



Simulasi Pengaruh Cofiring Biomassa Sawdust pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap terhadap Kinerja Sistem Pembakaran dan Efisiensi Boiler Menggunakan Aplikasi Simulasi *Gate Cycle*

Mohammad Willy Ginanjar

Universitas Diponegoro, Indonesia

Email: Willy.greata238152@gmail.com

Keywords:

Cofiring;
Fuel;
Modelling;
Simulation

Abstract

Coal-fired power plants still play an important role in fulfilling national electricity in the midst of the energy transition, despite facing challenges of fuel availability, coal quality, price, and environmental impact. As an effort to support the national energy mix and reduce emissions, the government encourages the implementation of biomass cofiring. This study aims to analyze the effect of sawdust biomass cofiring on the performance of the combustion system and boiler efficiency at PLTU Suralaya Unit 5. The research was conducted using a quantitative descriptive approach through off-design simulation modeling with GateCycle. The simulation evaluated four plant load scenarios, namely 378 MW, 432 MW, 486 MW, and 540 MW, with biomass blending compositions ranging from 0% to 10%. The main parameters analyzed were coal flow, total air flow, and boiler efficiency under varying fuel calorific values caused by the coal-biomass mixture. The results show that increasing the biomass proportion lowers the mixed fuel calorific value, which consequently increases coal flow and combustion air requirements while reducing boiler efficiency. At loads of 378 MW, 432 MW, and 486 MW, biomass cofiring up to 10% remains operationally feasible because coal flow stays below the pulverizer limit. However, at the maximum load of 540 MW, cofiring is not recommended because the required coal flow exceeds the design limit of 380 t/h, indicating the need for derating or higher fuel calorific quality. In conclusion, sawdust cofiring can be applied effectively at medium loads, but its implementation at full load requires operational limitations to maintain combustion stability and boiler performance.

Kata Kunci:

Cofiring;
Bahan Bakar;
Modelling;
Simulasi

Abstrak

PLTU berbahan bakar batubara masih berperan penting dalam pemenuhan listrik nasional di tengah transisi energi, meskipun menghadapi tantangan ketersediaan bahan bakar, kualitas batubara, harga, dan dampak lingkungan. Sebagai upaya mendukung bauran energi nasional dan penurunan emisi, pemerintah mendorong penerapan cofiring biomassa. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh cofiring biomassa jenis sawdust terhadap kinerja sistem pembakaran dan efisiensi boiler pada PLTU Suralaya Unit 5. Penelitian dilakukan dengan pendekatan deskriptif kuantitatif melalui simulasi permodelan off-design menggunakan aplikasi GateCycle. Simulasi dilakukan pada empat skenario beban pembangkit, yaitu 378 MW, 432 MW, 486 MW, dan 540 MW, dengan komposisi campuran biomassa sebesar 0% hingga 10%. Parameter utama yang dianalisis meliputi coal flow, total air flow, dan efisiensi boiler akibat perubahan nilai kalor campuran batubara

dan biomassa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan persentase biomassa menurunkan nilai kalor campuran bahan bakar, sehingga menyebabkan kenaikan kebutuhan coal flow dan udara pembakaran, serta menurunkan efisiensi boiler. Pada beban 378 MW, 432 MW, dan 486 MW, cofiring biomassa hingga 10% masih layak secara operasional karena coal flow tetap berada di bawah batas pulverizer. Namun, pada beban maksimum 540 MW, cofiring tidak direkomendasikan karena kebutuhan coal flow melampaui batas desain 380 ton/jam, sehingga memerlukan derating atau bahan bakar dengan nilai kalor lebih tinggi. Kesimpulannya, cofiring sawdust dapat diterapkan secara efektif pada beban menengah, tetapi pada beban penuh diperlukan pembatasan operasi agar kestabilan pembakaran dan kinerja boiler tetap terjaga.

PENDAHULUAN

Energi merupakan salah satu penggerak utama perkembangan ekonomi nasional yang berperan penting dalam peningkatan kualitas hidup manusia. Energi listrik merupakan hal yang sangat esensial dan memiliki peran yang sangat signifikan dalam memajukan di setiap aspek kebutuhan primer manusia. Kebutuhan energi listrik di Indonesia meningkat tinggi setiap tahunnya, seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk serta dengan berkembangnya industri nasional. Pertumbuhan listrik sampai dengan tahun 2030 direncanakan rata-rata sebesar 6,4% per tahun (RUPTL PLN 2021-2030).

Batu bara merupakan salah satu sumber energi yang masih digunakan dalam proses penyediaan tenaga listrik di Indonesia.

Berdasarkan dari gambar 1.1 dan Sumber data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM, 2022) Pembangkit Listrik Tenaga Uap berbahan bakar batu bara menyumbang sekitar 60% dari total kapasitas pembangkit listrik nasional. Hal ini memberikan kesimpulan bahwa pemenuhan kebutuhan listrik didapatkan mayoritas dari Pembangkit listrik tenaga uap yang menggunakan bahan bakar fosil, terutama batu bara.

Terdapat beberapa hal yang menjadikan PLTU batu bara masih menjadi tulang punggung dalam penyediaan listrik, yaitu penggunaan batu bara yang sangat murah dibandingkan dengan energi baru terbarukan (EBT) lainnya seperti angin, surya, biomass dan lainnya. Kebutuhan dana investasi untuk pembangunan PLTU relative lebih murah dibandingkan dengan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga (PLT) EBT lainnya, dan juga pada PLTU dapat dioperasikan secara kontinyu selama batu bara masih tersedia dibandingkan dengan PLT EBT yang terbilang beroperasi secara intermitern, sehingga membutuhkan energy storage untuk mengoptimalkan kontinyuitas suplay energi. Namun, ketergantungan yang besar terhadap PLTU batu bara menimbulkan permasalahan salah satunya masalah terhadap lingkungan.

PLTU batu bara merupakan salah satu penyumbang utama emisi gas rumah kaca di Indonesia. Studi yang dilaksanakan oleh Pertamina Energy Institute (2022) menunjukan bahwa pada sektor energi terutama PLTU batu bara, menyumbang sekitar 65% dari total emisi CO₂ nasional. Selain itu, pengoperasian PLTU batu bara juga berdampak pada kualitas udara dan Kesehatan masyarakat di sekitar pembangkit (Sanchez & Luan, 2018).

Transisi dari energi fosil menuju energi baru terbarukan tidak dapat dilakukan secara instan atau dalam jangka waktu yang relatif cepat, sehingga mengharuskan pemerintah untuk

tetap menggunakan PLTU batu bara sebagai sumber pembangkitan Listrik yang utama. Total kapasitas pembangkit PT PLN (Persero) pada tahun 2022 adalah sebesar 42.495,1 MW dengan prosentase masing masing pembangkit yaitu PLTU sebesar 36,85%, PLTU Mulut Tambang sebesar 1,69%, dan lainnya (ESDM, 2022).

Untuk mempertahankan keberlangsungan dan keberlanjutan dari operasional PLTU batu bara yang berdampak terhadap isu lingkungan, maka kementrian ESDM (Energy dan Sumber Daya Mineral) membuat peraturan Nomor 12 Tahun 2023 dimana permen tersebut mengatur pemanfaatan bahan bakar biomassa sebagai bahan bakar campuran pada PLTU. Peraturan ini dibuat untuk melakukan percepatan pencapaian target energi terbarukan dalam bauran energi nasional, menurunkan emisi gas rumah kaca dan mendorong ekonomi kerakyatan melalui peran serta masyarakat dalam penyediaan biomassa (ESDM, 2023).

Berdasarkan peraturan no 12 Tahun 2023 akan dilakukan penelitian pada pemanfaatan cofiring biomassa pembangkit Listrik Tenaga Uap, penelitian yang akan dilakukan meliputi jumlah biomassa yang dipakai dan efek terhadap kinerja sistem pembakaran pembangkit. Metode analisis yang dilakukan menggunakan bantuan aplikasi GateCycle.

