3.1 PENGARUH CO-FIRING TERHADAP SCC DAN PENURUNAN CO₂

Berdasarkan Gambar 3.1, nilai SCC mengalami peningkatan seiring bertambahnya proporsi biomassa dalam campuran bahan bakar. Nilai SCC meningkat dari 0,85 kg/kWh pada rasio co-firing 5% menjadi 1,08 kg/kWh pada rasio 25%. Sebaliknya, penurunan emisi CO₂ menunjukkan kecenderungan meningkat dari 2.712 tonCO₂ menjadi 5.796 tonCO₂. Hasil tersebut menunjukkan adanya hubungan *trade-off* antara efisiensi penggunaan bahan bakar dan manfaat lingkungan yang diperoleh dari implementasi co-firing biomassa.

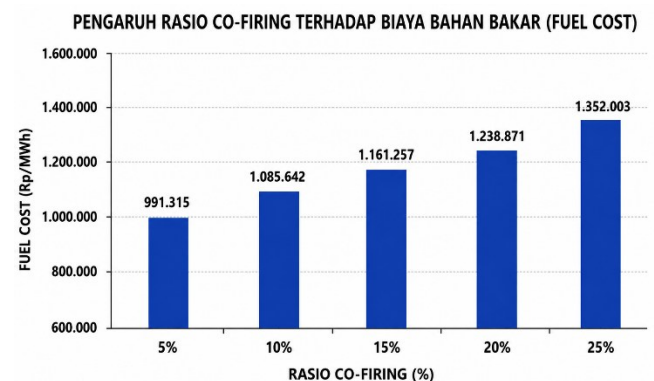
Kenaikan nilai SCC mengindikasikan meningkatnya kebutuhan bahan bakar untuk menghasilkan energi listrik dalam jumlah yang sama. Kondisi ini dipengaruhi oleh karakteristik biomassa woodchip yang memiliki nilai kalor lebih rendah dibandingkan batubara sehingga kandungan energi campuran bahan bakar menurun ketika proporsi biomassa ditingkatkan. Akibatnya, konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan untuk mempertahankan output pembangkit menjadi lebih besar. Temuan ini sejalan dengan penelitian Cahyo et al. yang melaporkan bahwa peningkatan rasio biomassa pada boiler tipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB) dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar akibat penurunan nilai kalor campuran bahan bakar [2].

Selain itu, karakteristik pembakaran pada boiler tipe CFB memungkinkan pemanfaatan biomassa dalam proporsi yang lebih tinggi dibandingkan boiler konvensional karena memiliki efisiensi perpindahan panas yang baik dan fleksibilitas terhadap variasi kualitas bahan bakar. Meskipun terjadi peningkatan SCC, nilai yang diperoleh masih berada dalam rentang operasi yang dapat diterima sehingga implementasi co-firing biomassa tetap layak dari aspek teknis. Hasil ini juga konsisten dengan kajian Liu et al. yang menunjukkan bahwa implementasi co-firing biomassa pada pembangkit berbahan bakar batubara umumnya menghasilkan peningkatan konsumsi bahan bakar spesifik, namun tetap memberikan manfaat lingkungan yang signifikan [5].

Secara keseluruhan, peningkatan rasio co-firing biomassa menyebabkan kenaikan nilai SCC akibat perbedaan karakteristik energi antara biomassa dan batubara. Meskipun demikian, seluruh skenario yang dianalisis masih berada dalam rentang operasi yang dapat diterima sehingga implementasi co-firing biomassa pada PLTU Bolok tetap layak dari aspek teknis. Hasil ini menunjukkan bahwa karakteristik boiler CFB mampu mengakomodasi variasi komposisi bahan bakar tanpa menyebabkan penurunan kinerja operasi yang signifikan.

3.2 Analisis Ekonomi dan Lingkungan

Hasil analisis pengaruh rasio co-firing biomassa terhadap biaya bahan bakar (*fuel cost*) ditunjukkan pada Gambar 3.2. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui dampak peningkatan proporsi biomassa terhadap biaya operasional pembangkit yang berasal dari konsumsi bahan bakar.



