

EVALUASI POTENSI BIOMASSA UNTUK *CO-FIRING* DENGAN METODE PROPORSIONAL NILAI ENERGI TANAMAN KALIANDRA DAN BATUBARA PADA PLTU BANKO BARAT

Bagus Totok Purnomo¹, Melania Suweni Muntini²

Institut Teknologi Sepuluh November^{1,2}

6047231007@student.its.ac.id¹

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan teknis penerapan *co-firing* biomassa berbasis energi menggunakan biomassa *Calliandra calothyrsus* pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Banko Barat 3 × 10 MW milik PT Bukit Asam Tbk. Metode yang digunakan adalah analisis karakteristik bahan bakar melalui uji proksimat dan *ultimate* pada batubara serta biomassa (*woodchip* dan *wood pellet*). Nilai kalor tinggi (*Higher Heating Value* / HHV) diperkirakan menggunakan korelasi Dulong dan Channiwala. Rasio substitusi energi ditentukan melalui pencocokan nilai HHV, sedangkan ketersediaan biomassa dianalisis menggunakan pendekatan sistem informasi geografis (GIS) pada area tanam seluas 80 ha. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggantian 1 kg batubara memerlukan sekitar 1,16 kg *woodchip* atau 1,17 kg *wood pellet*. Namun demikian, ketersediaan biomassa yang dianalisis hanya mampu mendukung substitusi batubara dalam proporsi yang terbatas. Simpulan, penerapan *co-firing* biomassa berbasis energi memberikan pendekatan yang lebih akurat dibandingkan substitusi berbasis massa dalam perencanaan transisi energi rendah karbon pada PLTU, meskipun keberlanjutan pasokan biomassa masih menjadi kendala utama.

Kata Kunci: Biomassa Kaliandra, *Co-firing* Biomassa, HHV, Pembangkit Listrik Tenaga Batubara, Substitusi Berbasis Energi

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the technical feasibility of energy-based biomass co-firing using Calliandra calothyrsus biomass at the Banko Barat 3 × 10 MW coal-fired power plant owned by PT Bukit Asam Tbk. The method employed involves fuel characterization through proximate and ultimate analyses of coal and biomass (woodchips and wood pellets). The Higher Heating Value (HHV) was estimated using the Dulong and Channiwala correlations. The energy-equivalent substitution ratio was determined by matching the HHV values, while biomass availability was assessed using a Geographic Information System (GIS)-based land analysis covering a cultivation area of 80 ha. The results indicate that replacing 1 kg of coal requires approximately 1.16 kg of woodchips or 1.17 kg of wood pellets. However, the available biomass supply can only support coal substitution at a limited level. In conclusion, energy-based biomass co-firing provides a more reliable framework

than mass-based substitution for planning low-carbon energy transitions in coal-fired power plants, although biomass supply capacity remains a major constraint.

Keywords: *biomass co-firing, calliandra biomass, coal-fired power plant, energy-based substitution, HHV*

PENDAHULUAN

Indonesia masih sangat bergantung pada energi fosil, khususnya batubara, yang menyuplai lebih dari 45% kapasitas pembangkitan listrik nasional (RUPTL, 2021). Ketergantungan ini telah mengakibatkan emisi karbon yang signifikan; pada tahun 2021, emisi CO₂ terkait energi mencapai 692 Mt, dengan pembakaran batubara sebagai penyumbang terbesar (Energy Institute, 2023). Sebaliknya, Indonesia memiliki sumber daya energi terbarukan yang melimpah, terutama biomassa, dengan potensi yang diperkirakan melebihi 56.000 MW dan dapat dikembangkan lebih lanjut melalui pengembangan Hutan Tanaman Energi (DEN, 2023). Meskipun memiliki potensi yang besar tersebut, pemanfaatan biomassa untuk pembangkitan listrik masih terbatas, dan sebagian besar pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) batubara belum menerapkan teknologi *co-firing* secara efektif.

Co-firing telah diidentifikasi sebagai strategi transisi utama dalam RUPTL 2021–2030 dan *Enhanced Nationally Determined Contribution* (E-NDC) Indonesia untuk mengurangi emisi dari sektor ketenagalistrikan (E-NDC RI, 2022). Namun, implementasinya sering kali mengabaikan perbedaan energi fundamental antara biomassa dan batubara. Kajian-kajian sebelumnya, termasuk simulasi *co-firing* sekam padi pada PLTU batubara *pulverized coal* berkapasitas 400 MWe (Cahyo et al., 2022) dan skenario *co-firing* menggunakan biomassa tongkol jagung (Arisandi & Putra, 2023), menunjukkan bahwa banyak PLTU di Indonesia masih menerapkan pendekatan pencampuran berbasis massa. Metode tersebut mengabaikan variasi nilai kalor tinggi (*Higher Heating Value / HHV*), kandungan *volatile matter*, dan reaktivitas pembakaran sehingga sering kali mengakibatkan penurunan efisiensi termal dan daya *output* boiler yang lebih rendah.

Sebaliknya, kajian berjudul *Empirically Estimated Heats of Combustion of Oxygenated Hydrocarbon Bio-Type Oils* mengusulkan pendekatan pencampuran berbasis energi menggunakan HHV sebagai parameter utama (Ponomarev et al., 2015). Korelasi Channiwala yang digunakan dalam pendekatan ini dianggap lebih akurat karena menggabungkan data analisis *ultimate* untuk memberikan estimasi kandungan energi bahan bakar yang lebih representatif dalam menentukan rasio pencampuran.