Aplikasi Gatecycle dipilih sebagai bantuan dalam proses analisa penelitian, karena aplikasi ini dapat mensimulasikan dan mengevaluasi kinerja operasional dengan berbagai kondisi, termasuk dapat diintegrasikan dengan kondisi perubahan beban. Aplikasi ini dapat mensimulasikan kondisi operasi dengan kondisi operasi off-design.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengkaji penerapan cofiring biomassa pada PLTU. Andersen et al., (2000) menunjukkan bahwa cofiring batubara dengan biomassa dapat memengaruhi karakteristik pembakaran dan pembentukan deposit pada boiler. (Arifin et al., 2023) dalam studi techno-economic analysis menyatakan bahwa cofiring memiliki potensi yang signifikan dalam menurunkan emisi karbon, meskipun terdapat konsekuensi terhadap efisiensi sistem. Penelitian oleh (Alfarisyi et al., 2022) juga menunjukkan bahwa perubahan rasio udara–bahan bakar sangat berpengaruh terhadap kinerja pembakaran dan efisiensi boiler pada PLTU. Selain itu, (Liu et al., 2023) menegaskan bahwa integrasi biomassa dalam sistem pembangkit konvensional dapat meningkatkan keberlanjutan energi, tetapi memerlukan optimasi operasional untuk menjaga stabilitas sistem.

Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan, sebagian besar studi masih berfokus pada aspek lingkungan atau ekonomi, sementara kajian yang mengintegrasikan analisis teknis parameter operasi seperti coal flow, air flow, dan efisiensi boiler secara simultan masih terbatas, khususnya pada kondisi operasi off-design dengan variasi beban pembangkit. Selain itu, penelitian berbasis simulasi menggunakan perangkat lunak seperti GateCycle untuk mengevaluasi kinerja cofiring pada kondisi aktual PLTU di Indonesia masih relatif sedikit dilakukan.

Pada penelitian ini dilaksanakan di PLTU Suralaya Unit 5 yang berlokasi di Cilegon, Banten. Implementasi cofiring dilakukan dengan cara mencampurkan batubara dengan biomassa jenis Sawdust atau serbuk kayu. Batu bara dan biomassa dicampurkan pada area coal yard atau stok area dimana pada area tersebut penerimaan batubara dan penerimaan biomassa dilakukan clusterisasi untuk mengoptimalkan nilai kalor campurannya. Terkait penempatan bahan bakar pada area coal yard disesuaikan dengan nilai kalor penerimaan bahan bakar, pada penelitian ini diambil sampel dengan nilai kalor bahan bakar yang sama pada setiap cluster penempatan bahan bakar untuk dianalisa lebih dalam, bahan bakar yang

dipakai untuk dianalisa pada penelitian ini adalah Batubara yang bersumber dari PT Adaro Indonesia dengan nilai kalor 4.653 kcal/kg dan biomassa lokal jenis sawdust atau serbuk kayu dengan kalori rendah yaitu rata rata 2.988 kcal/kg.

Penelitian ini dilaksanakan dengan empat skenario, yaitu disimulasikan pada beban operasi 378 MW, 432 MW, 486 MW dan 540 MW untuk menganalisis secara kuantitatif pengaruh biomassa sebesar 0% hingga 10% terhadap kinerja sistem pembakaran dan efisiensi termal boiler, sehingga dapat mengetahui kesiapan operasi pembangkit ketika program cofiring sedang berlangsung. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan dasar dalam optimalisasi strategi cofiring pada unit-unit PLTU subkritis di Indonesia umumnya, dan khususnya di PLTU Suralaya sendiri, hal ini bertujuan untuk menjaga efisiensi dan stabilitas kesiapan operasi pembangkit.

Berdasarkan pemaparan latar belakang, penelitian ini merumuskan beberapa pertanyaan utama yang meliputi pengaruh penambahan biomassa sebesar 0%–10% terhadap laju alir bahan bakar (coal flow) pada berbagai tingkat beban operasi, yaitu 378 MW, 432 MW, 486 MW, dan 540 MW, serta pengaruh peningkatan coal flow terhadap kebutuhan udara pembakaran total (air flow) dan distribusinya antara primary air dan secondary air pada berbagai persentase cofiring. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji dampak cofiring biomassa terhadap penurunan efisiensi boiler pada berbagai tingkat pembebanan unit PLTU Suralaya Unit 5, serta menentukan kondisi optimal dan batas aman komposisi biomassa yang dapat diterapkan tanpa melampaui batas desain sistem bahan bakar dan udara. Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis perubahan laju alir bahan bakar akibat penambahan biomassa, menentukan pengaruh perubahan nilai kalor campuran terhadap kebutuhan dan distribusi udara pembakaran, menghitung penurunan efisiensi boiler melalui simulasi Gatecycle, serta mengidentifikasi komposisi biomassa yang optimal secara termal dan operasional. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam pengembangan kajian termodinamika sistem pembakaran batubara dan biomassa pada PLTU subkritikal di Indonesia, menjadi referensi ilmiah dalam analisis efisiensi termal, serta menjadi bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan operasional PLTU Suralaya untuk mendukung program cofiring. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan menyediakan informasi teknis terkait strategi peningkatan efisiensi operasi, seperti optimasi rasio udara dan bahan bakar, pengendalian excess air, serta manajemen kualitas bahan bakar campuran, sekaligus mendorong penerapan pembangkitan energi yang lebih ramah lingkungan melalui penurunan emisi karbon dan pemanfaatan biomassa lokal.

METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang akan dilakukan adalah penelitian deskriptif dengan pendekatan kuantitatif melalui permodelan dan simulasi. Untuk mengetahui performance pembangkit, salah satu hal yang bisa dilakukan tanpa harus melakukan pengujian adalah dengan membuat suatu simulasi permodelan. Terdapat beberapa software yang dapat digunakan sebagai tool dalam pembuatan simulasi pembangkit thermal seperti Cycle Tempo, Thermoflow, GateCycle, DWSim, Aspen Hysys, dll. Untuk penelitian ini akan menggunakan Gate Cycle karena cenderung lebih detail dan cocok digunakan untuk sistem pembangkit thermal. Simulasi yang akan dilakukan adalah dengan membuat permodelan PLTU Suralaya Unit 5

berdasarkan data heat balance dan data eksisting pada saat cofiring berlangsung. Simulasi dilakukan secara off-design menyesuaikan dengan data yang sudah diperoleh dan jumlah equipment yang digambarkan dalam permodelan menyesuaikan dengan jumlah real yang ada di lapangan.

Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini akan berfokus pada analisis operasi pada saat cofiring berlangsung di PLTU Suralaya Unit 5, dimana akan dilakukan simulasi berdasarkan prosentasi biomassa yang digunakan, sehingga didapatkan strategi dalam optimasi pengoperasian pada saat cofiring berlangsung.

Penelitian ini memiliki batasan sebagai berikut :

- 1) Fokus pada penelitian ini hanya pada satu PLTU, yaitu PLTU Suralaya Unit 5.
- 2) Simulasi dilakukan dengan 4 skenario pada empat titik beban operasi, yaitu 378 MW, 432 MW, 486 MW, 540 MW dengan kondisi operasi steady state atau beban konstan.
- 3) Komposisi biomassa yang dianalisa berada pada rentang persentase 0% hingga 10%. Dengan nilai kalor biomassa diambil dari hasil pengujian aktual sebesar 2988 kcal/kg.
- 4) Proses pembakaran diasumsikan homogen dan sempurna dengan rasio udara bahan bakar melalui excess air yang bervariasi dari 20% hingga 24%.
- 5) Distribusi udara pembakaran dibatasi dengan perbandingan tetap antara primary air 25% dan secondary air 75% sesuai dengan konfigurasi design boiler PLTU Suralaya.

Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data primer dan data sekunder. Dimana untuk data primer diperoleh dari arsip operator dan melakukan wawancara secara mendalam kepada operator control room PLTU Suralaya Unit 5 dengan data yang dibutuhkan dalam penelitian ini diantaranya :

- 1) Data kualitas batu bara
- 2) Data kualitas biomassa
- 3) Data Human Machine Interface (HMI) DCS PLTU Suralaya Unit 5
- 4) Data eksisting unit 5 PLTU Suralaya

Selain itu, dalam penelitian ini juga menggunakan data sekunder sebagai pendukung penelitian. Sumber data sekunder berasal dari laporan operator kimia, operator coal handling, serta publikasi ilmiah.

Teknik Pengumpulan Data

Berikut adalah Teknik pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini :

1. Data Primer

Wawancara : Wawancara digunakan untuk mendapatkan data yang lebih mendalam terkait historis peralatan, kondisi pengoperasian, kegiatan cofiring, skema coal blending, sampai dengan kondisi kinerja unit saat cofiring berlangsung.

2. Data Sekunder

Data laporan operator kimia dan coal handling : data yang dikumpulkan dari operator kimia dan coal handling adalah data hasil uji lab bahan bakar cofiring sebelum masuk ke dalam bunker, sedangkan untuk operator coal handling adalah data laporan kegiatan coal blending batu bara dengan biomassa.

Publikasi ilmiah : publikasi ilmiah digunakan untuk pengumpulan data tentang penelitian sebelumnya yang relevan dan dapat dijadikan referensi untuk penelitian ini.

Data kualitatif dikumpulkan melalui studi literatur dan adjustment oleh ahli yang memiliki kapabilitas dan pengetahuan dalam program cofiring Pembangkit Listrik Tenaga Uap untuk menilai risiko-risiko terkait yang selanjutnya akan dilakukan permodelan dan simulasi menggunakan bantuan aplikasi Gate Cycle.

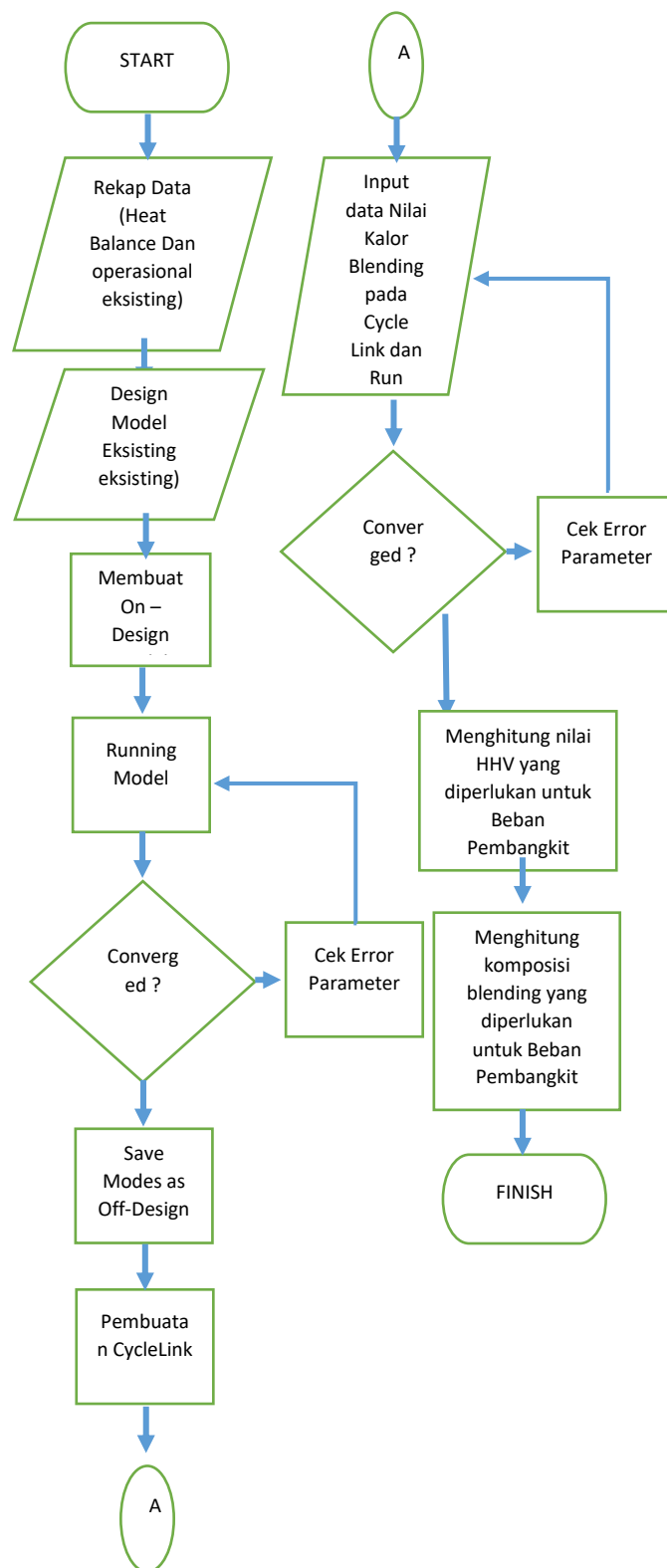
Kerangka Pikir Penelitian

Penelitian ini dimulai karena adanya isu strategis nasional dimana diharuskan melaksanakan transisi energi dan pengurangan emisi karbon, PT PLN (Persero) menerapkan program cofiring biomassa pada PLTU sebagai langkah bauran energi baru terbarukan (EBT) sebesar 23%.

PLTU Suralaya Unit 5 dipilih sebagai objek studi kasus, karena merupakan unit besar yang dapat dilakukan uji coba cofiring biomassa pada rentang campuran 0-10% tanpa melakukan modifikasi besar pada sistem pembakaran. Pada sisi teknik pencampuran biomassa yang mempunyai nilai kalor rendah dengan batubara yang lebih besar nilai kalornya dapat menyebabkan penurunan nilai kalor campuran yang berimplikasi pada peningkatan laju alir bahan bakar(coal flow), kenaikan kebutuhan udara pembakaran (air flow), dan penurunan efisiensi boiler.

Sehingga penelitian ini dilaksanakan berdasarkan 5 (lima) tahapan utama, yaitu Persiapan dan mengidentifikasi masalah dan tujuan, menyusun permodelan pada aplikasi Gate Cycle, pengujian data, evaluasi permodelan dengan dilakukan simulasi pada aplikasi Gate Cycle, serta kesimpulan dan rekomendasi.

Kerangka pikir penelitian menggunakan aplikasi Gate Cycle dapat disajikan pada Gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Kerangka Pikir Penelitian
Sumber: Hasil olahan peneliti, 2025

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bahan bakar yang digunakan dalam proses permodelan dan simulasi ini sudah dalam keadaan blending antara batu bara dan biomass, untuk jenis Batubara yang digunakan Adalah jenis Batubara Medium Range Coal (MRC) dengan rata rata nilai kalori 4653 kkal/kg sesuai dengan hasil sampling dan analisis As-Received Basis (ARB), sedangkan untuk biomass mempunyai nilai kalor rata rata 2988 kkal/kg dengan spesifikasi bahan bakar masing masing dapat terlihat seperti pada tabel 1 dan 2 dibawah ini. Setelah diketahui spesifikasi bahan bakar selanjutnya dibuat 10 skenario blending di area coal yard dengan komposisi biomass mulai dari 1% hingga 10% terhadap total bahan bakar yang dibakar di boiler.