GAMBAR 3.2 PENGARUH RASIO CO-FIRING TERHADAP BIAYA BAHAN BAKAR (FUEL COST)

Berdasarkan Gambar 3.2, biaya bahan bakar menunjukkan tren meningkat seiring dengan kenaikan rasio co-firing biomassa. Nilai *fuel cost* meningkat dari Rp991.314,93 per MWh pada rasio co-firing 5% menjadi Rp1.352.002,53 per MWh pada rasio 25%, dengan nilai rata-rata sebesar Rp1.161.256,82 per MWh. Peningkatan ini terjadi karena harga biomassa yang digunakan dalam skenario penelitian relatif lebih tinggi dibandingkan biaya energi yang dihasilkan dari batubara, sehingga peningkatan proporsi biomassa secara langsung memengaruhi biaya bahan bakar pembangkit.

Meskipun demikian, kenaikan biaya yang terjadi masih berada dalam rentang yang dapat diterima apabila dibandingkan dengan manfaat lingkungan yang diperoleh. Pada rasio co-firing yang lebih tinggi, peningkatan biaya bahan bakar diikuti oleh penurunan emisi CO₂ yang semakin besar sebagaimana ditunjukkan pada Gambar

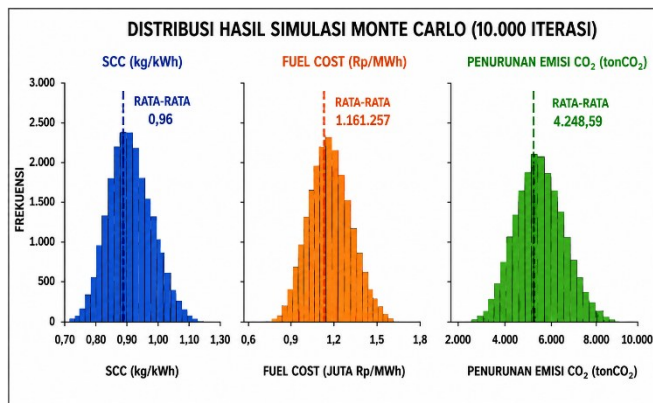
3.1. Hasil ini menunjukkan adanya hubungan antara aspek ekonomi dan lingkungan dalam implementasi co-firing biomassa.

Temuan penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian Yang et al. yang menunjukkan bahwa implementasi co-firing biomassa dapat meningkatkan biaya bahan bakar akibat perbedaan harga dan karakteristik bahan bakar, namun tetap memberikan manfaat lingkungan yang signifikan melalui pengurangan emisi karbon. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Zhang et al. yang menyatakan bahwa kelayakan ekonomi implementasi co-firing sangat dipengaruhi oleh harga biomassa dan rasio pencampuran yang digunakan. [6][7]

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa implementasi co-firing biomassa menghasilkan *trade-off* antara peningkatan biaya bahan bakar dan penurunan emisi CO₂. Oleh karena itu, penentuan rasio co-firing yang optimal menjadi faktor penting untuk memperoleh keseimbangan antara kinerja ekonomi dan manfaat lingkungan pada operasi pembangkit.

3.3 Analisis Ketidakpastian Menggunakan Monte Carlo

Hasil simulasi Monte Carlo terhadap parameter *Specific Coal Consumption* (SCC), biaya bahan bakar (*fuel cost*), dan penurunan emisi CO₂ ditunjukkan pada Gambar 3.3. Simulasi dilakukan sebanyak 10.000 iterasi untuk memperoleh distribusi probabilitas yang merepresentasikan variasi hasil akibat ketidakpastian parameter input.



GAMBAR 3.3 DISTRIBUSI HASIL SIMULASI MONTE CARLO (10.000 ITERASI)

Berdasarkan hasil simulasi, nilai SCC berada pada rentang 0,85–1,08 kg/kWh dengan nilai rata-rata sebesar 0,96 kg/kWh. Biaya bahan bakar berada pada rentang Rp991.314,93 hingga Rp1.352.002,53 per MWh dengan nilai rata-rata sebesar Rp1.161.256,82 per MWh. Sementara itu, penurunan emisi CO₂ berada pada rentang 2.711,85–5.796,49 tonCO₂ dengan nilai rata-rata sebesar 4.248,59 tonCO₂. Hasil ini menunjukkan bahwa implementasi co-firing biomassa menghasilkan rentang kinerja yang dipengaruhi oleh variasi parameter input sehingga evaluasi sistem menjadi lebih representatif dibandingkan pendekatan deterministik tunggal.