PT Bukit Asam Tbk (PTBA) berencana menerapkan *co-firing* pada PLTU Banko Barat 3 × 10 MW menggunakan biomassa kaliandra merah (*Calliandra calothyrsus*) yang dibudidayakan pada sekitar 80 ha lahan reklamasi tambang. Kaliandra dipilih karena kemampuan adaptasinya terhadap kondisi lahan marginal serta potensi biomassa yang besar, diperkirakan sebesar 147,56 t ha⁻¹, dengan

penyimpanan karbon sebesar 64,95 t ha⁻¹ dan sekuestrasi CO₂ sebesar 153,87 t ha⁻¹ (Ismail & Purwanto, 2014). Mengingat hal ini merupakan penerapan *co-firing* pertama di pembangkit tersebut, diperlukan kajian teknis untuk menetapkan rasio substitusi batubara–biomassa berbasis energi yang sesuai dengan luas area perkebunan yang tersedia. Selain itu, simulasi bertahap pada tingkat substitusi 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% perlu dilakukan untuk memperkirakan kebutuhan biomassa dan lahan yang diperlukan, sekaligus memastikan operasi pembangkit yang stabil dan optimal.

Novelty penelitian ini terletak pada pendekatan analisis rasio substitusi biomassa–batubara yang tidak didasarkan pada pencampuran berbasis massa sebagaimana umum digunakan dalam banyak studi *co-firing*, tetapi menggunakan pendekatan berbasis kesetaraan energi (*energy-equivalent substitution*) melalui parameter *higher heating value* (HHV). Jika penelitian terdahulu umumnya berfokus pada simulasi persentase pencampuran biomassa dalam boiler atau evaluasi teknis *co-firing* secara umum, penelitian ini mengintegrasikan analisis karakteristik energi biomassa kaliandra merah, estimasi rasio substitusi berbasis HHV menggunakan pendekatan korelasi elemental, serta simulasi kebutuhan biomassa dan luasan lahan pada beberapa skenario substitusi secara bertahap.

Kebaruan lainnya adalah penelitian ini secara spesifik menggunakan biomassa kaliandra merah dari lahan reklamasi tambang sebagai sumber bahan bakar *co-firing*, yang belum banyak dikaji dalam konteks implementasi pada PLTU skala kecil-menengah di Indonesia, khususnya pada PLTU Banko Barat. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menawarkan pendekatan teknis yang lebih representatif dalam menentukan rasio *co-firing* berbasis energi, tetapi juga memberikan kontribusi baru dalam menghubungkan aspek karakteristik bahan bakar, kebutuhan pasokan biomassa, dan kecukupan lahan energi sebagai dasar pengembangan model implementasi *co-firing* yang lebih efisien dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Kabupaten Muara Enim, Kecamatan Lawang Kidul, Desa Tanjung Enim, Provinsi Sumatera Selatan, Indonesia. Lokasi penelitian berada di dalam wilayah Izin Usaha Pertambangan (IUP) Banko Barat, khususnya di area utara Pit III Timur yang dioperasikan oleh PT Bukit Asam Tbk. Lahan yang dialokasikan untuk penelitian ini mencakup sekitar 80 ha dan terdiri dari lahan pra-tambang yang belum terdampak oleh kegiatan penambangan. Kondisi ini menyediakan *setting* yang representatif untuk mengevaluasi potensi budidaya biomassa dan *co-firing* tanpa pengaruh gangguan lahan sebelumnya.

Pengambilan Sampel dan Karakterisasi

Sampel batubara diambil dari *stockpile* PLTU batubara Banko menggunakan teknik *grab sampling*, sedangkan sampel biomassa kaliandra

diperoleh melalui pengambilan sampel acak di dalam area perkebunan. Prosedur pengambilan sampel untuk batubara maupun biomassa mengacu pada standar ASTM D346/D346M-21 guna memastikan representativitas dan konsistensi sampel bahan bakar (ASTM International, 2021). Sampel *wood pellet* dikumpulkan setelah proses densifikasi selesai dilakukan, yang merepresentasikan bentuk akhir biomassa yang ditujukan untuk aplikasi *co-firing*.

Untuk mengkarakterisasi sifat fisikokimia batubara dan bahan bakar biomassa, dilakukan analisis proksimat dan *ultimate*. Analisis proksimat dilakukan untuk menentukan kandungan *moisture*, *volatile matter*, *fixed carbon*, dan *ash content*, sesuai dengan ASTM D3172 (ASTM International, 2013). Parameter-parameter tersebut memberikan informasi penting mengenai reaktivitas bahan bakar, perilaku pembakaran, dan pembentukan residu.

Analisis *ultimate* selanjutnya dilakukan untuk mengkuantifikasi komposisi elemental bahan bakar, meliputi karbon (C), hidrogen (H), nitrogen (N), sulfur (S), dan oksigen (O), mengacu pada ASTM D5373. Hasil gabungan dari analisis proksimat dan *ultimate* menjadi dasar estimasi nilai kalor tinggi (*Higher Heating Value / HHV*) serta evaluasi kesesuaian biomassa kaliandra sebagai bahan bakar *co-firing* relatif terhadap batubara dalam kondisi operasi berbasis kesetaraan energi.

Estimasi Produktivitas Biomassa

Potensi biomassa berbasis georeferensi diestimasi menggunakan pendekatan berbasis GIS yang diimplementasikan dalam perangkat lunak *ArcGIS*, yaitu suatu metode yang banyak diterapkan dalam kajian penilaian sumber daya biomassa untuk mendukung perencanaan energi dan analisis penggunaan lahan (Panichelli & Gnansounou, 2008; Sacchelli et al., 2013). Dalam pendekatan ini, luas poligon dari setiap kategori penggunaan lahan (misalnya area perkebunan dalam satuan hektar) dikalikan dengan hasil residu biomassa per satuan luas ($t\ ha^{-1}$), disertai faktor koreksi tambahan yang diterapkan untuk memperhitungkan kendala spesifik lokasi seperti kesesuaian medan dan aksesibilitas lahan (Sultana & Kumar, 2012).

