

LITERATURE REVIEW: PENGARUH SUHU AIR *ECONOMIZER* DAN *FLOW STEAM* TERHADAP EFISIENSI BOILER CFB

Faizal¹, Nanang Ruhyat²

^{1,2}Prodi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana
Email: Faizald4mesin@gmail.com

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of economizer water temperature and steam flow on boiler operational efficiency in Circulating Fluidized Bed (CFB) type Steam Power Plant (PLTU). The study was conducted through a literature review of a number of recent studies that examined the relationship between these two parameters and the thermal efficiency of the boiler system. The analysis shows that increasing the economizer water temperature from 65°C to 67°C can increase the efficiency up to 4%, while installing economizer in general can increase the efficiency up to 10%. On the other hand, excessive steam flow variation can cause temperature fluctuations and decrease efficiency, while optimal steam flow regulation is proven to increase heat recovery from flue gas and decrease operating costs. The optimal interaction between economizer water temperature and steam flow is proven to save fuel, reduce greenhouse gas emissions, and extend the service life of boiler components. This study concludes that the implementation of automatic control and real-time monitoring of both parameters is essential to improve energy efficiency, reduce maintenance costs, and support the sustainability of power generation systems.

Keywords: *PLTU, boiler, economizer, flow steam, efficiency*

Riwayat Artikel :

Tanggal diterima : 28-03-2025

Tanggal revisi : 18-05-2025

Tanggal terbit : 25-06-2025

DOI :

<https://doi.org/10.31949/j-ensitec.v11i02.13607>

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara dengan ekonomi berkembang yang terus meningkatkan pembangunan di sektor industri. Seiring pertumbuhan ekonomi yang pesat, kebutuhan energi listrik juga meningkat, mendorong peningkatan kapasitas pembangkit listrik, terutama Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) [1]. Salah satu peralatan penting dalam produksi energi di PLTU adalah boiler, yang berfungsi menghasilkan uap (*steam*) bertekanan tinggi sebagai energi kerjanya [2][3].

Boiler *Circulated Fluidized Bed* (CFB) menjadi salah satu teknologi unggulan karena menawarkan efisiensi pembakaran tinggi, emisi polutan rendah, kemampuan adaptasi bahan bakar yang luas, dan fleksibilitas beban operasi [4]. Struktur utamanya meliputi ruang bakar (*furnace*), *steam drum*, *cyclone*, *air preheater*, dan *economizer*, dengan batubara sebagai bahan bakar utama yang dibakar bersama oksigen untuk memanaskan penukar panas hingga menghasilkan uap [5][10].

Namun, penurunan kinerja operasional boiler dapat berdampak serius pada efisiensi

This is an open access article under the CC BY-4.0 license.



pembangkit listrik. Faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi antara lain konsumsi bahan bakar, laju aliran uap, temperatur air umpan, serta tekanan dan temperatur uap [6]. Jika boiler beroperasi di bawah temperatur kerja, akan terjadi *heat loss* signifikan yang menurunkan kemampuan boiler menghasilkan uap untuk memutar turbin [7]. Oleh karena itu, analisis efisiensi boiler sangat penting, yang mana tidak hanya untuk menekan biaya bahan bakar dan operasional, tetapi juga untuk mengurangi emisi gas buang, mendukung target lingkungan, dan meningkatkan daya saing industri [8][9][17].

Salah satu komponen penting yang mempengaruhi efisiensi adalah *economizer*, yaitu alat pemanas awal air umpan boiler melalui perpindahan panas dari gas buang [11][12]. Pemanasan awal ini membantu meningkatkan suhu air umpan, menurunkan suhu gas buang, serta meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem [13][14]. Selain itu, penerapan teknologi lain seperti bahan bakar berkualitas tinggi, sistem kontrol otomatis, dan perawatan rutin juga menjadi strategi penting dalam mengoptimalkan efisiensi boiler [15].

Kerugian finansial yang diakibatkan oleh risiko, seperti ketidakstabilan aliran uap atau suhu air yang tidak optimal, dapat berdampak negatif pada efisiensi operasional boiler dan meningkatkan biaya pemeliharaan. Namun, melalui penerapan manajemen risiko yang tepat, seperti pengendalian suhu *economizer* dan stabilitas *flow steam*, perusahaan dapat mengurangi potensi kerusakan, meningkatkan efisiensi energi, serta mengoptimalkan proses operasional secara keseluruhan [16].