Distribusi hasil simulasi menunjukkan bahwa variabel ekonomi, khususnya harga biomassa, memberikan pengaruh yang lebih dominan terhadap variasi hasil dibandingkan variabel teknis dan lingkungan. Hal ini terlihat dari penyebaran nilai *fuel cost* yang lebih lebar dibandingkan distribusi emisi CO₂ yang relatif lebih stabil. Temuan ini sejalan dengan Yue et al. yang menyatakan bahwa ketidakpastian pada sistem energi sering kali dipengaruhi secara signifikan oleh variasi parameter ekonomi dan asumsi biaya

operasional.[3]

Selain nilai rata-rata, hasil simulasi juga menunjukkan distribusi probabilitas yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kepercayaan terhadap hasil analisis. Pada tingkat kepercayaan 90%, sebagian besar hasil simulasi masih berada dalam rentang operasional yang dapat diterima. Kondisi ini menunjukkan bahwa implementasi co-firing biomassa memiliki tingkat *robustness* yang cukup baik terhadap variasi parameter input. Hasil tersebut konsisten dengan van der Spek et al. yang menekankan pentingnya analisis ketidakpastian dalam evaluasi tekno-ekonomi untuk memperoleh hasil yang lebih andal dan realistis. [11]

Distribusi probabilitas yang relatif simetris menunjukkan bahwa model yang digunakan cukup representatif dalam menggambarkan kondisi sistem. Namun demikian, masih terdapat kemungkinan munculnya nilai ekstrem yang terutama dipengaruhi oleh kombinasi harga biomassa yang tinggi dan nilai kalor biomassa yang rendah. Oleh karena itu, simulasi Monte Carlo tidak hanya memberikan informasi nilai rata-rata, tetapi juga memberikan gambaran risiko yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan operasional. Temuan ini sejalan dengan Burney yang menunjukkan bahwa pendekatan Monte Carlo mampu meningkatkan pemahaman terhadap risiko dan variabilitas hasil pada sistem energi, serta mendukung proses pengambilan keputusan yang lebih adaptif terhadap ketidakpastian. [12]

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi co-firing biomassa pada PLTU Bolok memiliki tingkat ketidakpastian yang masih dapat diterima. Pendekatan probabilistik yang digunakan mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai peluang dan risiko dibandingkan pendekatan deterministik konvensional. Hasil ini mendukung temuan Çadircı yang menyatakan bahwa simulasi Monte Carlo merupakan alat yang efektif untuk mengevaluasi ketidakpastian pada sistem energi dan mendukung perencanaan strategi transisi energi yang lebih andal. [13]

3.4 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengidentifikasi parameter input yang memberikan pengaruh terbesar terhadap hasil simulasi Monte Carlo. Hasil analisis menunjukkan bahwa harga biomassa merupakan variabel yang paling dominan memengaruhi biaya bahan bakar (*fuel cost*), sedangkan nilai kalor biomassa memberikan pengaruh yang lebih signifikan terhadap perubahan nilai *Specific Coal Consumption* (SCC). Temuan ini menunjukkan bahwa aspek ekonomi dan karakteristik biomassa merupakan faktor utama yang menentukan keberhasilan implementasi co-firing biomassa pada PLTU.

Berdasarkan hasil simulasi, peningkatan harga biomassa secara langsung meningkatkan biaya bahan bakar pembangkit sehingga menjadi faktor yang paling sensitif dalam analisis ekonomi. Hasil ini sejalan dengan Zhang et al. yang menyatakan bahwa kelayakan ekonomi implementasi co-firing sangat dipengaruhi oleh harga biomassa dan proporsi pencampuran yang digunakan. Semakin tinggi harga biomassa, semakin besar risiko peningkatan biaya pembangkitan listrik. [7]

Pada aspek teknis, nilai kalor biomassa menjadi parameter yang paling berpengaruh terhadap nilai SCC. Biomassa dengan nilai kalor yang lebih tinggi mampu menghasilkan energi yang lebih besar per satuan massa sehingga kebutuhan bahan bakar dapat ditekan. Temuan ini konsisten dengan penelitian Pedişius et al. yang menunjukkan bahwa kualitas woodchip, khususnya nilai kalor

dan kadar air, merupakan faktor penting yang menentukan performa biomassa sebagai bahan bakar energi. [14]

Selain itu, Ghaffariyan menjelaskan bahwa kualitas biomassa menjadi salah satu parameter utama yang menentukan efisiensi pemanfaatan biomassa pada sistem pembangkitan energi. Variasi kualitas biomassa dapat menyebabkan perubahan signifikan terhadap konsumsi bahan bakar dan performa sistem pembakaran.[15]