Desain perkebunan mengadopsi konfigurasi jarak tanam $1 \times 1\ m$, yang secara teoritis setara dengan kepadatan tanam sekitar $10.000\ pohon\ ha^{-1}$. Kepadatan tanam serupa telah dilaporkan untuk tanaman energi berkayu dengan pertumbuhan cepat yang ditujukan untuk produksi bioenergi (Roshetko et al., 2013; Indrajaya et al., 2020). Namun demikian, kepadatan teoritis ini memerlukan validasi lapangan, karena keterbatasan operasional—seperti zona yang tidak dapat ditanami, pembatasan kemiringan lahan, dan koridor infrastruktur—dapat mengurangi luas area budidaya yang efektif (Sacchelli et al., 2014).

Pemanenan biomassa diasumsikan dilakukan dua kali per tahun, yang mencerminkan praktik silvikultur yang umum diterapkan pada sistem *coppice* rotasi pendek di bawah kondisi tropis, di mana pertumbuhan kembali yang cepat memungkinkan perolehan hasil tahunan yang tinggi (van Dam et al., 2007; Indika

Nature, 2024). Berdasarkan asumsi-asumsi tersebut, produksi biomassa tahunan diestimasi menggunakan Persamaan (1) dan (2). Persamaan (1) mendefinisikan produksi *woodchip* sebagai hasil perkalian antara luas area perkebunan efektif dan produktivitas biomassa kering yang diasumsikan per satuan luas. Persamaan (2) merepresentasikan output *wood pellet* yang bersesuaian, dihitung sebagai proporsi tetap sebesar 90% dari *woodchip* yang diproduksi untuk memperhitungkan kehilangan massa selama proses pengeringan dan densifikasi.

$$\text{Produksi } woodchip = \text{Luas perkebunan tersedia} \times \text{Produktivitas biomassa kering} \quad (1)$$

$$\text{Produksi } wood\ pellet = 90\% \times \text{Produksi } woodchip \quad (2)$$

Faktor konversi untuk produksi *wood pellet* memperhitungkan kehilangan massa selama proses pengeringan dan densifikasi, yang umumnya berkisar antara 5–15% bergantung pada pengurangan *moisture* dan efisiensi *pelletizing* (Tumuluru et al., 2011; Obernberger & Thek, 2010).

Kerangka estimasi berbasis GIS ini menyediakan dasar yang kuat dan dapat diskalakan untuk mengkuantifikasi ketersediaan biomassa, serta mendukung kajian *co-firing* berbasis energi dengan menghubungkan potensi penggunaan lahan dengan skenario pasokan bahan bakar yang realistis untuk PLTU batubara.

Formulasi *Co-firing* Berbasis Energi

Rasio *co-firing* antara batubara dan biomassa ditentukan menggunakan pendekatan berbasis energi melalui estimasi nilai kalor tinggi (*Higher Heating Value / HHV*) dengan korelasi Dulong dan Channiwala. Formulasi-formulasi ini secara khusus dikembangkan untuk memprediksi HHV bahan bakar padat berdasarkan data analisis *ultimate*. Dengan menggabungkan parameter komposisi elemental, yaitu karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), sulfur (S), dan nitrogen (N), korelasi tersebut memberikan representasi komprehensif mengenai potensi energi bahan bakar.

Pendekatan ini sangat sesuai untuk aplikasi *co-firing*, karena batubara dan biomassa menunjukkan perbedaan yang substansial dalam komposisi kimia dan perilaku pembakaran. Penggunaan estimasi HHV berbasis analisis *ultimate* memastikan bahwa rasio *co-firing* yang dihitung secara akurat mencerminkan kontribusi termal aktual dari setiap bahan bakar, sehingga memungkinkan pencampuran setara energi daripada substitusi berbasis massa. Persamaan yang diterapkan dalam penelitian ini disajikan sebagai berikut (3).

$$\text{HHV} = 349,1C + 1178,3H + 100,5S - 103,4O - 15,1N + 21,1A \quad (3)$$

Dimana C, H, O, N, S, dan A masing-masing merepresentasikan persentase massa karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, sulfur, dan abu dalam batubara atau biomassa. HHV batubara maupun biomassa dinyatakan dalam satuan MJ kg⁻¹.

Total input energi PLTU batubara (E_{total}) didefinisikan sebagai akumulasi energi termal yang disuplai ke boiler selama periode operasi tertentu. Nilai ini dihitung dengan mengalikan laju umpan batubara tahunan dengan HHV batubara, sehingga merepresentasikan total energi termal yang tersedia untuk pembangkitan listrik (4).

$$E_{Total} = \text{Total Umpan Batubara} \times \text{HHV Batubara} \quad (4)$$

Selanjutnya, potensi kontribusi energi dari biomassa baik dalam bentuk *woodchip* maupun *wood pellet* dikuantifikasi berdasarkan luas area perkebunan yang tersedia. Total massa biomassa terlebih dahulu dihitung menggunakan Persamaan (5), diikuti dengan estimasi output energi biomassa yang bersesuaian menggunakan Persamaan (6). Perhitungan bertahap ini memungkinkan penilaian yang konsisten mengenai kontribusi energi biomassa relatif terhadap kebutuhan termal total pembangkit, serta mendukung evaluasi tingkat substitusi *co-firing* yang layak dalam kondisi berbasis kesetaraan energi.

$$\text{Massa Biomassa} = \text{Produksi Biomassa (ton/thn)} \times 1.000 \text{ kg} \quad (5)$$

Massa biomassa yang dipertimbangkan dalam analisis ini dapat berupa *woodchip* atau *wood pellet*, bergantung pada bentuk biomassa yang digunakan dalam skema *co-firing*. Dengan demikian, produksi biomassa dinyatakan dalam satuan *output woodchip* atau dikonversi menjadi *output wood pellet*, yang mencerminkan bentuk spesifik bahan bakar yang disuplai ke boiler.

$$E_{Biomassa} = \text{Massa Biomassa} \times \text{HHV Biomassa} \quad (6)$$

Kontribusi energi biomassa dievaluasi sesuai bentuk fisiknya, baik sebagai *woodchip* maupun *wood pellet*, yang menjadi dasar perhitungan selanjutnya. Nilai energi biomassa kemudian digunakan untuk menentukan persentase substitusi menggunakan formulasi yang disajikan dalam Persamaan (7).

$$\text{Persentase Substitusi} = E_{Biomassa} / E_{total} \quad (7)$$

Istilah energi biomassa dapat merepresentasikan kontribusi energi dari *woodchip* maupun *wood pellet*, bergantung pada bentuk bahan bakar yang dipertimbangkan dalam skenario *co-firing*. E_{total} melambangkan total energi listrik yang dihasilkan oleh PLTU batubara selama periode operasi yang telah ditetapkan.

