

EVALUASI KOMPREHENSIF KINERJA ECONOMIZER BOILER SUBCRITICAL MELALUI ANALISIS EKSERGI DAN HEAT ABSORPTION PADA BATUBARA DAN COFIRING RASIO TINGGI

Romeo Tri Affandy¹⁾, Alam Eka Putra²⁾

1) Department of Mechanical and Energy Engineering, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

E-mail: romeotriaffandy@gmail.com

2) Operation Engineering Division, PT. PLN Nusantara Power UP Rembang, Indonesia

E-mail: alam.ekaputra@gmail.com

Abstrak

Co-firing biomassa pada pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batubara merupakan strategi dekarbonisasi yang penting, namun dampaknya terhadap efisiensi komponen kritis seperti economizer perlu dievaluasi secara mendalam. Penelitian ini mengevaluasi kinerja economizer pada pembangkit untuk mengidentifikasi ketidakefisienan, peluang perbaikan, serta faktor operasional yang memengaruhi. Metode yang digunakan adalah analisis eksergi lanjutan dan efisiensi penyerapan panas, dengan memanfaatkan data operasi pada dua kondisi: 100% batubara dan 10% co-firing biomassa. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi eksergi economizer menurun dari 37.3% pada operasi penuh batubara menjadi 30% saat co-firing. Efisiensi penyerapan panas juga lebih fluktuatif, yaitu 45,99–49,37% pada co-firing dibandingkan pada batubara penuh yang lebih konstan 47,58–48,73%. Kondisi ini mengindikasikan bahwa co-firing memicu ketidakstabilan aliran panas dan peningkatan destruksi eksergi akibat karakteristik pembakaran biomassa yang tidak homogen. Faktor lain seperti kualitas bahan bakar, akumulasi fouling, dan fluktuasi beban unit turut berkontribusi terhadap penurunan efisiensi. Penelitian ini memberikan analisis komparatif kuantitatif mengenai dampak co-firing terhadap termodinamika economizer, sekaligus menjadi dasar bagi operator untuk mengoptimalkan kinerja serta memitigasi degradasi efisiensi.

Kata kunci: Exergy analysis, biomass co-firing, economizer performance, Exergy destruction.

Pendahuluan

Transisi energi global menuju ekonomi rendah karbon merupakan tantangan besar abad ke-21, yang mendorong transformasi sektor ketenagalistrikan untuk menekan emisi gas rumah kaca sekaligus memenuhi kebutuhan listrik yang terus meningkat. Di Indonesia, ketergantungan terhadap pembangkit berbasis batubara yang menyumbang lebih dari 60% kapasitas terpasang menjadi hambatan signifikan dalam mencapai target bauran energi terbarukan 23% pada 2025 dan 31% pada 2050 sesuai Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) [1], [2]. Sebagai strategi jangka menengah, *co-firing* biomassa di PLTU eksisting dipandang sebagai pilihan pragmatis untuk menurunkan emisi CO_2 dan mempercepat transisi energi tanpa perlu melakukan pensiun dini terhadap aset batubara.

Namun, penerapan *co-firing* membawa tantangan teknis kompleks seperti perbedaan sifat fisikokimia biomassa yang mempunyai kelembaban, nilai kalor rendah, dan abu yang kaya alkali. Sifat tersebut dapat menyebabkan ketidakstabilan pembakaran, masalah *fouling* dan *slagging*, serta mempengaruhi kinerja sistem pemulihan panas, khususnya economizer dalam boiler [3], [4], [5]. Sebaliknya, meski banyak penelitian laboratorium dan simulasi telah menunjukkan potensi pengurangan emisi CO_x dan SO_x dari *co-firing*, analisis komprehensif terhadap efisiensi termal dan eksergi komponen *heat recovery* di PLTU skala komersial masih sangat terbatas [6], [7], [8].

Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja economizer secara termodinamik di PLTU Rembang (2×315 MW) dengan *co-firing* 10% biomassa. Menggunakan data operasional aktual dari sistem kontrol terdistribusi (DCS). Penelitian ini membandingkan kondisi full batubara murni dengan kondisi bahan bakar batubara dengan campuran *co-firing* 10% dari sisi efisiensi energi dan eksergi, destruksi eksergi, potensi perbaikan, serta efektivitas perpindahan panas. Dengan pendekatan ini, diharapkan penelitian tidak hanya memberikan kontribusi empiris terhadap literatur tentang *co-firing* biomassa, namun juga menawarkan panduan operasional yang praktis dan relevan untuk meningkatkan performa pembangkit serta mendukung strategi dekarbonisasi di Indonesia.

Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian ini mencakup tiga tahap utama, yaitu pengumpulan data operasi dari pembangkit listrik pada dua kondisi (100% batubara dan *co-firing* 10% biomassa serbuk gergaji). Analisis termodinamika digunakan untuk menghitung penyerapan panas, neraca energi, serta aliran eksergi pada *economizer*, dan evaluasi kuantitatif untuk menilai dampak *co-firing* terhadap efisiensi eksergi dan irreversibilitas. Prosedur perhitungan didasarkan pada prinsip termodinamika standar yang diadaptasi dari metodologi sebelumnya oleh Yang et al., 2022, dengan modifikasi khusus untuk memperhitungkan sifat biomassa seperti kandungan air tinggi dan komposisi abu [9]. Seluruh tahapan dirancang agar transparan dan dapat direplikasi, sehingga hasil analisis tidak hanya mendukung pemahaman teoretis, tetapi juga memberikan acuan praktis dalam optimasi kinerja *economizer* pada kondisi bahan bakar campuran.

Pengumpulan Data

Data operasional boiler dikumpulkan selama uji kinerja dengan dua skenario, yaitu pembakaran Batubara 100% dan *co-firing* campuran 10% biomassa serbuk gergaji di mana pencatatan dilakukan sesuai dengan standart EPRI, sebagai dasar evaluasi kinerja *economizer*. Selain itu, analisis ultimate batubara dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur penyusunnya (C, H, N, S, O, abu, dan air dalam %berat), yang menjadi parameter penting dalam perhitungan nilai kalor, estimasi emisi gas buang (SO_x , NO_x), serta perancangan sistem pembakaran yang lebih efisien dan ramah lingkungan, sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Ultimate Analysis

	Mole Fraction		Unit
	100% Batubara	10% Co-Firing Biomass	
Carbon	45.06	40.21	% wt
Hydrogen	3.66	2.79	% wt
Oxygen	11.14	10.61	% wt
Nitrogen	0.62	0.96	% wt
Sulfur	0.29	0.3	% wt
Ash	5.25	3.73	% wt
Moisture	33.98	41.41	% wt

Analisis Exergy

Analisis eksergi dalam penelitian ini dilakukan untuk mengukur potensi kerja berguna dan tingkat irreversibilitas pada sistem *economizer* di bawah kondisi operasi bahan bakar yang berbeda. Untuk fluida kerja (air umpan), eksergi fisik dihitung berdasarkan perbedaan entalpi dan entropi terhadap kondisi referensi lingkungan, sedangkan untuk gas buang diperhitungkan baik komponen eksergi fisik maupun kimia. Nilai eksergi spesifik diperoleh menggunakan persamaan standar dan eksergi fisik gas buang ditentukan melalui korelasi kapasitas panas sebagaimana dikemukakan oleh Coskun et al. (2009) [6].

$$\dot{E}_x = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (1)$$

$$E_{Dx,j} = \dot{E}_{x,flue\ gas} - \dot{E}_{x,feedwater} \quad (2)$$

$$\eta_{Ex} = \frac{\text{Exergy products}}{\text{total exergy input}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\eta_{Ex} = \frac{\dot{E}_{x,out} - \dot{E}_{x,D}}{\dot{E}_{x,in}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\eta_{Ex} = \frac{\dot{E}_{x,feedwater} - \dot{E}_{x,D}}{\dot{E}_{x,fluegas}} \times 100\% \quad (5)$$

Pendekatan diatas memungkinkan kuantifikasi deviasi proses nyata terhadap kondisi reversibel ideal dan memberikan metrik yang andal untuk membandingkan kinerja termodinamika *economizer* pada operasi batubara murni maupun *co-firing* biomassa.