Pada sistem boiler tipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB), pengaruh kualitas bahan bakar menjadi lebih penting karena karakteristik operasi boiler sangat dipengaruhi oleh stabilitas proses pembakaran. Wei et al. menunjukkan bahwa perubahan karakteristik bahan bakar dapat memengaruhi respons dinamis boiler CFB dan efisiensi operasi pembangkit.[7]

Hasil penelitian ini juga didukung oleh Chen et al. yang menemukan bahwa implementasi co-firing biomassa dapat mempertahankan stabilitas emisi dan efisiensi operasi apabila kualitas biomassa dan parameter operasional dapat dikendalikan dengan baik. Temuan serupa dilaporkan oleh Zhang dan Yu pada studi co-firing skala industri yang menunjukkan bahwa karakteristik biomassa dan rasio pencampuran merupakan faktor dominan yang memengaruhi performa boiler CFB.[16] [17]

Secara keseluruhan, hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa strategi optimalisasi implementasi co-firing biomassa perlu difokuskan pada pengelolaan rantai pasok biomassa yang efisien, pengendalian harga biomassa, serta pemilihan biomassa dengan kualitas energi yang baik. Dengan demikian, manfaat teknis, ekonomi, dan lingkungan dari implementasi co-firing biomassa dapat diperoleh secara lebih optimal.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis pengaruh implementasi co-firing biomassa woodchip pada PLTU Bolok tipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB) terhadap kinerja teknis, ekonomi, dan lingkungan menggunakan pendekatan deterministik dan probabilistik. Pendekatan deterministik dilakukan melalui analisis what-if pada berbagai rasio co-firing, sedangkan pendekatan probabilistik dilakukan menggunakan simulasi Monte Carlo untuk mengevaluasi pengaruh ketidakpastian parameter input terhadap hasil analisis.

Dari aspek teknis, peningkatan rasio co-firing biomassa menyebabkan nilai Specific Coal Consumption (SCC) meningkat dari 0,85 kg/kWh pada rasio 5% menjadi 1,08 kg/kWh pada rasio 25%. Kenaikan SCC menunjukkan bahwa peningkatan proporsi biomassa dalam campuran bahan bakar meningkatkan kebutuhan konsumsi bahan bakar untuk menghasilkan energi listrik yang sama. Hal ini dipengaruhi oleh nilai kalor biomassa yang lebih rendah dibandingkan batubara. Meskipun demikian, seluruh skenario yang dianalisis masih berada dalam rentang operasi yang dapat diterima sehingga implementasi co-firing biomassa pada PLTU Bolok tetap layak dari aspek teknis.

Dari aspek ekonomi, peningkatan rasio co-firing menyebabkan biaya bahan bakar meningkat dari Rp991.314,93/MWh menjadi Rp1.352.002,53/MWh dengan nilai rata-rata sebesar Rp1.161.256,82/MWh. Hasil ini menunjukkan bahwa harga biomassa menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi kelayakan ekonomi implementasi co-firing. Oleh karena itu, keberhasilan penerapan co-firing biomassa tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis pembangkit, tetapi juga dipengaruhi oleh pengelolaan rantai pasok dan stabilitas harga biomassa.

Dari aspek lingkungan, peningkatan rasio co-firing memberikan

manfaat berupa peningkatan penurunan emisi CO₂ dari 2.711,85 tonCO₂ pada rasio 5% menjadi 5.796,49 tonCO₂ pada rasio 25%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa substitusi sebagian batubara dengan biomassa mampu berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon pada sektor pembangkitan listrik serta mendukung upaya dekarbonisasi sistem ketenagalistrikan.

Hasil simulasi Monte Carlo dengan 10.000 iterasi menunjukkan bahwa implementasi co-firing biomassa masih memiliki tingkat ketidakpastian yang dapat diterima pada seluruh indikator yang dianalisis. Variabel harga biomassa dan nilai kalor biomassa teridentifikasi sebagai parameter yang paling berpengaruh terhadap variasi hasil simulasi. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan probabilistik mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai peluang dan risiko implementasi co-firing dibandingkan pendekatan deterministik konvensional.

Secara keseluruhan, implementasi co-firing biomassa pada PLTU Bolok tipe CFB mampu memberikan manfaat lingkungan yang signifikan dengan konsekuensi peningkatan konsumsi bahan bakar dan biaya operasi. Oleh karena itu, penentuan rasio co-firing yang optimal serta pengelolaan kualitas dan harga biomassa menjadi faktor penting untuk memperoleh keseimbangan antara kinerja teknis, ekonomi, dan lingkungan. Penelitian ini masih terbatas pada evaluasi biaya bahan bakar dan belum mempertimbangkan biaya investasi, biaya penanganan biomassa, serta aspek operasional jangka panjang sehingga dapat menjadi arah penelitian lanjutan pada implementasi co-firing biomassa di pembangkit listrik tenaga uap.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT PLN (Persero) dan pihak PLTU Bolok yang telah memberikan dukungan data dan informasi dalam pelaksanaan penelitian ini.