HASIL PENELITIAN

Karakteristik Batubara dan Biomassa

Bagian ini menyajikan hasil analisis proksimat dan ultimate yang dilakukan pada sampel batubara yang digunakan dalam penelitian ini. Analisis dilakukan

untuk menentukan sifat fisikokimia fundamental batubara, yang sangat penting dalam mengevaluasi perilaku pembakarannya serta menetapkan rasio *co-firing* yang tepat dengan biomassa.

Tabel 1. Hasil Analisis Proksimat dan Ultimate Batubara

Parameters	Unit	Ar (As Received)	Adb (Dry Basis)	Test Method
Proximate				
Total Moisture	% wt	33,3		BS.1016 part 1.1973
Moisture	% wt		14,62	BS ISO 11722:2013
Ash Content	% wt	4,7	6,02	BS ISO 1171:2010
Volatile Matter	% wt	31,34	40,12	BS ISO 562:2010
Fix Carbon	% wt	30,7	39,2	
Total Sulfur	% wt	0,48	0,37	BS/ ISO 19579:2006
Gross Calorie Value	Kcal/Kg	4331	5544	BS/ISO 1928:2009
Ultimate				
Carbon	% wt		57,18	
Hydrogen	% wt		5,82	ASTM D.5373 - 16
Nitrogen	% wt		1,06	
Oxygen	% wt		35,94	

Analisis proksimat menunjukkan bahwa sampel batubara memiliki kandungan total moisture yang relatif tinggi sebesar 33,3% pada basis as-received, yang mencerminkan fraksi air bawaan yang substansial. Pada basis kering, kandungan moisture berkurang menjadi 14,62%, sementara kandungan ash meningkat dari 4,7% (Ar) menjadi 6,02% (Adb). Batubara ini dicirikan oleh kandungan volatile matter menengah hingga tinggi, masing-masing sebesar 31,34% (Ar) dan 40,12% (Adb), disertai kandungan fixed carbon sebesar 30,7% (Ar) dan 39,2% (Adb). Sifat-sifat tersebut mengindikasikan batubara berperingkat rendah hingga menengah, yang umumnya dikaitkan dengan reaktivitas lebih tinggi namun densitas energi lebih rendah dibandingkan batubara berperingkat lebih tinggi. Selain itu, kandungan sulfur yang rendah (0,48% Ar) mengindikasikan potensi emisi SO₂ yang terbatas selama proses pembakaran.

Nilai kalor bruto meningkat secara signifikan dari 4.331 kkal kg⁻¹ (Ar) menjadi 5.544 kkal kg⁻¹ (Adb), yang menunjukkan bahwa penurunan nilai kalor pada kondisi as-received terutama disebabkan oleh kandungan moisture yang tinggi. Analisis ultimate lebih lanjut mengungkapkan bahwa batubara didominasi oleh karbon (57,18%), diikuti oleh oksigen (35,94%), hidrogen (5,82%), dan nitrogen (1,06%), yang konsisten dengan komposisi elemental yang umumnya dilaporkan untuk batubara berperingkat rendah hingga menengah.

Menggunakan korelasi Dulong dan Channiwala-Parikh, nilai kalor tinggi (HHV) batubara diestimasi sebesar 22,99 MJ kg⁻¹ pada basis kering (Adb). HHV ini menjadi referensi utama untuk perhitungan *co-firing* berbasis energi dan untuk menetapkan rasio substitusi setara energi dengan bahan bakar biomassa.

Tabel 2. Hasil Analisis Proksimat dan *Ultimate Woodchip*

Parameters	Unit	ar (As received)	adb (Dry Basis)	Test Method
Proximate				
Total Moisture	% wt	25.04		ASTM E871-82 (2019)
Moisture	% wt			
Ash Content	% wt	0.8	1.06	ASTM D1102-84 (2013)
Volatile Matter	% wt	60.8	81.11	ASTM E872-82 (2019)
Fix Carbon	% wt	13.36	17.83	
Total Sulfur	% wt	0.1	0.13	PO / SBA-MIN-BB / 46
Gross Calorie Value	Kcal/Kg	3607	4812	
Ultimate				
Carbon	% wt	37.36	49.84	ASTM D.5373-21 Method A
Hydrogen	% wt	4.35	5.8	
Nitrogen	% wt	0.48	0.64	
Oxygen	% wt	31.87	42.53	ASTM D.3176-24

Analisis proksimat menunjukkan bahwa biomassa kaliandra merah dalam bentuk *woodchip* memiliki kandungan total moisture sebesar 25,04% pada basis as-received, yang mencerminkan tingkat moisture bawaan yang relatif tinggi. Pada basis kering, kandungan ash tetap rendah, yaitu 0,8% (Ar) dan 1,06% (Adb), yang mengindikasikan pembentukan residu padatan yang terbatas selama pembakaran. Biomassa ini dicirikan oleh kandungan volatile matter yang tinggi, mencapai 60,8% (Ar) dan 81,11% (Adb), yang mengindikasikan reaktivitas pembakaran yang kuat. Sebaliknya, kandungan fixed carbon relatif rendah, yaitu 13,36% (Ar) dan 17,83% (Adb), yang konsisten dengan sifat-sifat tipikal bahan bakar biomassa lignoselulosa. Kandungan sulfur yang dapat diabaikan (0,1% Ar) mengimplikasikan potensi emisi SO₂ yang sangat minimal selama pembakaran.