Dalam beberapa tahun terakhir, boiler CFB superkritik skala besar semakin banyak digunakan di industri global. Untuk memastikan kualitas pembakaran optimal, diperlukan analisis mendalam terkait efisiensi berdasarkan beban operasi, karena penelitian menunjukkan bahwa pembangkit listrik yang beroperasi pada beban puncak cenderung memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan saat beroperasi pada beban sebagian atau rendah [18].

Saat ini, isu dan dampak terhadap lingkungan menjadi perhatian global,

termasuk potensi pemanasan global (*Global Warming Potential*) dan efek penipisan lapisan ozon (*Ozone Depletion Potential*). Oleh karena itu, upaya peningkatan efisiensi boiler juga memiliki peran strategis dalam menekan emisi gas rumah kaca dan mendukung komitmen keberlanjutan lingkungan. [19].

Berdasarkan latar belakang ini, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh suhu air *economizer* dan aliran steam boiler (*flow steam*) terhadap efisiensi boiler, serta mengidentifikasi strategi-strategi peningkatan efisiensi yang dapat diterapkan di industri energi Indonesia. Dengan pemahaman yang baik mengenai prinsip-prinsip efisiensi ini, diharapkan Indonesia dapat terus mendorong keberlanjutan energi sekaligus menghadapi tantangan global secara kompetitif.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur (*literature review*) untuk menganalisis pengaruh suhu air *economizer* dan aliran uap (*flow steam*) terhadap efisiensi boiler *Circulating Fluidized Bed* (CFB). Data dikumpulkan dari berbagai sumber sekunder, termasuk jurnal ilmiah, artikel penelitian, laporan teknis, dan buku referensi yang relevan.

Pemilihan literatur dilakukan secara purposif, yaitu memilih sumber-sumber yang memiliki keterkaitan langsung dengan topik efisiensi boiler dan teknologi *economizer*, dengan fokus utama pada publikasi 10 tahun terakhir untuk memastikan kebaruan data.

Alat analisis yang digunakan dalam kajian ini adalah analisis tematik, yaitu dengan mengidentifikasi tema-tema utama dari literatur yang dikaji, seperti:

- Faktor-faktor operasional yang mempengaruhi efisiensi boiler
- Peran suhu air *economizer* dalam meningkatkan efisiensi
- Dampak stabilitas *flow steam* terhadap performa boiler
- Strategi optimalisasi parameter operasional boiler

Setelah identifikasi tema, dilakukan sintesis dengan membandingkan hasil-hasil penelitian sebelumnya, menarik kesamaan dan

perbedaan temuan, serta menyusun kesimpulan yang relevan untuk konteks industri di Indonesia. Pendekatan ini tidak melibatkan pengujian eksperimental atau simulasi numerik baru, tetapi fokus pada pemahaman mendalam melalui tinjauan pustaka.

2.1 PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah salah satu jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas dari pembakaran batubara untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi. Uap ini digunakan untuk menggerakkan turbin dan generator, sehingga menghasilkan energi listrik [20]. PLTU memiliki peranan yang sangat penting sebagai tulang punggung penyediaan energi listrik dengan daya dan tegangan tertentu, karena kapasitas produksinya yang besar dan andal. Selain itu, PLTU juga berperan vital dalam menjaga kestabilan pasokan listrik, terutama di daerah yang memerlukan energi dalam jumlah besar dan stabil [21].

Dalam operasionalnya, PLTU menggunakan boiler sebagai komponen utama untuk menghasilkan uap panas yang diperlukan untuk menggerakkan turbin. Boiler bekerja dengan mengubah air menjadi uap melalui pemanasan menggunakan energi panas dari pembakaran bahan bakar, seperti batubara, gas, atau minyak bumi [22]. Efisiensi boiler sangat penting untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan pembangkit listrik, hingga mengurangi biaya operasional [23].

Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi boiler dapat dicapai melalui pengoptimalan berbagai parameter operasional, seperti suhu air *economizer* dan *flow steam* [24].

2.2 Boiler

Boiler, atau ketel uap, adalah perangkat berbentuk bejana tertutup yang berfungsi mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi panas yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap [25]. Boiler CFB memiliki kemampuan adaptasi bahan bakar yang ekstensif dan pengendalian polusi dengan biaya rendah, sehingga banyak digunakan dalam pembangkit listrik. Boiler CFB dapat dengan mudah menangani

pembakaran batubara berkualitas rendah, dengan nilai kalor kurang dari 4.000 kkal [26].

Panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar batubara berupa gas hasil pembakaran mengalir ke sekeliling tabung yang berisi air (*water-tube boiler*). Air dalam tabung-tabung ini kemudian menyerap panas dari gas pembakaran, berubah menjadi uap dengan tekanan dan temperatur tinggi [27].

Ketel uap banyak digunakan dalam berbagai sektor industri, termasuk pembangkit listrik, industri makanan, farmasi, pupuk, kilang, dan lain-lain [28]. Melalui proses pemanasan, kandungan energi dalam batubara diubah menjadi energi panas di dalam tungku boiler. Sebagian dari energi panas ini ditransfer ke evaporator dan superheater melalui proses radiasi, yang berfungsi untuk memanaskan air menjadi uap, dan kemudian memanaskan uap tersebut menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*). Sisa energi panas yang tidak digunakan dalam proses ini berubah menjadi gas buang yang kemudian digunakan untuk pemanasan lanjut di *economizer* [29]. Uap yang dihasilkan memiliki tekanan dan suhu tinggi yang kemudian digunakan untuk berbagai keperluan industri dan pembangkit listrik [30].

Efisiensi boiler sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk suhu air *economizer* dan *flow steam*. Ketika boiler beroperasi di bawah suhu optimal, akan terjadi penurunan efisiensi akibat heat loss yang signifikan. Oleh karena itu, pengaturan suhu air *economizer* dan *flow steam* yang tepat sangat penting untuk menjaga efisiensi operasional boiler [31].

Optimalisasi suhu air *economizer* dapat meningkatkan efisiensi termal boiler hingga 3,86%, yang berdampak langsung pada pengurangan konsumsi bahan bakar [32]. Selain itu, pengaturan *flow steam* yang stabil dan terukur dapat mengurangi fluktuasi suhu dalam boiler, yang meningkatkan efisiensi operasional secara keseluruhan [33][34].

2.3 Peran *Economizer* dan *Flow Steam* dalam Peningkatan Efisiensi Boiler

Economizer adalah perangkat penukar panas yang memanfaatkan energi panas dari gas buang untuk memanaskan air umpan

boiler sebelum masuk ke *steam drum* [35]. Pemanasan awal ini membantu mengurangi kebutuhan energi panas dalam boiler, menghemat bahan bakar, dan meningkatkan efisiensi sistem pembangkit secara keseluruhan [36][37]. Dengan menaikkan suhu air umpan, maka konsumsi bahan bakar untuk mencapai suhu operasi menjadi lebih rendah, sehingga sistem menjadi lebih efisien dan ramah lingkungan [38][39]. Penelitian lainnya juga menunjukkan bahwa penggunaan *economizer* dapat meningkatkan efisiensi hingga 10% dan menurunkan emisi gas rumah kaca [40]. Selain itu, distribusi suhu gas yang seragam juga meminimalkan pembentukan kerak pada pipa boiler, meningkatkan efisiensi perpindahan panas, serta mengurangi biaya perawatan [41].

Variasi berlebihan pada aliran *flow steam* dapat menyebabkan fluktuasi suhu, menurunkan efisiensi, dan meningkatkan risiko kerusakan komponen boiler [42]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kestabilan *flow steam* berperan penting dalam mengurangi potensi kerusakan dan menekan biaya perawatan [43]. Tantangan utama dalam mencapai efisiensi optimal terletak pada pengaturan simultan antara *flow steam* dan daya keluaran. Dalam hal ini, diperlukan keseimbangan yang tepat agar performa boiler tetap maksimal. Di sisi lain, produksi uap yang optimal berkontribusi besar terhadap peningkatan efisiensi, khususnya melalui pemulihan panas dari gas buang. Pengaturan tekanan dan suhu yang tepat juga mendukung efisiensi operasional, sekaligus mengurangi konsumsi energi dan biaya secara keseluruhan [44]. Dengan demikian, pengelolaan *flow steam* yang efektif menjadi faktor kunci dalam meningkatkan efisiensi energi dan memperpanjang umur pakai peralatan boiler [45].