Tabel 1. Spesifikasi Bahan Bakar

Ultimate Analysis Component	Coal (% Weight)	Biomass (% Weight)
Carbon	49.45	29.54
Hydrogen	3.64	3.54
Oxygen	14.24	25.40
Nitrogen	0.88	0.30
Sulfur	0.10	0.00
Ash	2.27	0.30
TM	29.42	40.92
HHV (kkal/kg)	4653	2988

Sumber: Data hasil pengujian laboratorium PLTU Suralaya Unit 5, 2025

Tabel 2. Spesifikasi Biomass

Bahan Bakar	Nilai Kalor (kkal/kg)	Ultimate Analysis (%Weight)			
		TM	Retained mesh 5mm	Retained mesh 2.38mm	Passing mesh 2.38mm
Biomass	2988	40.92	11.67	30.33	69.67

Sumber: Data operator coal handling PLTU Suralaya Unit 5, 2025

Dalam proses simulasi dari permodelan yang sudah dilakukan, selanjutnya dicari data karakteristik bahan bakar sesuai dengan hasil skenario blending dengan menggunakan persamaan prinsip dasar mass balance dimana setiap properti yang bersifat intensif linier dapat dihitung dari rata rata berbobot massa masing masing bahan, maka dapat dilihat pada persamaan 1 berikut:

$$\text{Material Properti} = \frac{(\text{Massa1} \times \text{Properti}) + (\text{Massa2} \times \text{Properti 2})}{\text{Massa total}} \quad (\text{Persamaan 1})$$

Karena massa total = massa 1 + massa 2 maka :

Fraksi massa bahan 1 (Batubara) = 1- x

Fraksi massa bahan 2 (biomassa) = x

$$\text{Maka: } P_{blend} = (1-x) P_{coal} + xP_{bio} \quad (\text{Persamaan 2})$$

berikut data spesifikasi dari scenario blending dapat dilihat pada table 3

Tabel 3. Spesifikasi Skenario Hasil Blending

Biomass (%)	x (fraction)	C	H	O	N	S	Ash	TM	HHV (kkal/kg)
1	1.00%	49.25	3.64	14.35	0.87	0.10	2.25	29.54	4636
2	2.00%	49.05	3.64	14.46	0.87	0.10	2.23	29.65	4620
3	3.00%	48.85	3.64	14.57	0.86	0.10	2.21	29.77	4603
4	4.00%	48.65	3.64	14.69	0.86	0.10	2.19	29.88	4586

Biomass (%)	x (fraction)	C	H	O	N	S	Ash	TM	HHV (kkal/kg)
5	5.00%	48.45	3.64	14.80	0.85	0.10	2.17	30.00	4570
6	6.00%	48.26	3.63	14.91	0.85	0.09	2.15	30.11	4553
7	7.00%	48.06	3.63	15.02	0.84	0.09	2.13	30.23	4536
8	8.00%	47.86	3.63	15.13	0.83	0.09	2.11	30.34	4520
9	9.00%	47.66	3.63	15.24	0.83	0.09	2.09	30.46	4503
10	10.00%	47.46	3.63	15.36	0.82	0.09	2.07	30.57	4487

Sumber: Hasil perhitungan peneliti berdasarkan persamaan mass balance

Coal Flow

Bahan bakar yang digunakan dalam simulasi yang dilakukan sudah menggunakan bahan bakar campuran antara Batubara dan biomassa. Dengan adanya perbedaan terkait nilai kalor dan kandungan lain nya pada bahan bakar tersebut tentunya akan sangat mempengaruhi juga parameter operasi dan pengoperasian pada unit. Salah satunya yang dapat mempengaruhi parameter unit adalah konsumsi bahan bakar yang meningkat (*coal flow increase*). Simulasi yang dilakukan adalah mencampur bahan bakar batu bara dengan biomassa sesuai dengan skenario yang sudah di rencanakan. Berikut dapat dilihat pada grafik 4.1 terkait pengaruh komposisi biomassa pada parameter coal flow.

Pada setiap tabel yang dibuat diperlukan mencari nilai HHV campuran pada setiap skenario, untuk mencari nilai tersebut mnegggunakan energi kontran yang sudah di turunkan sebagai berikut :

$$m_{coal,mix} = m_{coal(\%)} \times \frac{HHV_{Coal}}{HHV_{mix}} \quad (Persamaan 3)$$

dimana : $m_{coal(\%)}$ = Total Coal flow pada scenario beban

HHV_{coal} = 4653 kkal/kg

$HHV_{biomassa}$ = 2988 kkal/kg

Nilai kalor campuran :

$$HHV_{mix} = (1 - \chi) \cdot HHV_{coal} + \chi \cdot HHV_{biomassa} \quad (Persamaan 4)$$

Dengan χ = fraksi biomassa (0,00 sampai 0,10)

Perubahan Coal Flow Pada Skenario 1

Tabel 4. Kenaikan Coal Flow Pada Beban 70%

Blending Biomassa (%)	HHV Campuran (kkal/kg)	Coal Flow (t/jam)	Coal Flow Terbatas (t/jam, max 380)	Kenaikan (%)
0	4653	266	266	0
1	4636.4	267	267	0.38
2	4619.8	268	268	0.76
3	4603.2	269.1	269.1	1.15
4	4586.6	270.2	270.2	1.58
5	4570	271.2	271.2	1.96
6	4553.4	272.3	272.3	2.37
7	4536.8	273.4	273.4	2.79
8	4520.2	274.5	274.5	3.2
9	4503.6	275.7	275.7	3.64
10	4487	276.8	276.8	4.06

Sumber: Hasil simulasi GateCycle, 2025

Dari hasil simulasi yang dilakukan terlihat bahwa pada beban 70% atau 378 MW dengan penambahan biomassa maksimum 10% hanya menaikkan coal flow dari 266 t/jam ke 277 t/jam atau naik sekitar 4,06%. Hal ini terjadi dikarenakan pada saat dilakukan penambahan biomassa menyebabkan penurunan nilai kalor campuran dari 4653 kcal/kg menjadi 4481 kcal/kg, untuk mempertahankan beban yang sama agar energi total yang masuk ke boiler tetap maka coal flow perlu dinaikan. Kenaikan coal flow pada scenario 1 masih jauh di bawah batas maksimum operasi coal flow sebesar 380 t/jam. Dengan demikian, kapasitas coal feeder dan mill (pulverizer) pada saat cofiring berlangsung dengan persentase maksimal 10% secara teknis masih feasible.

Perubahan Coal Flow Pada Skenario 2

Tabel 5. Kenaikan Coal Flow Pada Beban 80%

Biomassa (%)	HHV Campuran (kcal/kg)	Coal Flow (t/jam)	Coal Flow Terbatas (t/jam, max 380)	Kenaikan (%)
0	4653	304	304	0
1	4636	305.1	305.1	0.36
2	4619	306.3	306.3	0.74
3	4601	307.5	307.5	1.15
4	4584	308.7	308.7	1.56
5	4567	309.9	309.9	1.94
6	4550	311.1	311.1	2.33
7	4533	312.4	312.4	2.76
8	4515	313.7	313.7	3.19
9	4498	315	315	3.62
10	4481	316.3	316.3	4.03

Sumber: Hasil simulasi menggunakan aplikasi GateCycle

Dari simulasi yang dilakukan pada beban 432MW atau pada beban 80%, terlihat pada grafik di atas bahwa kenaikan coal flow akibat penurunan nilai kalor karena campuran biomassa sebagai fungsi persen biomassa tetap berada di bawah batas operasional pembangkit PLTU Suralaya unit 5 yaitu sebesar 380 t/jam. Hal ini menunjukkan bahwa secara kapasitas mekanis penyuplai Batubara dalam hal ini mill/pulverizer, cofiring biomassa sebagai campuran sampai dengan persentase 10% masih feasible.