Perhitungan Efisiensi Penyerapan Panas

Efisiensi termal *economizer* ditentukan dari perbandingan panas yang diserap air umpan Q_{eco} terhadap total energi masuk dari bahan bakar $Q_{tot,input} = \dot{m}_{fuel} \times LHV$. Panas yang diserap dihitung berdasarkan laju alir massa dan kapasitas panas jenis air serta selisih suhu masuk dan keluar, sedangkan panas yang dilepas gas buang Q_{gas} ditentukan melalui selisih suhu gas pada sisi masuk dan keluar. Dengan demikian, η_{eco} menggambarkan kemampuan *economizer* dalam memulihkan energi gas buang untuk meningkatkan suhu air umpan dan mendukung efisiensi keseluruhan boiler.

$$Q_{Fluid} = \dot{m}_{fluid} \cdot C_{p,fluid} \cdot (\Delta T) \quad (6)$$

$$\eta_{eco}(\%) = \frac{Q_{eco}}{Q_{tot,input}} \times 100\% \quad (7)$$

Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil analisis kinerja eksergi dan efisiensi penyerapan panas pada *economizer* dalam dua kondisi operasi: 100% pembakaran batubara dan *co-firing* 10% dengan biomassa serbuk kayu (*Sawdust*). Selanjutnya, dilakukan evaluasi komparatif dan analisis faktor operasional untuk memberikan wawasan praktis dalam optimalisasi efisiensi.

Efisiensi Penyerapan Panas

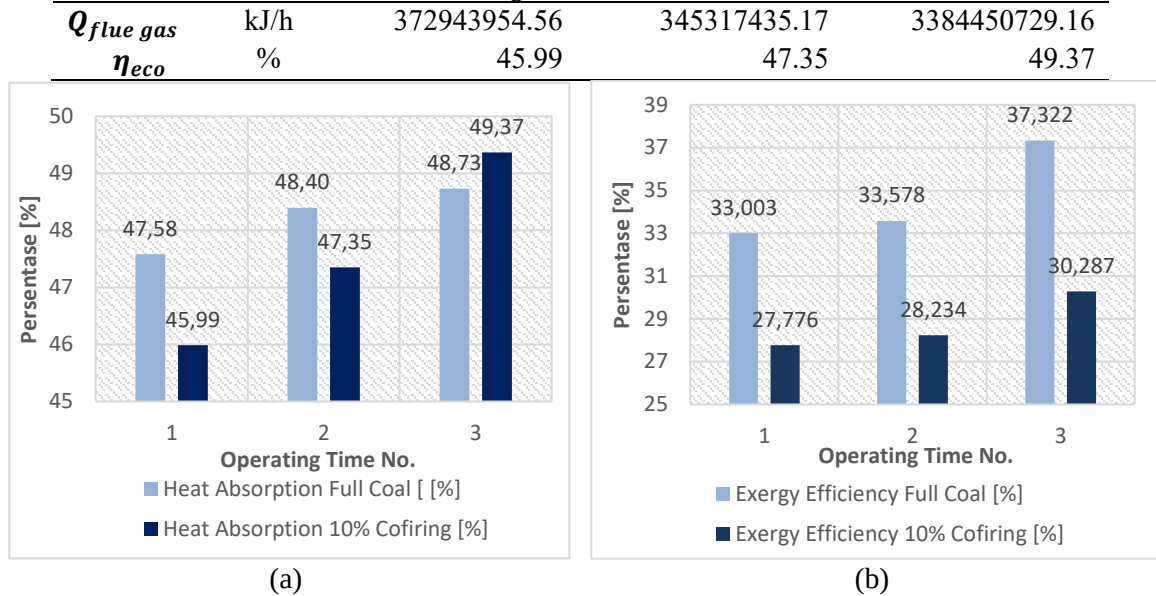
Hasil analisis termal menunjukkan peningkatan efisiensi penyerapan panas seiring waktu operasi yang ditunjukkan pada Gambar 1 (a). Pada pembakaran batubara penuh, efisiensi tercatat 47,58–48,73% yang cenderung stabil, sedangkan pada *co-firing* 10% serbuk gergaji meningkat dari 45,99% menjadi 49,37%. Temuan ini menegaskan potensi *co-firing* dalam meningkatkan kinerja *economizer*. Peningkatan efisiensi penyerapan panas terutama disebabkan oleh kenaikan laju alir massa air umpan, perbaikan koefisien perpindahan panas seiring stabilisasi operasi boiler, serta penurunan suhu keluaran gas buang yang mencerminkan transfer energi lebih efektif. Kandungan uap air yang lebih tinggi pada biomassa juga meningkatkan kapasitas termal campuran gas buang. Pada titik akhir pengambilan data, efisiensi *co-firing* bahkan melampaui operasi batubara penuh (49,37% vs. 48,73%), sehingga menegaskan potensi biomassa sebagai bahan bakar pendukung dalam meningkatkan kinerja termal pembangkit.