Yang menarik, interaksi antara suhu air *economizer* dan *flow steam* memiliki peran sinergis dalam mencapai efisiensi sistem boiler secara keseluruhan. Kombinasi pengaturan kedua parameter ini dapat mengurangi kerugian energi, mengoptimalkan kapasitas peningkatan uap, serta mendukung keberlanjutan lingkungan dengan mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi [46][47][48].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Optimalisasi *flow steam* dan suhu air *economizer* terbukti menjadi strategi yang efektif dalam meningkatkan efisiensi operasional boiler, khususnya pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Data dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa kenaikan suhu air *economizer*, seperti yang dicapai oleh Henny & Muh (2022) dari 65°C ke 67°C, mampu meningkatkan efisiensi hingga 4%, sementara pemasangan *economizer* secara umum dapat mendorong peningkatan efisiensi hingga 7,5%–10% (Marga et al., 2023; Purseth & Desai, 2021). Bahkan, peningkatan efisiensi juga dicapai melalui penurunan suhu gas buang (Somchat, 2021).

Sementara itu, *flow steam* yang stabil dan terukur sangat penting untuk menjaga efisiensi sistem. Variasi *flow steam* yang berlebihan terbukti menyebabkan fluktuasi suhu, menurunkan efisiensi, serta meningkatkan risiko kerusakan komponen (Pawel et al., 2021). Sebaliknya, aliran uap yang optimal dan sesuai daya keluaran dapat menekan potensi kerusakan serta biaya perawatan (Ducard et al., 2023), sekaligus meningkatkan efisiensi pemulihan panas dari gas buang (Hao et al., 2020).

Interaksi optimal antara suhu air *economizer* dan *flow steam* menjadi kunci dalam mencapai efisiensi termal yang tinggi. Penggunaan *economizer* tidak hanya meningkatkan efisiensi hingga 10%, tetapi juga mengoptimalkan kapasitas uap dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

Rekomendasi praktis dari penelitian ini adalah pentingnya:

- Penerapan sistem kontrol otomatis untuk pengaturan suhu dan *flow steam*;
- Perawatan berkala pada *economizer* untuk memastikan efisiensi perpindahan panas tetap optimal;
- Pelatihan teknisi dan operator mengenai pentingnya pengaturan parameter ini dalam konteks efisiensi energi dan keberlanjutan.

Arah pengembangan riset berikutnya adalah melakukan pengembangan sistem prediksi efisiensi berbasis machine learning

untuk mendukung pengambilan keputusan operasional di PLTU.

Dengan langkah-langkah ini, diharapkan industri energi Indonesia dapat semakin berdaya saing, tidak hanya dalam aspek teknis tetapi juga dalam mendukung target-target keberlanjutan global.

Tabel 1. Ringkasan Pengaruh Suhu Air Economizer terhadap Efisiensi Boiler

No	Peneliti	Pengaruh <i>economizer</i>	Efek terhadap efisiensi
1	Henny & Muh (2022) [2]	Kenaikan suhu air <i>economizer</i> 65 ke 67°C	Efisiensi meningkat 4%
2	Marga et al. (2023) [3]	Setelah pemasangan <i>economizer</i>	Efisiensi meningkat 7,5%
3	Somchart (2021) [13]	Setiap penurunan suhu gas buang 20 °C	Efisiensi meningkat 1,0%
4	Purseth & Desai, (2021). [18]	Penambahan <i>economizer</i>	Efisiensi meningkat 10%

Tabel 2. Pengaruh *Flow Steam* terhadap Efisiensi dan Biaya Operasional

No	Peneliti	Kondisi <i>flow steam</i>	Dampak
1	Pawel et al. (2021) [42]	Variasi <i>flow steam</i> yang berlebihan	Menyebabkan fluktuasi suhu, penurunan efisiensi, serta meningkatkan risiko kerusakan komponen boiler
2	Ducardo et al. (2023) [43]	Optimal, sesuai output daya	Mengurangi potensi kerusakan dan menekan

3	Hao et al. (2020) [44]	<i>Flow steam</i> yang optimal	biaya perawatan, meningkatkan efisiensi, khususnya melalui pemulihan panas dari gas buang
---	------------------------	--------------------------------	---

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur, dapat disimpulkan bahwa suhu air economizer dan stabilitas flow steam merupakan dua parameter kunci yang sangat mempengaruhi efisiensi operasional boiler Circulating Fluidized Bed (CFB). Peningkatan suhu air economizer terbukti mampu meningkatkan efisiensi termal boiler secara signifikan, dengan efisiensi meningkat antara 4% hingga 10% tergantung metode dan kondisi operasional. Sementara itu, pengaturan flow steam yang optimal mampu menjaga kestabilan suhu sistem, menurunkan risiko kerusakan komponen, dan mengurangi biaya operasional.