Perubahan Coal Flow Pada Skenario 3

Tabel 6. Kenaikan Coal Flow Pada Beban 90%

Biomassa (%)	HHV Campuran (kcal/kg)	Coal Flow (t/jam)	Coal Flow Terbatas (t/jam, max 380)	Kenaikan (%)
0	4653	342	342,0	0,00
1	4636	343.2	343,2	0,36
2	4620	344.5	344,5	0,74
3	4603	345.7	345,7	1,08
4	4586	347	347,0	1,46
5	4569	348.2	348,2	1,82

Biomassa (%)	HHV Campuran (kcal/kg)	Coal Flow (t/jam)	Coal Flow Terbatas (t/jam, max 380)	Kenaikan (%)
6	4553	349.5	349,5	2,19
7	4536	350.8	350,8	2,57
8	4520	352.1	352,1	2,97
9	4503	353.4	353,4	3,33
10	4487	354.7	354,7	3,71

Sumber: Hasil simulasi menggunakan aplikasi GateCycle

Pada scenario 3 dengan beban 486 MW atau sekitar 90% beban, hasil simulasi yang sudah dilakukan disimpulkan bahwa adanya kenaikan coal flow secara linier hingga 3,7% pada campuran biomassa 10%. Kenaikan ini masih di batas bawah maksimum system pulverizer yaitu sebesar 380t/jam, ehingga kalua dilihat dari sisi mekanis operasi masih dalam batas aman dan dapat dijalankan tanpa melakukan modifikasi pada system pengumpan bahan bakar.

Perubahan Coal Flow Pada Skenario 4

Tabel 7. Nilai Keperluan Coal Flow Beban 100%

Biomassa (%)	HHV Campuran (kcal/kg)	Coal Flow (t/jam)	Coal Flow Terbatas (t/jam, max 380)
0	4653	380	380
1	4636	381.4	380
2	4620	382.7	380
3	4603	384.1	380
4	4586	385.5	380
5	4569	387	380
6	4553	388.4	380
7	4536	390	380
8	4520	391.2	380
9	4503	392.7	380
10	4487	394.1	380

Sumber: Hasil simulasi menggunakan aplikasi GateCycle

Pada hasil simulasi di atas terlihat bahwa semakin tinggi kenaikan persentase campuran biomassa, maka semakin besar juga kebutuhan coal flow untuk menghasilkan beban generator, dalam hal ini beban yang dimasukan Adalah beban maksimum PLTU Suralaya Unit 5 yaitu 540MW. Hal ini terjadi dikarenakan adanya penurunan nilai kalor ketika cofiring berlangsung, nilai kalor tersebut berpengaruh terhadap energi input yang masuk ke dalam boiler yang akan semakin berkurang. Setiap persentase dengan pembebanan yang sama memiliki Tingkat kenaikan coal flow yang berbeda tergantung dari berapa banyak persentase biomass yang akan di campur dengan Batubara sebelum dimasukan ke dalam boiler.

Pada beban 540 MW atau pada beban maksimum 100% dengan nilai kalor Batubara 4654 kcal/kg dan biomassa 2988 kcal/kg, coal flow sudah menyentuh batas maksimum yaitu 380 t/jam, artinya dengan tidak adanya kenaikan nilai kalor/ NK tetap dengan output beban 540 MW,hal ini akan mendorong kenaikan coal flow seiring kenaikan persentase biomassa, apabila tetap dipertahankan, secara operasional pembangkit perlu derating (menurunkan beban) atau dilakukan perubahan kualitas HHV bahan bakar.

Perubahan Total Air Flow

Combustion air adalah udara yang di suplai ke boiler oleh force draught fan (FDF) untuk proses pembakaran. Besaran nilai combustion air flow Adalah total flow primary air (PAF) yang disuplai berbarengan dengan bahan bakar melalui mill (pulverizer) dan secondary air yang disuplay langsung ke dalam boiler oleh force draught fan. Penambahan biomassa pada campuran bahan bakar batu bara akan menimbulkan perubahan nilai combustion air flow yang dibutuhkan karena adanya perubahan komposisi bahan bakar yang masuk ke dalam boiler. Berikut adalah perubahan nilai combustion air flow terhadap komposisi persentase campuran biomassa disesuaikan dengan scenario yang telah direncanakan.

Perubahan Total Air Flow Pada Skenario 1

Pada bahan bakar dengan daya yang sudah kita dapatkan dari COA actual Dimana udara teoritisnya Adalah 8,28 kg udara/kg Batubara, excess air operasi PLTU Suralaya unit 5 sebesar 20% dengan kenaikan hingga 24% seiring dengan kenaikan biomassa 10%, artinya air fuel ratio actual $8,28 \times 1,20 = 9,94$ kg udara/kg Batubara di 0% biomassa kemudian seiring dengan kenaikan campuran biomassa hingga 10% maka AFR naik menjadi $8,28 \times 1,24 = 10,27$ kg udara/kg Batubara. Berikut tabel dan grafik nilai AFR yang diperlukan pada beban scenario 1.

Tabel 8. Nilai Keperluan Total Air Flow Beban 70%

Blending Biomassa (%)	Coal Flow (t/jam)	Excess Air (fraksi)	AFR Aktual (kg udara/kg fuel)	Total Air Flow (t/jam)	Primary Air Flow (t/jam)	Secondary Air Flow (t/jam)
0	266	0.2	9.94	2644	661	1983
1	267	0.204	9.97	2661	665	1996
2	268	0.208	10.01	2681	670	2011
3	269.1	0.212	10.04	2704	676	2028
4	270.2	0.216	10.08	2727	682	2045
5	271.2	0.22	10.11	2745	686	2059
6	272.3	0.224	10.15	2765	691	2074
7	273.4	0.228	10.19	2786	697	2089
8	274.5	0.232	10.22	2807	702	2105
9	275.7	0.236	10.26	2829	707	2122
10	276.8	0.24	10.27	2842	711	2132

Sumber: Hasil simulasi menggunakan aplikasi GateCycle

Dari simulasi yang sudah dilakukan terlihat pada grafik di atas bahwa dengan naiknya persentase biomassa akan menaikkan juga kebutuhan udara pembakaran, hal ini terjadi dikarenakan :

- Massa bahan bakar total per jam meningkat untuk menggantikan nilai kalor biomassa yang lebih rendah
- Operator akan menaikkan excess air untuk menjaga kestabilan pembakaran, hal ini dilakukan untuk menghindari pembakaran yang tidak sempurna

Pada grafik kenaikan primary air flow an secondari air flow memiliki rasio 25%:75%, sehingga total sir flow ini terbagi menjadi kenaikan laju primary dari 661t/jam menjadi 711 t/jam, dan kenaikan secondary air flow dari 1983 t/jam menjadi 2132 t/jam. Kenaikan pada primary air fan tersebut menggambarkan bahwa semakin banyak bahan bakar harus diangkut menuju ruang bakar, maka semakin banyak udara primary yang dibutuhkan. Sedangkan pada grafik kenaikan secondary air flow diperlukan untuk menjamin pencampuran udara dengan bahan bakar ketika di ruang bakar tetap homogen.

Perubahan Total Air Flow Pada Skenario 2

Tabel 9. Nilai Keperluan Total Air Flow Beban 80%

Biomassa (%)	Coal Flow (t/jam)	Excess Air (fraksi)	AFR Aktual (kg udara/kg fuel)	Total Air Flow (t/jam)	Primary Air Flow (t/jam)	Secondary Air Flow (t/jam)
0	304	0.2	9.94	3022	756	2266
1	305.1	0.204	9.97	3041	760	2281
2	306.3	0.208	10.01	3064	766	2298
3	307.5	0.212	10.04	3088	772	2316
4	308.7	0.216	10.08	3112	778	2334
5	309.9	0.22	10.11	3131	783	2348
6	311.1	0.224	10.15	3155	789	2366
7	312.4	0.228	10.19	3180	795	2385
8	313.7	0.232	10.22	3205	801	2404
9	315	0.236	10.26	3232	808	2424
10	316.3	0.24	10.27	3248	812	2436

Sumber: Hasil simulasi menggunakan aplikasi GateCycle

Pada simulasi yang sudah dilakukan pada beban 432 MW, persentase penambahan biomassa hingga 10% menyebabkan peningkatan kebutuhan total udara pembakaran sekitar 7% hingga 8%. Hal ini terjadi seiring dengan meningkatnya laju bahan bakar dan peningkatan excess air dari 20% ke 24%, hal ini tetap dilakukan oleh operator dikarenakan untuk menjaga kestabilan proses pembakaran di dalam ruang bakar.