Tabel 2. The operational thermodynamic properties for the Heat Absorption Efficiency
Full Coal 100%

Parameters	Unit	Time (WIB)		
		09:30	10:30	11:30
$Q_{feedwater}$	kJ/h	1912690919.26	1892989600.31	1948650813.40
$Q_{flue\ gas}$	kJ/h	368084203.00	283100133.81	2866265006.54
η_{eco}	%	47.58	48.40	48.73

Co-firing 10% Biomass sawdust

Parameters	Unit	Waktu (WIB)		
		16:00	17:00	18:00
$Q_{feedwater}$	kJ/h	1878470059.79	1903457169.69	1945943861.29



Gambar 1. (a) Heat Absorption Efficiency, (b) Advanced exergy analysis

Analisis Exergy

Hasil analisis eksergi dari kinerja termal ditunjukkan pada Gambar 1 (b), yang menggambarkan evolusi efisiensi eksergi berdasarkan *advanced exergy analysis* sepanjang waktu operasi. Analisis ini memperlihatkan perilaku kinerja yang berbeda antara dua kondisi operasi. Pada pembakaran 100% batubara, sistem menunjukkan peningkatan eksergi yang stabil dan lebih signifikan dibandingkan kondisi *co-firing* 10% Biomass Sawdust. Sebaliknya, tren berlawanan terjadi pada nilai eksergi *destruction*: pada operasi batubara penuh. Nilai eksergi *destruction* menurun bertahap dari 26 MW (09:30 WIB) menjadi 24,35 MW (11:30 WIB), sedangkan pada *co-firing* meningkat dari 26,02 MW (16:00 WIB) hingga mencapai puncak 33,2 MW (17:00 WIB), sebelum sedikit menurun menjadi 31,86 MW (18:00 WIB). Hasil ini menegaskan hubungan terbalik antara eksergi *destruction* dan efisiensi eksergi sistem, di mana peningkatan eksergi *destruction* berbanding lurus dengan penurunan kinerja termodinamika. Fenomena ini dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, meliputi: karakteristik pembakaran biomassa dengan kandungan *volatile matter* yang lebih tinggi dibandingkan batubara, perubahan dinamika aliran massa dan energi dalam *economizer*, serta variasi distribusi temperatur yang signifikan pada kedua rezim operasi.

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3, nilai eksergi *destruction* pada kondisi pembakaran Full Coal 100% jauh lebih rendah dibandingkan dengan kondisi *co-firing* 10% serbuk gergaji. Hal ini menunjukkan bahwa sistem termal yang beroperasi dengan bahan bakar batubara murni memiliki efisiensi lebih tinggi, ditandai dengan tingkat ireversibilitas yang lebih rendah sehingga mendekati kondisi termodinamika ideal (reversibel). Rendahnya eksergi *destruction* mengindikasikan bahwa porsi energi masukan yang lebih besar dapat dikonversi menjadi kerja berguna, sehingga menghasilkan peningkatan efisiensi eksergi. Pada skenario batubara penuh, efisiensi eksergi tercatat berada pada kisaran 33% hingga 37%, dengan efisiensi penyerapan panas sebesar 47,58% hingga 48,73%. Sementara itu, pada skenario *co-firing*, meskipun efisiensinya lebih rendah, terdapat keuntungan lingkungan yang signifikan, khususnya pengurangan emisi SO_x dan CO₂ hingga 10%.

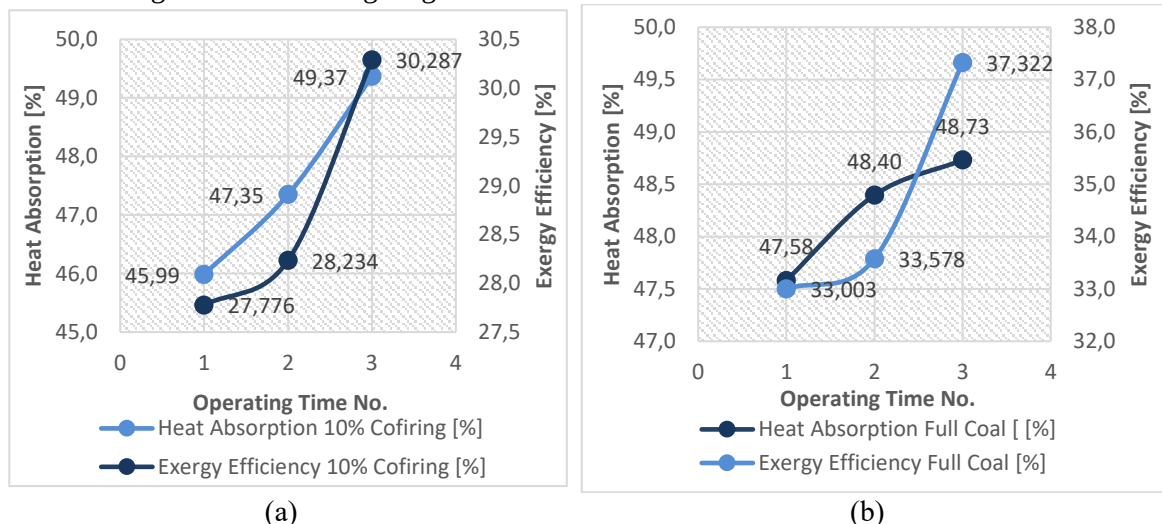
Tabel 3. The Operational Thermodynamic Properties for the Advanced Exergy Efficiency
Full Coal 100%