Nilai kalor bruto (GCV) *woodchip* adalah 3.607 kkal kg⁻¹ (Ar) dan meningkat menjadi 4.812 kkal kg⁻¹ (Adb) setelah koreksi moisture, yang mengonfirmasi bahwa kualitas energi biomassa cukup kompetitif untuk aplikasi *co-firing* pada boiler PLTU batubara.

Analisis ultimate mengungkapkan bahwa biomassa terutama tersusun atas karbon (37,36% Ar; 49,84% Adb) dan oksigen (31,87% Ar; 42,53% Adb), dengan kandungan hidrogen sedang (4,35–5,8%) dan kadar nitrogen yang sangat rendah (0,48–0,64%). Komposisi elemental ini mendukung pembakaran yang efisien sekaligus menjaga risiko emisi terkait nitrogen tetap rendah.

Nilai kalor tinggi (HHV) *woodchip* kaliandra dihitung menggunakan korelasi Dulong dan Channiwala, menghasilkan nilai estimasi sebesar 19,82 MJ kg⁻¹ pada basis kering (Adb). Nilai ini kemudian dievaluasi terhadap HHV batubara Banko Barat sebesar 22,997 MJ kg⁻¹ untuk menetapkan rasio substitusi setara energi. Berdasarkan perbandingan tersebut, diperoleh rasio HHV sebesar 1,16, yang menunjukkan bahwa sekitar 1,16 kg *woodchip* diperlukan untuk mensubstitusi 1 kg

batubara guna menghasilkan input termal yang setara dalam kondisi *co-firing* berbasis kesetaraan energi.

Tabel 3. Hasil Analisis Proksimat dan Ultimate Wood pellet

Parameters	Unit	ar (As received)	adb (Dry Basis)	Test Method
Proximate				
Total Moisture	% wt	3.94		ASTM E871-82 (2019)
Moisture	% wt			—
Ash Content	% wt	1.12	1.16	ASTM D1102-84 (2013)
Volatile Matter	% wt	78.15	81.35	ASTM E872-82 (2019)
Fix Carbon	% wt	16.79	17.49	
Total Sulfur	% wt	0.14	0.14	PO / SBA-MIN-BB / 46
Gross Calorie Value	Kcal/Kg	4626	4815	
Ultimate				
Carbon	% wt	46.82	48.74	ASTM D5373-21 Method A
Hydrogen	% wt	5.66	5.89	
Nitrogen	% wt	1.09	1.13	
Oxygen	% wt	41.23	42.94	ASTM D.3176-24

Analisis proksimat menunjukkan bahwa *wood pellet* kaliandra memiliki kandungan moisture yang sangat rendah (3,94% as-received), yang merupakan keunggulan yang diakui luas dari biomassa yang telah didensifikasi, karena moisture rendah meningkatkan kemudahan penanganan dan mengurangi penalti energi yang terkait dengan evaporasi air selama pembakaran—suatu faktor penting bagi efisiensi dan stabilitas *co-firing* (Bukhsh et al., 2026; Vassilev et al., 2015). Kandungan ash tetap rendah (1,12% Ar; 1,16% Adb), yang mengimplikasikan pembentukan residu padatan yang terbatas dan kecenderungan lebih rendah terhadap masalah operasional terkait abu dalam sistem *co-firing* (Vassilev et al., 2015). Pellet juga menunjukkan kandungan volatile matter yang sangat tinggi (78,15% Ar; 81,35% Adb), yang konsisten dengan karakteristik bahan bakar biomassa dan umumnya mendukung penyalaan cepat serta reaktivitas tinggi (Vassilev et al., 2015). Fixed carbon berkisar antara 16,79% (Ar) hingga 17,49% (Adb), yang sesuai dengan karakteristik tipikal pellet biomassa yang didedikasikan untuk keperluan energi. Selain itu, kandungan sulfur yang rendah (0,14% Ar) mengindikasikan potensi pembentukan SO₂ yang terbatas selama pembakaran, sebagaimana umumnya dilaporkan untuk biomassa kayu dibandingkan dengan batubara (Vassilev et al., 2015).

Nilai kalor bruto (*gross calorific value*, GCV) pellet tercatat sebesar 4.626 kkal kg⁻¹ (as received, Ar) dan meningkat menjadi 4.815 kkal kg⁻¹ (air-dried basis, Adb) setelah dilakukan koreksi kadar moisture. Peningkatan nilai kalor ini mengindikasikan bahwa pengurangan kandungan air secara signifikan meningkatkan densitas energi bahan bakar, sehingga pellet memiliki potensi yang lebih baik untuk diaplikasikan dalam skema *co-firing* dengan batubara.

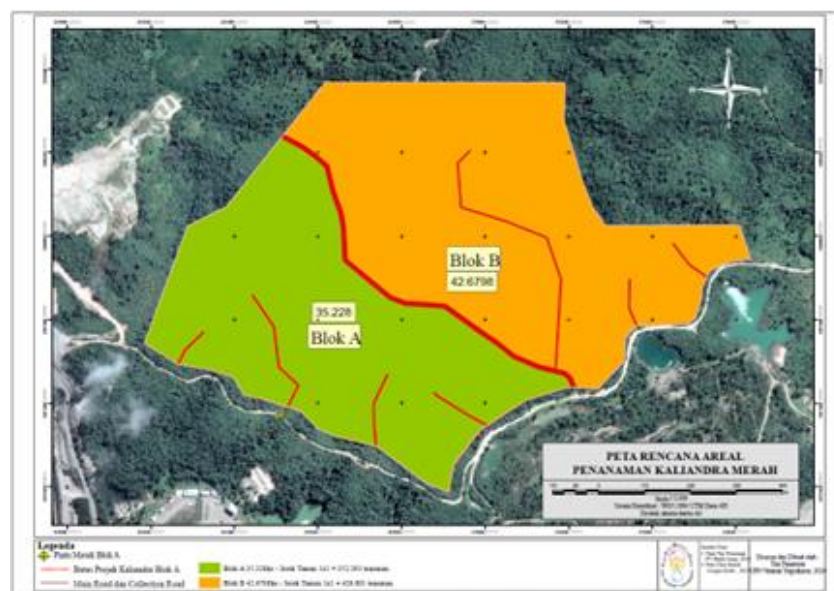
Analisis *ultimate* menunjukkan bahwa komposisi unsur didominasi oleh karbon (46,82% Ar; 48,74% Adb) dan oksigen (41,23% Ar; 42,94% Adb), dengan kandungan hidrogen dalam jumlah sedang serta nitrogen yang relatif rendah. Dominasi karbon menunjukkan kontribusi utama terhadap pembentukan energi panas selama proses pembakaran, sedangkan kadar nitrogen yang rendah berimplikasi pada potensi emisi NOx yang lebih kecil. Kombinasi komposisi ini secara umum mendukung karakteristik pembakaran yang lebih bersih dan efisien (Vassilev et al., 2015).

