

ANALISIS PENGARUH *PERFORMANCE LOW TEMPERATURE ECONOMIZER* TERHADAP EFISIENSI *BOILER 1000 MW* DAN BIAYA PRODUKSI PLTU DI SERANG

Fadella Binda Parwitasari¹, Alief Avicenna Luthfie¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana Jakarta

Email: 41320120008@student.mercubuana.ac.id

Abstrak--*Low Temperature Economizer (LTE) adalah sistem pendukung pada boiler kapasitas 1000 MW pada unit 1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Serang yang berfungsi untuk meningkatkan temperature air umpan dengan memanfaatkan panas dari gas buang. Pada tahun 2021, LTE pada boiler unit 1 mengalami gangguan sehingga LTE harus berhenti beroperasi. Berhenti beroperasinya LTE berdampak terhadap efisiensi boiler dan biaya produksi pada unit 1 PLTU di Serang khususnya pada biaya bahan bakar. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh performa LTE terhadap efisiensi boiler dan penggunaan batubara. Pengambilan data dilaksanakan di DCS dan di lapangan saat LTE berhenti dan akhirnya diperbaiki sehingga dapat beroperasi kembali. Data yang diambil yaitu temperature main steam, pressure main steam, temperature dan pressure reheater. Batubara yang digunakan merupakan batubara tipe lignit yang memiliki nilai kalor dibawah 4500 kCal. Seluruh data kemudian dihitung dengan metode perhitungan efisiensi langsung. Hasil dari penelitian ini adalah setelah LTE beroperasi kembali, performa LTE mencapai 69.55% dan efisiensi boiler mencapai 85.12% dibandingkan saat LTE berhenti, efisiensi boiler hanya 76.04%. Adanya LTE dapat menghemat penggunaan batubara mencapai lebih dari 4 ton per jam. Biaya produksi pada pemakaian batubara dapat ditekan mencapai Rp. 89.133.886,44 per hari.*

Kata kunci: *Low Temperature Economizer, Ketel Uap, Perhitungan Efisiensi Langsung, Biaya Batubara*

Abstract--*Low Temperature Economizer (LTE) is a support system for boilers with a capacity of 1000 MW at unit 1 Coal Fired Power Plant (CFPP) in Serang which serves to increase the temperature of the feed water by utilizing the heat from the flue gas. In 2021, LTE of unit 1 boiler experienced a leakage disruption causing LTE had to stop operating, which has an impact on boiler efficiency and production costs at unit 1 PLTU in Serang, especially on fuel costs. The purpose of this research is to analyze the effect of LTE performance on boiler efficiency and coal consumption. This research was carried out by collecting data on DCS and field data when LTE stopped and finally repaired so that it can operate again. The data taken are main steam temperature, main steam pressure, reheater temperature and pressure. The coal used is lignite type coal which has a calorific value below 4500 kCal. All data is calculated by using the direct efficiency calculation method. The result of this research is after LTE put on operation again the LTE performance reaches 69.55% and the boiler efficiency reaches 85.12% compared when the LTE stops, boiler efficiency is only 76.04%. The operation of LTE can save coal usage by more than 4 tons per hour. Production costs on the use of coal can be reduced to Rp. 89.133.886,44 per day.*

Keywords: *Low Temperature Economizer, Boiler, Direct Efficiency Calculation, Fuel Cost*

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Serang merupakan pembangkit listrik berkapasitas 1000 MW dengan teknologi *Ultra Super Critical (USC)* yang dilengkapi dengan beberapa sistem pendukung antara lain *Flue Gas Desulfurization (FGD)*, *Electrostatic Precipitator (ESP)* dan *Low Pressure Economizer (LPE)* atau juga biasa disebut dengan *Low Temperature Economizer (LTE)*. Menurut Wang et al., teknologi pembangkit listrik ultra-supercritical dengan parameter yang lebih tinggi, teknologi re-