Interaksi yang sinergis antara suhu economizer yang tinggi dan aliran uap yang stabil berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi energi, penghematan bahan bakar, serta penurunan emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, implementasi sistem kontrol otomatis dan pemantauan real-time terhadap kedua parameter ini menjadi langkah strategis untuk mendukung keberlanjutan operasional pembangkit listrik.

Kajian ini menegaskan pentingnya penerapan teknologi efisiensi energi berbasis kontrol parameter operasional pada PLTU di Indonesia guna menjawab tantangan kebutuhan energi yang terus meningkat serta target pengurangan emisi karbon secara global.

5. REFERENSI

- [1] Alyah, S., dan A. Sulton. 2023. Efficiency analysis of fire tube boiler type at refinery utility unit center for oil and gas human resources development (PPSDM MIGAS) Cepu.

- Jurnal Cakrawala Ilmiah, 2(7): 3109-3118.
- [2] Henny, N. P., dan R. S. Muh. 2022. Analisis pengaruh temperatur air economizer terhadap efisiensi ketel di KM Meratus Kupang. *Venus*, 10(1): 13-25.
- [3] Marga, M., A. Nurul, dan Soeprijanto. 2023. Efisiensi boiler dengan penambahan alat economizer sebagai pre-heater steam. *Jurnal Teknik ITS*, 12(3): 155-160.
- [4] Zhongyuan Liu, S. M., dan J. C. Xiongfeng Pan. 2019. Experimental study on the load response rate under the dynamic combined combustion of PC coal and CFB coal in a CFB boiler. *Fuel*, 236: 225-251.
- [5] Nuraini, A. A., S. Salmi, dan A. H. A. 2018. Efficiency and boiler parameters effects in sub-critical boiler with different types of sub-bituminous coal. *Iran J Sci Technol Trans Mech Eng*: 1-11.
- [6] Nabila, S. T., S. M. Jayusandi, dan A. Lisa. 2022. Analisis efisiensi boiler menggunakan metode langsung di Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Bantargebang. *Journal of Engineering Environmental Energy and Science*, 1(1): 39-48.
- [7] Sulton, A., W. Anggi, dan P. Apriliansyah. 2023. Analisis efisiensi boiler tipe circulating fluidized bed (CFB) dengan metode langsung di PT XY. *Jurnal Teknik Patra Akademika*, 14(2): 101-108.
- [8] Yuge Yao, R. C., Z. Y. Liu, dan H. Y. J. L. Man Zhang. 2019. A method to measure the tube-wall temperature in CFB boilers. *Applied Thermal Engineering*, 153: 493-500.
- [9] Bima, P. R., M. K. Lukas, dan G. Yuspian. 2021. Analisis pengaruh nilai kalor batubara dan excess air terhadap efisiensi boiler di pembangkit listrik PLTU Moramo. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Mesin*, 6(1): 12-17.
- [10] Sirait, F. Aneka, dan Erwin. 2015. Analisa pengaruh variasi kapasitas uap terhadap efisiensi ketel uap di PT. Sinar Sosro Banyuasin-Sumatera Selatan. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 8(2): 133-140.
- [11] Rif'ah, A., Fahmi, dan Joke. 2021. Pengaruh serrated finned tube terhadap perpindahan panas economizer menggunakan ANSYS CFD. *Series: Engineering and Science*, 7(1): 512-519.
- [12] Moh, M., dan E. Dino. 2023. Analisa efisiensi menggunakan energi alternatif economizer pada boiler. *Formosa Journal of Science and Technology (FJST)*, 2(8): 2225-2238.
- [13] Somchart, C. 2021. Optimum installation of economizer, air heater, and flue gas dryer in biomass boiler. *Computers and Chemical Engineering*, 150(107328): 1-10.
- [14] Chaerul, A. Q., dan A. Joon. 2023. Designing a turning guide vane using CFD for an economizer of a non-furnace boiler. *Processes*, 11(1617): 1-13.
- [15] Doddi, Y., dan R. Puspita. 2023. Meningkatkan efisiensi pengendalian suhu boiler pada PLTSa Burangkeng melalui analisis komprehensif berbasis machine learning. *Jurnal Teknik dan Science*, 2(3): 17-28.
- [16] Siti Rofifa Salim & Herlina. 2024. Analisis Manajemen Risiko Operasional Bongkar Muat Menggunakan Metode Hor. *J-ENSISTEC (Journal of Engineering and Sustainable Technology).vol 10. No.2. 1070-1076*
- [17] Wahyu, A. D., Rivandi, H., Fawwaz, G. Y., & Nawang, K. (2024). DAMPAK EMISI KARBON PESAWAT UDARA: TANTANGAN DAN SOLUSI UNTUK PENERBANGAN BERKELANJUTAN. *Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran*, 7(2), 3493–3502.
- [18] Purseth, J. D. S., & Desai, M. S. (2021). PERFORMANCE ANALYSIS AND EFFICIENCY IMPROVEMENT OF BOILER: A