Perubahan Total Air Flow Pada Skenario 3

Tabel 10. Nilai Keperluan Total Air Flow Beban 90%

Biomassa (%)	Coal Flow (t/jam)	Excess Air (fraksi)	AFR Aktual (kg udara/kg fuel)	Total Air Flow (t/jam)	Primary Air Flow (t/jam)	Secondary Air Flow (t/jam)
0	342	0.2	9.94	3.400	850	2550
1	343.2	0.204	9.97	3.422	856	2566
2	344.5	0.208	10.01	3.448	862	2586
3	345.7	0.212	10.04	3.471	868	2603
4	347	0.216	10.08	3.498	875	2623
5	348.2	0.22	10.11	3.52	880	2640
6	349.5	0.224	10.15	3.547	887	2660
7	350.8	0.228	10.19	3.575	894	2681
8	352.1	0.232	10.22	3.599	900	2699
9	353.4	0.236	10.26	3.626	907	2719
10	354.7	0.24	10.27	3.643	911	2732

Sumber: Hasil simulasi menggunakan aplikasi GateCycle

Pada kebutuhan udara dihitung dengan rasio udara-bahan bakar atau air fuel ratio berdasarkan COA Batubara adaro Agustus 2025 dimana udara teoritis nya sebesar 8,28 kgudara/kgbahanbakar. Dengan nilai excess air sebesar 20% pada persentase biomassa 0% (AFR=9,94) dan 24% pada persentase biomassa 10% (AFR=10,27), sehingga total air flow naik dari 3400 t/jam menjadi 3640 t/jam atau sekitar 7% kenaikan.

Kenaikan tersebut untuk tetap meningkatkan stabilitas nyala serta menjamin pembakaran volatile biomassa, sehingga distribusi udara dipertahankan pada rasio 25% dan 75% karena perubahan komposisi campuran belum signifikan terhadap karakteristik nyala.

Perubahan Total Air Flow Pada Skenario 4

Tabel 11. Nilai Keperluan Total Air Flow Beban 100%

Biomassa (%)	Coal Flow (t/jam)	AFR Aktual (kg udara/kg fuel)	Total Air Flow (t/jam)	Primary Air Flow (t/jam)	Secondary Air Flow (t/jam)
0	380,0	9,94	3777	944	2833
1	381,4	9,97	3802	951	2852
2	382,7	10,01	3831	958	2873
3	384,1	10,04	3857	964	2893
4	385,5	10,08	3886	972	2915
5	387,0	10,11	3913	978	2935
6	388,4	10,15	3942	985	2957
7	390,0	10,19	3974	994	2980
8	391,2	10,22	3998	1000	2998
9	392,7	10,26	4029	1007	3022
10	394,1	10,27	4045	1011	3034

Sumber: Hasil simulasi menggunakan aplikasi GateCycle

Efisiensi Boiler

Pada penelitian ini, penggunaan biomassa sebagai campuran bahan bakar pada boiler akan berdampak terhadap nilai efisiensi boiler. Komposisi campuran biomassa yang diantara salah satunya memiliki kandungan moisture yang tinggi dan nilai kalor yang rendah, membuat perubahan terhadap performance boiler, karena total moisture akan membuat laju moisture yang masuk ke dalam furnace akan semakin tinggi, hal ini berdampak terhadap panas yang dihasilkan akan banyak diserap untuk menguapkan moisture yang ada di dalam furnace. Dibawah ini merupakan perubahan efisiensi boiler terhadap komposisi campuran biomassa sesuai dengan scenario yang sudah dibuat.

Pada saat kegiatan cofiring berlangsung dari simulasi dan nilai yang sudah di dapat sebelumnya terdapat beberapa hal dapat mempengaruhi terhadap efisiensi boiler diantaranya :

- kenaikan coal flow, kenaikan ini terjadi dikarenakan ketika persentase campuran biomassa dinaikan maka dengan perubahan nilai kalor dan komposisi bahan bakar yang dibakar di ruang bakar untuk menghasilkan output MW yang sama diperlukan tambahan energi kimia per jam yang masuk ke ruang bakar.
- Kenaikan pada udara pembakaran, primary air flow, secondary air flow, excess air hal ini diperlukan untuk menjaga kestabilan pembakaran, namun dapat meningkatkan laju gas buang, dampaknya panas yang hilang akan semakin besar karena terbuang ke cerobong.
- Potensi menurunkan kualitas pembakaran di ruang bakar yang menambah rugi unburn carbon.

Perubahan Efisiensi Boiler Pada Skenario 1

Tabel 12. Nilai Perkiraan Efisiensi Boiler

Biomassa (%)	Coal Flow (t/jam)	Total Air Flow (t/jam)	Excess Air (%)	Perkiraan Efisiensi Boiler (%)
0	266,00	2644	20,0	84,17
1	267,00	2661	20,4	84,04
2	268,00	2681	20,8	83,91

Biomassa (%)	Coal Flow (t/jam)	Total Air Flow (t/jam)	Excess Air (%)	Perkiraan Efisiensi Boiler (%)
3	269,10	2704	21,2	83,78
4	270,20	2727	21,6	83,65
5	271,20	2745	22,0	83,52
6	272,30	2765	22,4	83,39
7	273,40	2786	22,8	83,26
8	274,50	2807	23,2	83,13
9	275,70	2829	23,6	83,00
10	276,80	2842	24,0	82,87

Sumber: Hasil simulasi menggunakan aplikasi GateCycle

Kegiatan cofiring dengan penggunaan biomassa sebagai bahan bakar pendamping Batubara pada beban 70% PLTU Suralaya Unit 5 memberikan dampak langsung terhadap efisiensi termal boiler. Pada kondisi baseline tanpa menggunakan biomassa, efisiensi boiler sebesar 84,17%. Ketika biomassa ditambahkan hingga persentase mencapai 10% dari total energi bahan bakar, mengakibatkan kenaikan laju alir bahan bakar (coal flow) dari 266 t/jam menjadi 276,8 t/jam, serta menaikkan total kebutuhan udara pembakaran dari 2644 t/jam menjadi 2842 t/jam. Selain itu juga excess air operasi harus dinaikan dari 20% menjadi 24%, hal ini untuk menjaga kestabilan pembakaran di dalam ruang bakar dan menghindari peningkatan CO. kenaikan excess air berdampak pada meningkatnya debit gas buang dan membuat banyak panas terbuang melalui cerobong (stack loss). Pada saat yang sama, biomassa membawa fraksi hydrogen dan kelembaban yang lebih tinggi sehingga hal ini dapat meningkatkan kandungan uap air dalam gas buang sedangkan penguapan air ini tidak dapat sepenuhnya dihilangkan dengan pemanasan melalui ekonomiser dan air heater, sehingga hal ini dikategorikan sebagai moisture loss, dengan kombinasi inilah yang menyebabkan penurunan efisiensi boiler.