Referensi

- [1] Z. Arifin, V. F. S. Insani, M. Idris, K. R. Hadiyati, Z. Anugia, and D. Irianto, "Techno-Economic Analysis of Co-firing for Pulverized Coal Boilers Power Plant in Indonesia," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 12, no. 2, pp. 261–269, Mar. 2023, doi: 10.14710/ijred.2023.48102.
- [2] N. Cahyo et al., "A techno-economic and environmental analysis of co-firing implementation using coal and wood bark blend at circulating fluidized bed boiler," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 13, no. 4, pp. 726–735, Jul. 2024, doi: 10.61435/IJRED.2024.60234.
- [3] X. Yue, S. Pye, J. DeCarolis, F. G. N. Li, F. Rogan, and B. Gallachóir, "A review of approaches to uncertainty assessment in energy system optimization models," *Energy Strategy Reviews*, vol. 21, pp. 204–217, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.esr.2018.06.003.
- [4] D. Zhakupov, L. Kulmukanova, Y. Sarbassov, and D. Shah, "Flue gas analysis for biomass and coal co-firing in fluidized bed: process simulation and validation," *Int. J. Coal Sci. Technol.*, vol. 9, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1007/s40789-022-00531-y.
- [5] L. Liu et al., "Recent advances of research in coal and biomass co-firing for electricity and heat generation," Dec.

- [6] 01, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.cec.2023.100063.
- [7] B. Yang *et al.*, "Life cycle cost assessment of biomass co-firing power plants with CO₂ capture and storage considering multiple incentives," *Energy Econ.*, vol. 96, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.eneco.2021.105173.
- [8] Y. L. Zhang *et al.*, "Economic feasibility assessment of coal-biomass co-firing power generation technology," *Energy*, vol. 296, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131092.
- [9] T. Morató, M. Vaezi, and A. Kumar, "Techno-economic assessment of biomass combustion technologies to generate electricity in South America: A case study for Bolivia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 134, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110154.
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006 *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006. Accessed: Apr. 25, 2026. [Online]. Available: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
- [11] I. International Energy Agency, "CO₂ Emissions in 2023," 2024. Accessed: Apr. 24, 2026. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/33e2badc-b839-4c18-84ce-f6387b3c008f/CO2Emissionsin2023.pdf>
- [12] M. van der Spek *et al.*, "Uncertainty analysis in the techno-economic assessment of CO₂ capture and storage technologies. Critical review and guidelines for use," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 100, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ijggc.2020.103113.
- [13] S. M. A. Burney, *Monte Carlo Simulation for Energy Production in Renewable Systems*. Karachi: Department of Computer Science, UBIT, University of Karachi, 2025. Accessed: Apr. 04, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/390487204_Monte_Carlo_Simulation_for_Energy_Production_in_Renewable_Systems
- [14] M. S. Çadırcı, "Monte Carlo Simulations and Renewable Energy Scenarios: Dealing with Uncertainty Using Statistical Estimations," in *Proceedings of the International Conference on Statistics*, Avestia Publishing, Aug. 2025. doi: 10.11159/icsta25.134.
- [15] N. Pedišius, M. Praspaliauskas, J. Pedišius, and E. F. Dzenajavičienė, "Analysis of wood chip characteristics for energy production in lithuania," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 13, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14133931.
- [16] M. R. Ghaffariyan, "Identifying key quality characteristics of woody biomass for bioenergy application: an international review," *Silva Balcanica*, vol. 24, no. 3, pp. 77–94, Dec. 2023, doi: 10.3897/silvabalcanica.24.e114644.
- [17] T. Chen *et al.*, "Influence of papermaking biomass co-firing on operation energy efficiency and gas emission stability of a coal-fired thermal power plant: A case study," *Energy*, vol. 327, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.136484.
- [18] H. Zhang and C. Yu, "Experimental Study on Co-Firing of Coal and Biomass in Industrial-Scale Circulating Fluidized Bed Boilers," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 14, Jul. 2025, doi: 10.3390/en18143832.