Parameters	Unit	Waktu (WIB)		
		09:30	10:30	11:30
$E_{x\ feedwater}$	kW	12819.26348	12784.1442	14497.09799

$E_{x_{flue\ gas}}$	kW	38842.96238	38072.9513	38842.96238
$E_{x_{destruction}}$	MW	26.0236989	25.28880709	24.34586438
$\eta_{eksergi}$	%	33.0027956	33.57802264	37.32232844
Coal + Co-firing 10% Biomass sawdust				
Parameters	Unit	Waktu (WIB)		
		16:00	17:00	18:00
$E_{x_{feedwater}}$	kW	12697.06287	13064.06725	13844.95035
$E_{x_{flue\ gas}}$	kW	45712.00606	46270.4821	45712.00606
$E_{x_{destruction}}$	MW	33.01494319	33.20641485	31.86705571
$\eta_{eksergi}$	%	27.77621016	28.23412824	30.28733924

Trend Performa Economizer

Terlihat pada Gambar 2 menyajikan perbandingan kinerja termal *economizer* menggunakan indikator efisiensi penyerapan panas dan efisiensi eksergi pada kedua kondisi operasi. Hasil ini menegaskan bahwa meskipun *co-firing* biomassa dapat meningkatkan pemanfaatan panas karena karakteristik kelembaban dan panas laten, operasi penuh batubara memberikan kinerja eksergi yang lebih unggul berkat profil pembakaran yang stabil dan bertemperatur tinggi. Secara keseluruhan, *co-firing* mendukung tercapainya tujuan energi bersih, namun optimalisasi stabilitas pembakaran dan perpindahan panas tetap diperlukan untuk menutup kesenjangan kinerja serta memaksimalkan efisiensi energi dan manfaat lingkungan.



Gambar 2. Trend of Heat Absorption and Exergy Efficiency, (a) Full Coal Firing, and (b) 10% Cofiring with Biomass Sawdust

Dampak terhadap Kinerja Ekonomiser

Secara spesifik, efisiensi eksergi menurun, yang mengindikasikan peningkatan irreversibilitas termodinamika dalam sistem. Penurunan kinerja ini tidak dapat dikaitkan pada satu mekanisme tunggal, melainkan merupakan hasil kumulatif dari berbagai faktor operasional yang saling terkait.

Dampak Karakteristik Bahan Bakar terhadap Kinerja Termodinamika

Penurunan efisiensi pada kondisi *co-firing* terutama disebabkan oleh karakteristik biomassa yang memiliki *Lower Heating Value* (14113 kJ/kg) lebih rendah dibandingkan batubara (16905 kJ/kg) serta kadar air tinggi (41,41%). Kedua faktor ini mengurangi masukan panas bersih ke siklus Rankine dan meningkatkan kebutuhan energi untuk penguapan air, sehingga menimbulkan jalur

destruksi eksergi yang ireversibel. Kombinasi nilai kalor rendah dan kelembapan tinggi tersebut memperbesar pembentukan entropi dan *lost work*, sehingga membatasi kinerja termodinamika *economizer*. Temuan ini konsisten dengan literatur biomassa yang menekankan kandungan air sebagai hambatan utama dalam pencapaian efisiensi konversi energi tinggi.