Perubahan Efisiensi Boiler Pada Skenario 2

Tabel 13. Nilai Perkiraan Efisiensi Boiler

Biomassa (%)	Coal Flow (t/jam)	Total Air Flow (t/jam)	Excess Air (%)	Perkiraan Efisiensi Boiler (%)
0	304	3022	20,0	85.50
1	305.1	3041	20,4	85.37
2	306.3	3064	20,8	85.24
3	307.5	3088	21,2	85.11
4	308.7	3112	21,6	84.98
5	309.9	3131	22,0	84.85
6	311.1	3155	22,4	84.72
7	312.4	3180	22,8	84.59
8	313.7	3205	23,2	84.46
9	315	3232	23,6	84.33
10	316.3	3248	24,0	84.20

Sumber: Hasil simulasi menggunakan aplikasi GateCycle

Pada beban 80% atau 432MW dari simulasi yang sudah dilakukan terlihat bahwa adanya penurunan efisiensi boiler dari 85,5% menjadi 84,17% ketika ditambahkan biomassa dengan persentase 10%. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa penurunan efisiensi boiler akibat cofiring biomassa Adalah fenomena yang relative stabik secara proporsional terhadap

fraksi biomassa dan tidak terlalu sensitive terhadap kenaikan beban dari 70% ke 80 % karena efisiensi di beban tinggi memang sedikit lebih baik jadi secara efisiensi absolut tetap tinggi di beban 80% di bandingkan dengan efisiensi pada beban 70% dengan frakksi biomassa yang sama.

Perubahan Efisiensi Boiler Pada Skenario 3

Tabel 14. Nilai Perkiraan Efisiensi Boiler

Biomassa (%)	Coal Flow (t/jam)	Total Air (t/jam)	Excess Air (%)	Perkiraan Efisiensi Boiler (%)
0	342,0	3.4	20,0	86.5
1	343,2	3.422	20,4	86.37
2	344,5	3.448	20,8	86.24
3	345,7	3.471	21,2	86.11
4	347,0	3.498	21,6	85.98
5	348,2	3.52	22,0	85.85
6	349,5	3.547	22,4	85.72
7	350,8	3.575	22,8	85.59
8	352,1	3.599	23,2	85.46
9	353,4	3.626	23,6	85.33
10	354,7	3.643	24,0	85.2

Pada hasil simulasi yang dilakukan pada beban 486 MW atau scenario pada beban 90% efisiensi boiler turun dari 86,5% menuju 85,2% saat biomassa dicampurkan dengan persentase hingga 10%, karena baseline efisiensi pada beban tersebut sudah tinggi sehingga jika dibandingkan dengan beban 70/80% efisiensi boiler tetap lebih baik.

Perubahan Efisiensi Boiler Pada Skenario 4

Tabel 15. Nilai Perkiraan Efisiensi Boiler

Biomassa (%)	Coal Flow (t/jam)	Total Air (t/jam)	Excess Air (%)	Perkiraan Efisiensi Boiler (%)
0	380,0	3.777	20,0	87.5
1	381,4	3.802	20,4	87.37
2	382,7	3.831	20,8	87.24
3	384,1	3.857	21,2	87.11
4	385,5	3.886	21,6	86.98
5	387,0	3.913	22,0	86.85
6	388,4	3.942	22,4	86.72
7	390,0	3.974	22,8	86.59
8	391,2	3.998	23,2	86.46
9	392,7	4.029	23,6	86.33
10	394,1	4.045	24,0	86.2

Sumber: Hasil simulasi menggunakan aplikasi GateCycle

Pada beban 540 MW, laju aliran Batubara (coalfow) mencapai batas maksimum yang diijinkan yaitu sebesar 380 t/jam. Pencampuran biomassa yang dilakukan menurunkan nilai kalor pada bahan bakar campuran, akibatnya terjadi kenaikan laju aliran bahan bakar untuk mempertahankan output beban. Pada hasil simulasi yang dilakukan kebutuhan coal flow meningkat menjadi 394 t/jam dan melampaui batas maksimal yang diijinkan 380 t/jam.

Secara bersamaan udara pembakaran meningkat dari 3777 t/jam menjadi 4045 t/jam, hal ini berdampak pada penambahan rugi panas yang terbuang melalui cerobong. Kombinasi kenaikan tersebut menimbulkan penurunan terhadap efisiensi boiler dari 87,5% menjadi 86,2%. Dengan demikian, pada beban 540 MW implementasi cofiring memerlukan strategi derating beban agar coal flow tetap di bawah batas yang diijinkan, dan permintaan pada beban maksimum tetap terlaksana dengan tetap dapat mengimplementasikan kegiatan cofiring.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi pada PLTU Suralaya Unit 5, implementasi cofiring biomassa menunjukkan adanya batasan operasional yang signifikan. Pada beban maksimum 540 MW, penggunaan biomassa 1%–10% dengan nilai kalor batubara 4653 kcal/kg dan biomassa 2988 kcal/kg tidak direkomendasikan karena menyebabkan peningkatan parameter operasi seperti coal flow, total air flow, serta penurunan efisiensi boiler yang berpotensi menimbulkan derating. Namun demikian, pada beban 70%–90%, cofiring masih dapat diterapkan dengan komposisi optimum 1%–10%. Secara umum, peningkatan fraksi biomassa menyebabkan kenaikan coal flow rata-rata sekitar 4% dan total air flow sekitar 7% sebagai bentuk penyesuaian terhadap penurunan nilai kalor bahan bakar campuran. Di sisi lain, efisiensi boiler mengalami penurunan rata-rata sebesar 1,3 poin, yang menunjukkan adanya konsekuensi termal dari penggunaan biomassa.

Selain berdampak pada kinerja operasional, cofiring biomassa juga berpotensi menurunkan emisi CO₂. Dengan asumsi biomassa bersifat net-zero carbon, hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan persentase biomassa berbanding lurus dengan penurunan emisi CO₂, meskipun disertai penurunan efisiensi boiler. Pada beban 540 MW, penggunaan biomassa 1% menghasilkan penurunan emisi sebesar 0,85%, meningkat menjadi 4,29% pada 5%, dan mencapai 8,64% pada 10%, dengan efisiensi boiler turun dari 87,5% menjadi 86,2%. Temuan ini menunjukkan adanya trade-off antara peningkatan kinerja lingkungan dan penurunan efisiensi termal, sehingga diperlukan strategi optimasi yang mempertimbangkan batas operasional pembangkit serta target reduksi emisi secara seimbang.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, Z., Insani, V. F. S., Idris, M., Hadiyati, K. R., Anugra, Z., & Irianto, D. (2023). Techno-economic analysis of co-firing for pulverized coal boilers power plant in Indonesia. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(2), 261–269.
- Alfarisyi, M., Dharmawan, A., and Miswar, D.Y. (2022): Optimasi Kebutuhan Udara Pembakaran Batubara Untuk Meningkatkan Kinerja Boiler PLTU Tanjung Awar Awar, Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Dan Mineral, 2(1), 702-708. <http://doi.org/10.53026/sntem.v2i1.660>
- ASME (1978): ASME PTC 12.1 Closed Feedwater Heaters, ASME Stand PTC 12.1.
- ASME (2008): ASME, Ptc 4 Steam Generator, 4, 147-173.
- ASME PTC PM (2013): Performance Monitoring Guidelines For Steam Power Plants. Performance Test Codes, 2010.
- Andersen KH et al., (2000) Deposit formation in a 150 Mwe utility PF-boiler during co-combustion of coal and straw. *Energy and Fuels*, 2000;14.
- Bahan Bakar Biomassa Sebagai Campuran Bahan Bakar Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap, Kepmen ESDM, 1-19.