heater, dan limbah uap atau waste gas yang efisien pemanfaatannya dapat meningkatkan efisiensi pembangkit listrik (2012) [1]. M. El-Wakil (dalam Suhardi et al., 2020) menyatakan bahwa kerugian panas yang terjadi pada gas buang (exhaust) merupakan salah satu faktor penting yang sangat berpengaruh terhadap efisiensi pada unit boiler (steam generator) [2]. Wang et al., (2014) menyatakan bahwa pemasangan LTE ditemukan sebagai tindakan yang efektif untuk memulihkan limbah panas dari gas buang karena strukturnya yang sederhana dan memiliki manfaat ekonomi yang sangat baik [3]. Bahan

bakar yang digunakan merupakan batubara kalori rendah (dibawah 4500 kkal) untuk memanaskan air didalam boiler dan memiliki *temperature* gas buang yang relatif tinggi dengan rata-rata 120°C -130°C. Menurut Lin dkk., dalam hal pemanfaatan limbah panas untuk gas buang, pendekatan yang paling banyak digunakan adalah pemasangan economizer di bagian bawah boiler untuk menyerap panas limbah gas buang (2020)[4]. Jika suhu gas buang lebih tinggi, *low-temperature economizer* dapat memaksimalkan pemulihan panas buang gas buang. *Low-temperature economizer* diletakkan setelah *air pre-heater* karena LTE diletakkan di antara cerobong asap dengan suhu tinggi, sehingga intensitas pertukaran panas LTE juga tinggi (Liu *et al.*, 2014) [5]. Adanya gangguan LTE pada boiler unit 1 PLTU di Serang pada tahun 2021, berdampak pada penurunan efisiensi boiler. Tidak berfungsinya LTE secara langsung berakibat pada adanya peningkatan biaya produksi boiler unit 1 PLTU di Serang khususnya pada penggunaan bahan bakar batubara. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh performance LTE terhadap efisiensi boiler dan dampaknya terhadap biaya produksi khususnya pada penggunaan bahan bakar batubara.

2. METODOLOGI

Proses pengambilan data dimulai dengan persiapan untuk mendapatkan data dan parameter yang dibutuhkan, dengan akses *historical trend* DCS untuk data saat LTE berhenti beroperasi tahun 2021 dan pengambilan data saat boiler beroperasi dengan LTE setelah perbaikan. Pengambilan data dilaksanakan pada Unit 1 Boiler PLTU di Serang. Data yang diambil merupakan data operasi dan juga data pemeliharaan saat terjadi LTE berhenti pada tahun 2021 (25 Mei 2021, sampel data pada pukul 18.00 - 19.00 WIB) dan pada saat LTE beroperasi kembali tahun 2022 (22 Juni 2022, sampel data pada pukul 14.00 - 15.00 WIB). Kedua kondisi tersebut diambil pada saat beban diatas 75%, yaitu diantara 950-980 MW.

Penelitian dilanjutkan dengan proses perhitungan performa LTE pada saat komisioning, LTE berhenti dan LTE beroperasi kembali setelah adanya perbaikan serta analisis seluruh perhitungan yang telah dilaksanakan, sehingga didapatkan nilai performa LTE dan hubungannya terhadap efisiensi boiler pada masing-masing kondisi. Menurut GoldsWorthy *et al.*, efisiensi boiler adalah ukuran seberapa efektif energi kimia dalam bahan bakar diubah menjadi energi panas dalam uap yang menuju turbin. [6]

Metode perhitungan efisiensi yang digunakan merupakan perhitungan efisiensi langsung, dalam Vinchurkar *et al.*, (2014) metode ini dikenal sebagai 'metode *input-output*' karena

fakta bahwa metode ini hanya membutuhkan keluaran yang berguna (uap) dan masukan panas (yaitu bahan bakar) untuk mengevaluasi efisiensi[7]. Berdasarkan penelitian oleh Vakkilainen (2017) untuk boiler dengan bahan bakar batubara, efisiensi boiler yang didapatkan mulai dari 88% hingga 92% [8]. Persamaan (1) merupakan rumus dari metode perhitungan langsung.