Selanjutnya, *higher heating value* (HHV) wood pellet diperkirakan sebesar 19,49 MJ kg⁻¹ (Adb) menggunakan pendekatan korelasi empiris tipe Dulong serta korelasi terpadu Channiwala–Parikh. Kedua metode ini dikenal luas dalam estimasi nilai kalor bahan bakar padat berbasis komposisi unsur karena memberikan akurasi yang cukup tinggi pada berbagai jenis biomassa (Channiwala & Parikh, 2002; Demirbas & Demirbas, 2004). Hasil estimasi HHV ini menunjukkan bahwa pellet memiliki nilai energi yang kompetitif dibandingkan biomassa solid lainnya, meskipun masih berada di bawah batubara.

Sebagai pembandingan, nilai HHV batubara Banko Barat sebesar 22,997 MJ kg⁻¹ digunakan sebagai acuan untuk menentukan rasio substitusi energi dalam skenario *co-firing*. Perbedaan nilai kalor antara biomassa dan batubara ini menjadi dasar perhitungan proporsi campuran bahan bakar agar tetap mempertahankan keseimbangan energi pada sistem pembangkitan, sekaligus mendukung strategi transisi energi yang lebih rendah emisi karbon.

Kapasitas Produksi Biomassa

Gambar 1 menunjukkan sebaran spasial blok perkebunan kaliandra yang digunakan sebagai dasar estimasi kapasitas produksi biomassa dalam wilayah studi.



Gambar 1. Distribusi Spasial Blok Perkebunan Kaliandra

Area perkebunan keseluruhan seluas 80 ha ditetapkan untuk penelitian ini, dengan 77,9 ha diidentifikasi sebagai lahan yang sesuai untuk produksi biomassa. Lokasi tersebut diorganisasi menjadi dua blok perkebunan: Blok A seluas 35,226 ha dengan 352.293 pohon, dan Blok B seluas 42,6798 ha dengan 426.801 pohon, menghasilkan total 779.094 pohon kaliandra yang ditanam di seluruh area perkebunan. Rezim pemanenan dua kali per tahun diasumsikan dalam analisis ini. Dengan menggunakan pendekatan konservatif, produktivitas biomassa kering diestimasi sebesar $25 \text{ t ha}^{-1} \text{ thn}^{-1}$, sesuai dengan hasil panen yang dilaporkan untuk tanaman energi dengan pertumbuhan cepat di lingkungan tropis.

Berdasarkan produktivitas tersebut, perkebunan yang ada mampu memasok sekitar $1.947,5 \text{ t thn}^{-1}$ biomassa kering dalam bentuk *woodchip*. Untuk produksi *wood pellet*, faktor konversi sebesar 90% dari biomassa kering diterapkan guna mencerminkan kehilangan massa selama proses pengeringan dan densifikasi, sehingga menghasilkan estimasi output pellet tahunan sebesar $1.751,75 \text{ t thn}^{-1}$.

Rasio *Co-firing* Berbasis Energi

Asumsi awal yang digunakan sebagai dasar perhitungan adalah sebagai berikut, a) produktivitas biomassa diestimasi menghasilkan $1.947,50 \text{ t tahun}^{-1}$ *woodchip* atau $1.751,75 \text{ t tahun}^{-1}$ *wood pellet*; b) kebutuhan batubara tahunan untuk pengumpanan PLTU adalah $120.000 \text{ t tahun}^{-1}$, yang bersesuaian dengan estimasi total input energi termal sebesar $E_{\text{total}} = 120.000 \times 22,997 \text{ MJ kg}^{-1} = 2,76 \times 10^9 \text{ MJ tahun}^{-1}$.

Tabel 4 merangkum hasil simulasi substitusi batubara menggunakan biomassa kaliandra dalam bentuk *woodchip* dengan menerapkan pendekatan pencocokan energi berbasis *higher heating value* (HHV). Simulasi dilakukan pada tingkat substitusi progresif sebesar 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% untuk memastikan input termal ke boiler tetap konsisten dengan spesifikasi desain pembangkit.

Tabel 4. Simulasi Substitusi Batubara dengan *Woodchip*

Substitution (%)	Biomass Production (Ton)	Mass (Kg)	Total Energy (MJ)	Land Requirement (Ha)
1,4	1.947,50	1.947.500	38.591.350	77,9
2,5	3.478,57	3.478.570	68.945.257	139,14
5	6.957,14	6.957.143	137.890.574	278,29
7,5	10.435,71	10.435.714	206.835.851	417,43
10	13.914,29	13.914.286	275.781.149	556,57

Tabel 5 menyajikan hasil simulasi substitusi batubara menggunakan biomassa kaliandra dalam bentuk *wood pellet* dengan pendekatan pencocokan energi berbasis HHV. Seperti pada simulasi *woodchip*, skenario substitusi 2,5% hingga 10% digunakan untuk mengevaluasi kebutuhan biomassa dan menjaga kesetaraan energi pembakaran pada operasi *co-firing*.