- Balat, M. And Ayar, G., (2005). Biomass energy in the world, use of biomass and potential trends. *Energy sources* 27, no. 10 (2005): 931-940
- Benti, N.E., Gurmesa, G.S., Argaw, T., Aneseyee, A.B., Gunta, S., Kassahun, G.B., Aga, G.S. and Asfaw, A.A., (2021). The current status, challenges and prospects of using biomass energy in Ethiopia. *Biotechnology for Biofuels*, 14, pp.1-24.
- Bibi, A., Zhang, X. and Umar, M., (2021). The imperativeness of biomass energy consumption to the environmental sustainability of the United States revisited. *Environmental and Ecological Statistics*, 28(4), pp.821-841.
- Bilgili, F., Kocak, E., Bulut, U. And Kuskaya, S., (2017). Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, pp.830-845.
- Destek, M.A., Sarkodie, S.A. and Asamoah, E.F., (2021). Does biomass energy drive environmental sustainability? An SDG perspective for top five biomass consuming countries. *Biomass and Bioenergy*, 149, p.106076.
- ESDM (2022): 72F25-Web-Publish-Statistik-2022, *Statistik Ketenagalistrikan Pln*, 36, 1-114.
- Favero, A., Daigneault, A. and Sohngen, B., 2020. Forests: Carbon sequestration, biomass energy, or both?. *Science advances*, 6(13), p.eaay6792.
- Field, C.B., Campbell, J.E. and Lobell, D.B., (2008). Biomass energy: the scale of the potential resource. *Trends in ecology & evolution*, 23(2), pp.65-72.
- Gavrikov, D., et al. (2020). Strategic Role of Base-Load Plants in Developing Power System. *Emergy Strategy Reviews*, 30, 100519.
- Güney, T. and Kantar, K., (2020). Biomass energy consumption and sustainable development. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 27(8), pp.762-767.
- Halim, M. A., Akter, M. S., Biswas, S., & Rahman, M. S. (2023). Integration of Renewable Energy Power Plants on a Large Scale and Flexible Demand in Bangladesh's Electric Grid-A Case Study. *Control System and Optimization Letters*.
- Hohenstein, W. G., & Wright, L. L. (1994) Biomass energy production in the United States: an overview. *Biomass and Bioenergy*, 6(3), 161-173.
- Hall, D.O. (1991). Biomass energy. *Energy policy*, 19(8), 711-737.
- Irfan, M., Elavarasan, R.M., Ahmad, M., Mohsin, M., Dagar, V. and Hao, Y., (2022). Prioritizing and overcoming biomass energy barriers: Application of AHP and G-TOPSIS approaches. *Technological Forecasting and Social Change*, 177, p.121524.
- Ikhbar, S., & Rusmina, C. (2024). Optimalisasi Energi Biomassa: Solusi Energi TERbarukan untuk Ekonomi Hijau dengan Tinjauan Finansial dan Lingkungan. *Jurnal Serambi Engineering*.
- Jayarathna, L., Kent, G., O'Hara, I. and Hobson, P., (2020). A Geographical Information System based framework to identify optimal location and size of biomass energy plants using single or multiple biomass types. *Applied energy*, 275, p.115398.
- Jekayinfa, S.O., Orisaleye, J.I. and Pecenka, R., (2020). An assessment of potential resources for biomass energy in Nigeria. *Resources*, 9(8), p.92.
- Kaygusuz, K. A. M. I. L., & Turker, M. F (2002). Biomass energy potential in Turkey. *Renewable Energy*.
- Kate Wieck-Hansen, Peter Overgaard, Ole Hede Larsen (2000) Biomass and Bioenergy; Cofiring coal and straw in a 150MW Power boiler experience.
- Kim, G., Choi, S.K. and Seok, J.H., (2020). Does biomass energy consumption reduce total energy CO₂ emissions in the US?. *Journal of Policy Modeling*, 42(5), pp.953-967.
- Larson, E.D. and Kartha, S., (2000). Expanding roles for modernized biomass energy. *Energy for sustainable development*, 4(3), pp.15-25.

- Liu, J., Hu, H., Yu, S. S., & Trinh, H. (2023). Virtual power plant with renewable energy sources and energy storage systems for sustainable power grid-formation, control techniques and demand response. *Energies*.
- Liu, Z., Saydaliev, H.B., Lan, J., Ali, S. and Anser, M.K., (2022). Assessing the effectiveness of biomass energy in mitigating CO₂ emissions: Evidence from Top-10 biomass energy consumer countries. *Renewable Energy*, 191, pp.842-851.
- Magazzino, C., Mele, M., Schneider, N. and Shahbaz, M., (2021). Can biomass energy curtail environmental pollution? A quantum model approach to Germany. *Journal of Environmental Management*, 287, p.112293.
- Mao, G., Huang, N., Chen, L. And Wang, H., (2018). Research on biomass energy and environment from the past to the future: Abibliometric analysis. *Science of the total environment*, 635, pp. 1081-1090.
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia (2022a): Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No.77 Tahun 2022 tentang Kebijakan Mineral dan Batubara Nasional, Kepmen ESDM, 1-46.
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia (2023); Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No.12 Tahun 2023 tentang Pemanfaatan
- Mekhilef, S., Saidur, R., Safari, A. and Mustaffa, W.E.S.B., (2011). Biomass energy in Malaysia: Current state and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7), pp.3360-3370.
- Nielsen C. Increased use of biomass, (1996). The Danish Solution. Third Munich Discussion Meeting: Energy Conversion from Biomass Fuels, 1996.
- PLN (2021): Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030., Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2021-2030, 2019-2028
- Parinduri, Luthfi, Taufik Parinduri, K. Kunci, and E. Fosil. (2020). Konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan. *Journal of Electrical Technology*. Jun;5(2): 88-92.
- Pata, U.K., Kartal, M.T., Adebayo, T.S. and Ullah, S., (2023). Enhancing environmental quality in the United States by linking biomass energy consumption and load capacity factor. *Geoscience Frontiers*, 14(3), p.101531.
- Rashidi, N.A., Chai, Y.H. and Yusup, S., (2022). Biomass energy in Malaysia: current scenario, policies, and implementation challenges. *Bioenergy research*, 15(3), pp.1371-1386.
- Rosillo-Calle, F., (2016). A review of biomass energy shortcomings and concerns. *Journal of chemical Technology & Biotechnology*, 91(7), pp. 1933-1945.
- Saghir, M., Zafar, S., Tahir, A., Ouadi, M., Siddique, B. and Hornung, A., (2019). Unlocking the potential of biomass energy in Pakistan. *Frontiers in Energy Research*, 7, p.24.
- Shah, S.A.R., Naqvi, S.A.A., Riaz, S., Anwar, S. and Abbas, N., (2020). Nexus of biomass energy, key determinants of economic development and environment: A fresh evidence from Asia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, p.110244.
- Solarin, S.A., Al-Mulali, U., Gan, G.G.G. and Shahbaz, M., (2018). The impact of biomass energy consumption on pollution: evidence from 80 developed and developing countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, pp.22641-22657.
- Tun, M.M., Juchelkova, D., Win, M.M., Thu, A.M. and Puchor, T., (2019). Biomass energy : An overview of biomass sources, energy potential, and management in Southeast Asian countries. *Resources*, 8(2), p.81.
- Wang, Z., Bui, Q., Zhang, B. and Pham, T.L.H., (2020). Biomass energy production and its impacts on the ecological footprint: an investigation of the G7 countries. *Science of the Total Environment*, 743, p.140741.

- Wang, C., Raza, S.A., Adebayo, T.S., Yi, S. and Shah, M.I., (2023). The roles of hydro, nuclear and biomass energy towards carbon neutrality target in China: a policy-based analysis. *Energy*, 262, p.125303.
- Yan, P., Xiao, C., Xu, L., Yu, G., Li, A., Piao, S. and He, N., (2020). Biomass energy in China's terrestrial ecosystems: Insights into the nation's sustainable energy supply. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, p.109857.
- Yasin, C.M., Lesmana, B., Praditya, A., Ferlinta, W., and Ramanda, Y. (2021): Road Map Pengembangan dan Pemanfaatan Batubara, 68-113.
- Yokoyama, S.Y., Ogi, T. and Nalampoon, A., (2000). Biomass energy potential in Thailand. *Biomass and Bioenergy*, 18(5), pp.405-410.
- Zafar, M.W., Sinha, A., Ahmed, Z., Qin, Q. and Zaidi, S.A.H., (2021). Effects of biomass energy consumption on environmental quality: the role of education and technology in Asia-Pacific Economic Cooperation countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, p.110868.
- Zheng, C., et al. (2019). Role of Large-Scale Power Plants in Grid Stability under High Demand Conditions. *Applied Energy*, 253, 113529.