Pengaruh Komposisi Abu terhadap Mekanisme Perpindahan Panas

Perubahan komposisi abu pada *co-firing* biomassa turut menurunkan efektivitas perpindahan panas di *economizer*. Kandungan alkali (K dan Na) dengan titik leleh rendah mempercepat *fouling* dan *slagging*, yang berperan sebagai isolator termal dan mengurangi laju perpindahan panas efektif sebesar 5–10% dibanding operasi batubara penuh. Selain menurunkan koefisien perpindahan panas, endapan alkali bersifat higroskopis dan korosif, sehingga mempercepat degradasi material serta memerlukan strategi pembersihan lebih agresif. Dari perspektif eksergi, fenomena ini meningkatkan ketidakseimbangan temperatur lokal dan produksi entropi, menjadikannya salah satu sumber irreversibilitas utama sistem.

Kesimpulan

Studi ini menunjukkan bahwa *economizer* beroperasi lebih efisien pada pembakaran batubara penuh dibandingkan dengan *co-firing* biomassa 10%, ditunjukkan oleh nilai efisiensi penyerapan panas dan eksergi yang lebih tinggi serta tingkat irreversibilitas yang lebih rendah. Meskipun *co-firing* mampu meningkatkan pemulihan panas dalam jangka pendek, kondisi ini menimbulkan penalti termodinamika akibat kualitas bahan bakar yang lebih rendah, kandungan air yang tinggi, serta potensi *fouling* dari abu biomassa yang mengganggu stabilitas pembakaran dan perpindahan panas. Studi ini menegaskan pentingnya strategi terintegrasi, seperti pretreatment biomassa, manajemen abu, serta penerapan sistem kendali pembakaran canggih untuk memperkecil kesenjangan kinerja sekaligus mengoptimalkan efisiensi energi dan manfaat lingkungan pada pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batubara.

Daftar Pustaka

- [1] Agus Tampubolon, “Rencana Umum Energi Nasional (RUEN): Existing Plan, Current Policies Implication, and Energy Transition Scenario,” *IESR (Institute Essent. Serv. Reform)*, no. September, p. 30, 2020, [Online]. Available: <https://iesr.or.id/wp-content/uploads/2020/09/RUEN-Existing-Plan-Current-Policies-Implication-and-Energy-Transition-Scenario-presentation.pdf>
- [2] Republic of Indonesia, “Enhanced Nationally Determined Contribution (ENDC).,” *UNFCCC Secretariat*, 2022. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bpj.2015.06.056%0Ahttps://academic.oup.com/bioinformatics/article-abstract/34/13/2201/4852827%0Ainternal-pdf://semisupervised-3254828305/semisupervised.ppt%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.str.2013.02.005%0Ahttp://dx.doi.org/10.10>
- [3] C. V Squire, J. Lou, and T. C. Hilde, “The viability of co-firing biomass waste to mitigate coal plant emissions in Indonesia,” *Commun. Earth Environ.*, vol. 5, no. 1, p. 423, 2024, doi: 10.1038/s43247-024-01588-0.
- [4] R. P. Primadanty, “Potensi Biomassa Dalam Transisi Energi di Indonesia,” *Parahyangan*

- [5] N. Cahyo, M. Triani, R. Sitanggang, E. Supriyanto, and Paryanto, “Simulasi Karakteristik Co-Firing Sekam Padi pada PLTU Batubara Pulverized Coal Kapasitas 400 MWe,” *Rotasu*, vol. 24, no. 2, pp. 43–53, 2022.
- [6] D. M. Mitrović, B. V. Stojanović, J. N. Janevski, M. G. Ignjatović, and G. D. Vučković, “Exergy and exergoeconomic analysis of a steam boiler,” *Therm. Sci.*, vol. 22, pp. S1601–S1612, 2018, doi: 10.2298/TSCI18S5601M.
- [7] Z. Tian, X. Chen, Y. Zhang, W. Gao, W. Chen, and H. Peng, “Energy, conventional exergy and advanced exergy analysis of cryogenic recuperative organic rankine cycle,” *Energy*, vol. 268, no. December 2022, p. 126648, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.126648.
- [8] A. M. Reza, A. B. Heksaprilla, and A. A. Prakoso, “Carbon Capture & Storage for Indonesia Coal-Power Plant: Opportunity or Gimmick?,” in *2024 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICTPEP)*, 2024, pp. 358–363. doi: 10.1109/ICT-PEP63827.2024.10733386.
- [9] M. Yang, Y. Zhou, J. Yang, J. Bao, D. Wang, and Q. Yu, “Performance analysis of an efficient waste heat utilization system in an ultra-supercritical coal-fired power plant,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 5871–5882, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.04.044.