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta) = \frac{Q \times (H-h)}{q \times CGV} \times 100 \tag{1}$$

Setelah perhitungan performa dan efisiensi boiler didapatkan, dilanjutkan dengan analisis pengaruhnya terhadap biaya produksi unit 1 PLTU di Serang lebih tepatnya pada penggunaan bahan bakar batubara. Kemudian dari seluruh hasil perhitungan dan analisis, dapat dicapai kesimpulan dari hasil penelitian.

Batubara yang digunakan pada unit 1 PLTU di Serang merupakan batubara dengan kalori rendah (lignit) yang memiliki nilai kalor dibawah 4500 kCal. Tabel 1 merupakan hasil pengujian kualitas batubara pada tahun 2021. Nilai *Gross Calorific Value* (GCV) batubara sebesar 4294 KCal/kg.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kualitas Batubara Tahun 2021

Sample Source	Coal Yard C4B				
	Analysis Information				
	Analysis Items	Analysis Result			
Unit		ARB	ADB	DB	DAF
Total Moisture (<i>M_t</i>)	%	30,88	-	-	-
Moisture (<i>M_{ad}</i>)	%	-	8,52	-	-
Ash Content (<i>A</i>)	%	4,59	6,07	6,64	-
Volatile Matter (<i>V</i>)	%	34,37	45,49	49,73	53,26
Fixed Carbon (<i>FC</i>)	%	30,16	39,92	43,64	46,74
Total Sulphur (<i>S_t</i>)	%	0,29	0,39	0,43	0,46
Gross Calorific Value	KCal /kg	4294	5683	6212	-
Net Calorific Value	KCal /kg	3968	-	-	-

Batubara yang digunakan pada tahun 2021 tidak jauh berbeda kualitasnya dengan batubara yang digunakan pada tahun 2022, Tabel 2 dapat dilihat nilai kualitas batubara yang digunakan pada saat normal operasi pada tahun 2022. Hasil pengujian menunjukkan bahwa batubara yang digunakan pada saat normal operasi memiliki nilai GCV sebesar 4046 kCal/kg. Batubara ini juga berjenis lignit, yang berwarna hitam, sangat rapuh, memiliki kandungan karbon yang rendah

(1500-4500 kkal/kg), kandungan air tinggi, kandungan abu yang banyak dan kandungan sulfur yang banyak. (Pernama, 2016)[9]. Proses pengujian yang dilakukan di laboratorium PLTU di Serang dilakukan sesuai standar yang telah ditetapkan pada ASTM D5865 - 13. Nilai CGV nantinya digunakan sebagai *input* perhitungan efisiensi boiler pada masing-masing kondisi operasi (pada saat boiler bekerja tanpa LTE dan pada saat boiler bekerja normal dengan LTE).

Tabel 2. Hasil Pengujian Kualitas Batubara Tahun 2022

Sample Source		Coal Yard C4A/B			
Analysis Information					
Analysis Items	Analysis Result				
	Unit	ARB	ADB	DB	DAF
Total Moisture (M_t)	%	35,60	-	-	-
Moisture (M_{ad})	%	-	17,25	-	-
Ash Content (A)	%	4,46	5,73	6,92	-
Volatile Matter (V)	%	32,21	41,39	50,02	53,74
Fixed Carbon (FC)	%	27,73	35,63	43,06	46,26
Total Sulphur (S_t)	%	0,42	0,54	0,57	0,70
Gross Calorific Value	KCal /kg	4046	5199	6282	-
Net Calorific Value	KCal /kg	3697	-	-	-

Tipe *boiler* pada unit 1 PLTU di Serang merupakan Γ -type boiler dengan teknologi USC (*Ultra Super Critical*) yang memiliki kapasitas 1000 MW. Tabel 3 merupakan parameter boiler dengan teknologi USC. Dapat dilihat pada tabel 3, *main steam flow* yang mengalir sebesar 3100 t/h pada saat beban maksimum, dengan tekanan uap lebih dari 28 MPa dan suhu uap sebesar 605°C. Teknologi USC dilengkapi dengan *double reheat system*, menurut Ohji & Haraguchi (2017) menjelaskan bahwa siklus pemanasan ulang adalah metode lain untuk meningkatkan efisiensi termal siklus uap[10]. Temperature *reheat steam outlet* sebesar 603 °C dengan tekanan uap mencapai 5.9 MPa pada saat BMCR (beban laju kontinu maksimum) boiler.