Tabel 5. Simulasi Substitusi Batubara dengan *Wood pellet*

Substitution (%)	Biomass Production (Ton)	Mass (Kg)	Total Energy (MJ)	Land Requirement (Ha)
1,24	1.752,75	1.752.750	34.161.098	77,9
2,5	3.533,77	3.533.770	68.873.180	157,06
5	7.067,54	7.067.540	137.746.361	314,11
7,5	10.601,31	10.601.310	206.619.541	471,17
10	14.135,08	14.135.081	275.492.722	628,23

Untuk kedua tabel tersebut, karakteristik perkebunan dan hasil biomassa per satuan luas diasumsikan konstan di seluruh skenario substitusi. Dengan demikian, luas area perkebunan yang dibutuhkan meningkat secara hampir linier seiring dengan semakin tingginya tingkat substitusi.

PEMBAHASAN

Perbedaan Nilai Kalor Tinggi (HHV) antara batubara dan biomassa memainkan peran yang menentukan dalam mendefinisikan rasio *co-firing* yang sesuai. Batubara dari Banko Barat memiliki HHV sebesar 22,99 MJ kg⁻¹, yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan *woodchip* (19,82 MJ kg⁻¹) dan *wood pellet* (19,49 MJ kg⁻¹). Akibatnya, substitusi setara massa tidak dapat dilaksanakan secara langsung. Untuk mempertahankan input termal yang setara ke boiler, diperlukan sekitar 1,16 kg *woodchip* atau 1,17 kg *wood pellet* untuk menggantikan 1 kg batubara. Hal ini membuktikan bahwa substitusi berbasis massa tidak secara akurat mencerminkan kontribusi energi sesungguhnya dari bahan bakar biomassa.

Kegagalan dalam memperhitungkan perbedaan energi tersebut dapat mengakibatkan kekurangan input termal yang berkelanjutan, yang pada gilirannya mengarah pada gangguan profil suhu tungku, berkurangnya stabilitas nyala api, dan penurunan efisiensi pembakaran (Cahyo. N. et al., 2024). Dalam periode operasi yang berkepanjangan, ketidakseimbangan energi semacam itu dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar spesifik (SFC), mengurangi efisiensi termal keseluruhan, dan mempercepat deteriorasi komponen boiler akibat fluktuasi suhu yang berulang. Risiko-risiko ini semakin intensif seiring meningkatnya proporsi biomassa dalam campuran bahan bakar tanpa koreksi energi yang memadai (Arifin, Z., et al., 2023).

Sebaliknya, penerapan rasio *co-firing* berbasis energi memastikan bahwa input termal yang disuplai ke boiler tetap konsisten dengan parameter desainnya, sehingga meningkatkan stabilitas operasional dan mengurangi risiko derating. Pendekatan ini juga memfasilitasi estimasi yang lebih akurat mengenai kebutuhan biomassa dan lahan yang diperlukan, yang sangat krusial untuk perencanaan pasokan biomassa yang berkelanjutan. Dari sudut pandang termodinamika, pencampuran berbasis energi merupakan kerangka kerja yang lebih kuat dan andal untuk optimasi *co-firing*, dan oleh karena itu direkomendasikan untuk implementasi skala besar (Arifin et al., 2023).

Hasil simulasi lebih lanjut mengungkapkan bahwa produksi biomassa dari perkebunan seluas 77,9 ha yang ada hanya dapat mendukung substitusi sebesar 1,40% menggunakan *woodchip* dan 1,24% menggunakan *wood pellet*. Untuk mencapai tingkat substitusi yang lebih tinggi sebesar 2,5–10%, diperlukan peningkatan kapasitas produksi biomassa secara proporsional; pada tingkat substitusi 10%, luas area perkebunan yang dibutuhkan berkembang menjadi 557 ha untuk *woodchip* dan 629 ha untuk *wood pellet*. Hasil ini secara tegas mengidentifikasi ketersediaan biomassa sebagai faktor pembatas utama bagi penerapan *co-firing* jangka panjang.

Secara keseluruhan, mendefinisikan rasio *co-firing* berdasarkan HHV sangat krusial untuk menjaga performa boiler, memungkinkan perencanaan bahan bakar dan penggunaan lahan yang akurat, serta memastikan integrasi biomassa yang berkelanjutan ke dalam sistem pembangkitan listrik berbahan bakar batubara. Dibandingkan dengan pendekatan konvensional berbasis massa, metode berbasis energi menawarkan jalur yang lebih tepat secara teknis dan lebih andal secara operasional untuk mendukung transisi menuju energi terbarukan.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa perbedaan Nilai Kalor Tinggi (HHV) antara batubara dan biomassa kaliandra menjadikan substitusi berbasis massa tidak sesuai untuk aplikasi *co-firing* pada pembangkit listrik tenaga uap batubara. Untuk mencapai input termal yang setara, diperlukan sekitar 1,16 kg *woodchip* atau 1,17 kg *wood pellet* guna mensubstitusi 1 kg batubara. Hasil simulasi lebih lanjut mengungkapkan bahwa biomassa yang diproduksi dari perkebunan seluas 77,9 ha yang tersedia hanya dapat berkontribusi pada substitusi sebesar 1,40% dalam bentuk *woodchip* dan 1,24% sebagai *wood pellet*, yang menegaskan kapasitas pasokan biomassa sebagai kendala dominan ketika target substitusi meningkat menuju 10%.

Penerapan strategi *co-firing* berbasis energi meningkatkan presisi perhitungan kebutuhan biomassa, menjaga stabilitas operasi boiler, dan memfasilitasi integrasi biomassa yang berkelanjutan ke dalam sistem pembangkitan listrik yang ada. Hasil penelitian ini secara tegas menunjukkan bahwa kandungan energi, bukan massa bahan bakar, seharusnya menjadi kriteria utama dalam mendefinisikan rasio *co-firing* demi mempertahankan kinerja PLTU batubara secara konsisten dalam jangka panjang di tengah transisi energi yang sedang berlangsung.