- REVIEW. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 5(12), 326–331.
- [19] Suryaman & Noordianto. 2023. Analisa Hasil Uji Kompresor Sistem Refrigerasi Menggunakan Inverter. J-ENSISTEC (Journal of Engineering and Sustainable Technology).vol 10 No.1. 966-971
- [20] Ravinder, K., Ravindra, J., Mohammad, A. H., & Rajneesh, K. (2019). A simulation model for thermal performance prediction of a coal-fired power plant. International Journal of Low-Carbon Technologies, 14, 122–134.
- [21] Nurhasanah & Roswati. (2015). Perbandingan Efisiensi Boiler Awal Operasi dan Setelah Overhaul Terakhir di Unit 5 PLTU Suralaya. Jurusan Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik – PLN, 2356(1513), 44–48.
- [22] Hendra, S. M. O., Ir, M. F. R., Jamal, G. S. M. D., & Bahrin. (2019). ANALISIS PENGARUH KERAK DARI HASIL PEMBAKARAN BAHAN BAKAR MINYAK RESIDU TERHADAP PRODUKSI UAP PADA BOILER TIPE EMO KAPASITAS 5 TON. Seminar Nasional Teknologi, Sains dan Humaniora, 187–193.
- [23] Sidiq & Noor, A. (2022). Pengaruh Co-Firing Biomassa terhadap Efisiensi Boiler PLTU Batubara. KILAT, 11(1), 21–31.
- [24] Pengcheng, X., Yanping, Z., Yuanjing, W., & Jizhou, W. (2019). Analysis of an improved economizer system for active control of the coal-fired boiler flue gas temperature. Energy, 170, 185–198.
- [25] Russul, H. M., H. A. H., & Ali, H. N. (2021). An Experimental Investigation of The Dynamic Effects in Upper Drum Boiler Under Steam Mass Flow Rate Variation. Engineering and Technology Journal, 39(9), 1376–1383.
- [26] Xiaozhou, L., Guangyu, Z., Yu, Z., Taimoor, A., & Mishra, R. (2019). Performance improvement of a Circulating Fluidized Bed Boiler through flow modifications in Primary Air Supply System. International Journal of COMADEM, 29–43.
- [27] Imam, U. S., & Djatmiko, I. (2019). Experimental Study: The Effect of Excess Air to Unburn Carbon and Boiler Efficiency Using Coal with Heating Value 4200 kcal/kg at a 500 MW Steam Power Plant. AIP Conference Proceedings, 2187(020030), 1–6.
- [28] Uzair, I., & Sarah, F. (2019). Optimization of Fuel in Saturated Steam Boiler through Preheating of Controlled Air-Fuel Mixture. Mathematics and Engineering Technologies-iCoMET, 978, 1–6.
- [29] Somchart, C. (2022). Investigation of the use of steam coil preheater to increase the net efficiency of thermal power plant. Case Studies in Thermal Engineering, 38(102344), 1–9.
- [30] F. S. D. A. & Purwanto, M. R. (2020). Analysis of Boiler Engine Efficiency Unit 2 PT. PJB UP Paiton. Journal of Physics: Conference Series, 1805, 1–11.
- [31] Marcell, B. H., & Nazaruddin, S. Dr. Ir. (2023). ANALISIS EFISIENSI WATER TUBE BOILER MENGGUNAKAN METODE LANGSUNG DI PT. TOBA PULP LESTARI, Tbk PORSEA-SUMATERA UTARA. Jurnal Teknik Mesin S-1, 11(2), 49–68.
- [32] Dadang, M., Dani, R., & I., N. (2023). Desain Pembangkit Listrik Turbin Uap Berbahan Bakar Batu Bara yang Efektif dan Ramah Lingkungan. Jurnal Tekno Insentif, 17(1), 58–68.
- [33] Arthur, D., Lucas, C., Nayana, A., Suenia, V., Romildo, B., & Karoline, B. (2020). Simultaneous prediction of steam production and reduction efficiency in recovery boilers of pulping process. Journal of Cleaner Production, 275(124103), 1–14.