Tabel 3. Parameter Boiler dengan Teknologi USC

Parameter	Unit	BMCR	BRL
Main Steam Flow	t/h	3100	2998
Main Steam Pressure	MPa	28,25	28,16

Main Steam Temperature	degC	605	605
Feedwater Temperature	degC	301	298
Reheat steam flow	t/h	2558	2469
Reheat steam pressure, inlet	MPa	6.189	5.971
Reheat steam pressure, outlet	MPa	5.999	5.788
Reheat steam temperature, inlet	degC	369	362
Reheat steam temperature, outlet	degC	603	603

Low Temperature Economizer (LTE) merupakan alat penukar panas yang berfungsi untuk memanaskan air kondensat dengan memanfaatkan panas gas buang yang mencapai 120-130°C. LTE yang digunakan pada PLTU di Serang merupakan LTE yang diproduksi oleh Shanghai Electric dengan tipe H-type fin tube. Pada 1 unit boiler memiliki 6 stage LTE. yang memiliki parameter seperti berikut:

Tabel 4. Tabel Spesifikasi *Low Temperature Economizer* (LTE) (Shanghai Electric)

Item	Unit
Tubes type	H type fin tube
Diameter	38mm
Flue gas Direction	Horizontal
Material tube	ND Steel

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah sistem telah berhasil diisolasi dengan baik, nilai kualitas air juga berhasil memenuhi standard, yaitu dibawah 0.1 μ s/cm. LTE berhenti beroperasi mulai dari Mei 2021, dikarenakan adanya kebocoran pada beberapa stage LTE. Perbaikan LTE dimulai pada akhir Juli 2021, dimana Unit 1 PLTU di Serang harus berhenti beroperasi, sehingga pekerjaan perbaikan LTE dapat dilaksanakan.

Setelah seluruh *safety measures* dilaksanakan dengan baik, pekerjaan pengecekan kebocoran pipa dan perbaikan kebocoran pipa LTE dimulai. Pada saat pemeriksaan lebih lanjut, tim pekerja menemukan adanya kebocoran pada beberapa pipa dan juga pada sambungan las pipa hanya dengan pengecekan visual. Tim dari mekanik boiler melakukan pemotongan pada pipa yang bocor dan juga pengelasan pada sambungan pipa yang dapat diperbaiki.



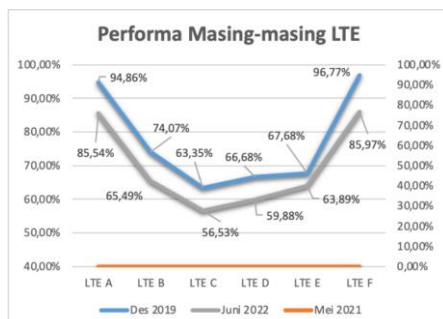
Gambar 1. Pipa LTE yang Telah Diperbaiki

Seluruh pekerjaan perbaikan telah diselesaikan dan tim dari mekanik boiler melakukan acceptance setelah dilakukan *quality check*. Setelah unit 1 boiler beroperasi kembali, departemen operasi melakukan *maneuver* untuk mengoperasikan kembali LTE sehingga LTE beroperasi kembali setelah adanya perbaikan.