Sebelum penerapan skala besar dilaksanakan, rasio substitusi berbasis energi yang telah diturunkan dalam penelitian ini perlu menjalani validasi skala lapangan dalam kondisi operasi aktual. Pengujian substitusi secara bertahap, penilaian berdasarkan karakteristik bahan bakar as-received, serta inspeksi jangka menengah terhadap komponen boiler direkomendasikan untuk memverifikasi

keandalan operasional dan untuk mendukung pengembangan panduan praktis bagi penerapan *co-firing* yang dapat diskalakan dan andal.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, Z., Insani, V. F. S., Idris, M., Hadiyati, K. R., Anugia, 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. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.49234>
- Arisandi, G. F., & Putra, A. B. K. (2023). Simulasi Cycle Tempo 5.0 dampak variasi rasio co-firing batubara dan biomassa jenis tongkol jagung terhadap performa PLTU 400 MW. *Jurnal Teknik ITS*, 12(2), 2337–3539. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v12i2>
- ASTM International. (2021). *ASTM D346/D346M-21: Standard practice for collection and preparation of coke samples for laboratory analysis*. ASTM International.
- ASTM International. (2013). *ASTM D3172-13: Standard practice for proximate analysis of coal and coke*. ASTM International.
- Bukhsh, K., Li, R., Ahmad, M. B., Zhao, Y., Hu, Z., Yue, S., Embaye, T. M., Li, X., Rahman, Z. ur, Wang, X., Deng, S., & Bai, Z. (2026). Comparative analysis of combustion behavior of raw and torrefied biomass pellets in a customized high-temperature flat flame furnace. *Fuel*, 404(Part B), Article 136301. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136301>
- Cahyo, N., Triani, M., Rasgianti, Sitanggang, R., Suprianto, E., & Paryanto. (2022). Simulasi karakteristik co-firing sekam padi pada PLTU batubara pulverized coal kapasitas 400 MWe. *ROTASI*, 24(2), 43–53.
- Cahyo, N., Sulistiyowati, D., Rahmanta, M. A., Felani, M. I., Soleh, M., Paryanto, P., Adi, P., & Hariana. (2024). 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*, 13(4), 726–734.
- Channiwala, S. A., & Parikh, P. P. (2002). A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, 81(8), 1051–1063. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4)
- Demirbas, A., & Demirbas, A. H. (2004). Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. *Energy Sources*, 26(3), 225–236. <https://doi.org/10.1080/00908310490424764>
- Dewan Energi Nasional. (2023). *Evaluasi capaian bauran energi nasional tahun 2022*. DEN. <https://den.go.id/index.php/publikasi/index/Evaluasi-Bauran-Energi>
- Energy Institute. (2023). *Statistical review of world energy 2023* (72nd ed.). Energy Institute. <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Indika Nature. (2024). *Indika Nature: Impact Story - Our Governance*. PT Indika Nature.
- Indrajaya, Y., Siarudin, M., Widiyanto, A., Handayani, W., Rizki, M. F. P., & Pambudi, S. (2020). Calliandra calothyrsus biomass production under different planting densities in agroforestry systems. *Journal of Forestry Research*, 31(4), 1235–1244. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00922-1>

- Ismail, S., & Purwanto, R. H. (2014). *Potensi biomassa dan karbon jenis kaliandra merah (Calliandra calothyrsus) dan peluang dalam pengurangan emisi gas karbon dioksida* [Tesis magister]. Universitas Gadjah Mada. <https://repository.ugm.ac.id/>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2022). *Enhanced Nationally Determined Contribution Republic of Indonesia 2022*. KLHK RI. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-09/23.09.2022_Enhanced%20NDC%20Indonesia.pdf
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The pellet handbook: The production and thermal utilisation of biomass pellets*. Earthscan.
- Panichelli, L., & Gnansounou, E. (2008). GIS-based approach for defining bioenergy facilities location: A case study in northern Spain. *Energy*, 33(11), 1585–1596. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.05.001>
- PT PLN Persero. (2021). *Rencana usaha penyediaan tenaga listrik (RUPTL) 2021–2030*. PT PLN Persero. <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2021/10/ruptl-2021-2030.pdf>
- Ponomarev, D. A., Mettee, D. H., & Miller, J. (2015). Empirically estimated heats of combustion of oxygenated hydrocarbon bio-type oils. *BioResources*, 10(2), 3638–3656. <https://doi.org/10.15376/biores.10.2.3638-3656>
- Roshetko, J. M., Rohadi, D., Perdana, A., Sabastian, G., & Manurung, G. (2013). *Tree planting in Indonesia: Trends, impacts, and directions*. World Agroforestry Centre (ICRAF).
- Sacchelli, S., De Meo, I., Paletto, A., & Zambelli, P. (2013). Bioenergy production and forest multifunctionality: A trade-off analysis using GIS. *Applied Energy*, 104, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.053>
- Sacchelli, S., Zambelli, P., & Ciolli, M. (2014). Biomassfor: A GIS-based tool for estimating forest biomass availability for energy use. *Renewable Energy*, 62, 623–633. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.031>
- Sultana, A., & Kumar, A. (2012). Development of a GIS-based decision support system for biomass supply chain optimization. *Applied Energy*, 95, 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.021>
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Boardman, R. D. (2011). A review on biomass densification technologies for energy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683–707. <https://doi.org/10.1002/bbb.324>
- van Dam, J., Faaij, A. P. C., Lewandowski, I., & Fischer, G. (2007). Biomass production potentials in Central and Eastern Europe under different scenarios. *Biomass and Bioenergy*, 31(6), 345–366. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.10.001>
- Vassilev, S. V., Vassileva, C. G., & Vassilev, V. S. (2015). Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. *Fuel*, 158, 330–350. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.050>