- [34] Carrie, S., Colin, J. Z. M., Jennifer, D., & Masanet, E. (2022). Electrification potential of U.S. industrial boilers and assessment of the GHG emissions impact. *Advances in Applied Energy*, 5(100089), 1–13.
- [35] Wei, T., Huijun, F., Lingen, C., Zhuojun, X., & Junchao, S. (2021). Constructal design for a boiler economizer. *Energy*, 223(120013), 1–10.
- [36] Xiaoqu, H., Tianrun, Y., Dan, Z., Yanbing, D., Jinping, L., & Junjie, Y. (2021). Waste heat utilization from boiler exhaust gases for zero liquid discharge of desulphurization wastewater in coal-fired power plants: Thermodynamic and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 308(127328), 1–15.
- [37] Saravanan, G. K., Sivapragasam, A., Padmavathy, S., Sivaraj, M., Mebratu, T., & Godwin, A. A. (2022). Analysis of fin characteristics for overall heat transfer in boiler economizer. *Thermal Science*, 26(2), 849–855.
- [38] B. R., Ganapathyraman, G., P., M., Prabakaran, A., & S., P. (2016). Performance Analysis of Economiser, Air Pre-Heater and Electrostatic Precipitator of 210MW Power Plant Boiler. *International Journal of Engineering Research And Advanced Technology (IJERAT)*, 2(4), 7–13.
- [39] Chantasiriwan, & Somchart. (2021). Optimum installation of economizer, air heater, and flue gas dryer in biomass boiler. *Computers and Chemical Engineering*, 150(107328), 1–10.
- [40] Peng, D., Ben, W., Cai, X., & Lei, B. (2022). Research on the Modification of Coal Adaptability and Carbon Emissions Reduction Technology for Coal-Fired Boilers. *Energies*, 15(9533), 1–12.
- [42] Paweł, Z., Natalia, S.-K., Butterweck, A., Michał, S., Stanisław, G., Marta, D.-K., Anna, M., & Jerzy, G. (2021). Comprehensive thermodynamic analysis of steam storage in a steam cycle in a different regime of work: A zero-dimensional and three-dimensional approach. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(10), 1–29.
- [43] Ducardo, L., Juan Ricardo, M. V., Alexis, G. S., Juan, E. J. C., Jesús, A. L., Simón, H., & Enrique, C. Q. (2023). Multiobjective Optimizatin of the Energy Efficiency and the Steam Flow in a Bagasse Boiler. *Sustainability*, 15(11290), 1–17.
- [44] Putri, N. A. Z., Yuliani, I., & Widarti, S. (2024). Pengaruh Pemakaian Jenis Bahan Bakar Terhadap Kinerja Boiler dengan Metode Langsung dan Tidak Langsung. *Jurnal Surya Teknik*, 349–356. <https://doi.org/10.37859/jst.v11i1.7324>
- [45] Hao, Z., Yong, D., Yanhua, L., Hao, Z., & Xinbo, Z. (2020). Waste heat recovery from coal-fired boiler flue gas: Performance optimization of a new open absorption heat pump. *Journal Pre-proofs*, 1–32.
- [46] Mahmmod, A.-S., Ali, A., & W. A. (2021). A Series Arrangement of Economizer – Evaporator Flat Solar Collectors as an Enhancement for Solar Steam Generator. *Journal of Ecological Engineering*, 22(5), 121–128.
- [47] Chamorro, M. V. (2024). Operational Control of the Energy Performance of a Water-Tube Boiler Using Intelligent Monitoring of Operating Variables and Parameters. *EUREKA: Physics and Engineering*, (3), 45–60.
- [48] Paweł, M., & P. (2020). Calculation methods of steam boiler operation factors under varying operating conditions with the use of computational thermodynamic modeling. *Energy*, 197(117221), 1–12.