Tabel 5. Hasil Performa Masing-masing LTE

Waktu	Des 2019	Mei 2021	Juni 2022
LTE A	94.86%	-	85.54%
LTE B	74.07%	-	65.49%
LTE C	63.35%	-	56.53%
LTE D	66.68%	-	59.88%
LTE E	67.68%	-	63.89%
LTE F	96.77%	-	89.41%

Tabel 5 merupakan hasil perhitungan performa pada masing-masing LTE dengan kondisi yang berbeda. Kondisi yang pertama adalah kondisi dimana LTE pertama kali beroperasi pada saat unit pertama kali dilakukan pengetesan komisioning, dilanjutkan dengan performa pada saat LTE berhenti yang berarti nilai performa LTE adalah 0%, lalu kondisi dimana LTE telah diperbaiki pada tahun 2022.



Gambar 2. Performa Masing-masing LTE

Nilai performa LTE (Gambar 2) ini sangat berpengaruh terhadap efisiensi boiler karena LTE adalah pemanas awal air kondensat sebelum masuk ke sistem boiler.

Tabel 6 merupakan data operasi boiler pada saat boiler beroperasi tanpa adanya LTE pada bulan Mei 2021. Beban yang dihasilkan pada sebesar 963 MW, yang merupakan beban lebih dari 75% beban maksimal.

Tabel 6. Parameter Boiler Saat Operasi dengan Adanya Gangguan (tanpa LTE) Mei 2021

DCS Raw Data	
Parameter	Average
Coal Flow (t/h)	534.01
HHV (kCal/kg)	4294.00
SH Spray Flow (t/h)	13.26
RH Spray Flow (t/h)	1.36
Feedwater Flow (t/h)	2696.23

DCS Raw Data

Parameter	Average
Main Steam Press (Mpa)	25.11
Main Steam Temp (°C)	599.12
Hot Reheat Steam Press (Mpa)	5.08
Hot Reheat Steam Temp (°C)	597.95
Cold Reheat Steam Press (Mpa)	5.39
Cold Reheat Steam Temp (°C)	360.06
RH Spray Press (Mpa)	29.68
RH Spray Temp (°C)	292.94
HPH 1 Out Water Press (Mpa)	28.99
HPH 1 Out Water Temp (°C)	292.94

Pada beban 963 MW, batubara yang digunakan merupakan batubara dengan rank lignit dengan nilai kalor 4294 KCal/kg. Laju aliran batubara pada saat terjadi gangguan LTE, rata-rata mencapai 534.01 t/h. Laju alir air umpan sebesar 2696.23 t/h, menghasilkan *main steam* dengan tekanan 25.11 MPa dengan *main steam temperature* sebesar 599.12°C.

Tabel 7 menunjukkan data operasi unit 1 boiler PLTU di Serang pada saat boiler beroperasi dengan adanya sistem pembantu *low temperature economizer* yang telah diperbaiki. Data diambil pada Juni 2022 beberapa bulan setelah LTE diperbaiki. Beban yang dihasilkan pada unit 1 boiler adalah sebesar 979 MW, beban ini merupakan beban lebih dari 75% beban maksimal. Dari Tabel 7, dapat dilihat bahwa pada beban 979 MW pada tanggal 22 Juni 2022, pada saat boiler beroperasi dengan adanya sistem LTE, dari sampel data pukul 14.00 - 15.00 WIB, jumlah batubara yang dibutuhkan rata-rata sebanyak 529.16 t/h. Batubara yang digunakan merupakan batubara kualitas rendah dengan nilai HHV (*heat heating value*) sebesar 4046 KCal/kg.

Tabel 7. Parameter Boiler Saat Operasi (dengan LTE) Juni 2022

DCS Raw Data	
Parameter	Average
Coal Flow (t/h)	529.16
HHV (kCal/kg)	4046.00
SH Spray Flow (t/h)	27.58
RH Spray Flow (t/h)	19.07
Feedwater Flow (t/h)	2818.75
Main Steam Press (Mpa)	26.31
Main Steam Temp (°C)	597.28
Hot Reheat Steam Press (Mpa)	5.41
Hot Reheat Steam Temp (°C)	601.50
Cold Reheat Steam Press (Mpa)	5.73
Cold Reheat Steam Temp (°C)	359.71
RH Spray Press (Mpa)	31.18
RH Spray Temp (°C)	296.50
HPH 1 Out Water Press (Mpa)	30.47
HPH 1 Out Water Temp (°C)	296.50

Dengan laju alir air umpan sebesar 2818.75t/h, menghasilkan *main steam* dengan

tekanan 26.31 MPa dengan temperatur uap 597.28°C. Data parameter pada masing-masing kondisi kemudian diolah menjadi energi masukan dan keluaran boiler seperti pada Tabel 8.

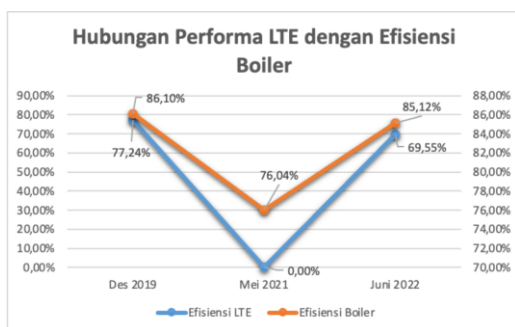
Tabel 8. Perbandingan Energi *Input-Output* dengan LTE dan Tanpa LTE

	Boiler Beroperasi Tanpa LTE	Boiler Beroperasi dengan LTE
Beban (MW)	963	979
Energi Input (J)	2.293.058,44	2.140.998,17
Energi Output (J)	1.743.608,34	1.822.421,03

Dari perhitungan energi *input-output*, dapat diketahui nilai efisiensi boiler pada masing-masing kondisi, seperti pada Tabel 9. Efisiensi boiler pada saat beroperasi dengan LTE yang telah dilakukan perbaikan mencapai 85.12%. Dengan beban yang sama, efisiensi boiler pada saat beroperasi tanpa adanya LTE, hanya mencapai 76.04%.

Tabel 9. Perbandingan Efisiensi Boiler dengan LTE dan Tanpa LTE

	Boiler Beroperasi COD	Boiler Beroperasi Tanpa LTE	Boiler Beroperasi dengan LTE
Beban (MW)	1050	963	979
Efisiensi Boiler (%)	86.10	76.04	85.12



Gambar 3. Hubungan Performa LTE dengan Efisiensi Boiler

Dari hasil perhitungan dan hasil pengolahan data, dapat dilihat pengaruh perbaikan yang telah dilakukan untuk menangani gangguan yang ada pada LTE terhadap efisiensi boiler secara keseluruhan. Gambar 3 merupakan grafik efisiensi boiler dengan performa LTE, dapat dilihat pada gambar, dengan adanya LTE yang telah diperbaiki efisiensi boiler mencapai 85.12% dengan efisiensi LTE mencapai 69.55%. Nilai efisiensi boiler ini lebih baik dibandingkan dengan

efisiensi boiler tanpa adanya LTE yang hanya mencapai 76.04%

Batubara yang digunakan di unit 1 boiler PLTU di Serang merupakan batubara yang dikirim dari Sumatera dan Kalimantan dengan rata-rata harga batubara pada tahun 2021 dan tahun 2022 sebesar Rp. 765,6938 per kilogram.

Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 10, perbandingan laju aliran batubara saat LTE tidak beroperasi cenderung mengalami kenaikan dibandingkan dengan saat LTE beroperasi setelah perbaikan. Pada saat LTE tidak beroperasi laju alir batubara mencapai 534.01 ton per jam sedangkan pada saat LTE beroperasi laju alir batubara turun menjadi 529.16 ton per jam.

Tabel 10. Perbandingan Biaya Bahan Bakar dengan LTE dan Tanpa LTE

	Operasi Tanpa LTE	Operasi dengan LTE setelah perbaikan
Coal Flow (t/h)	534.01	529.16
Biaya (per hari) (dalam Rupiah)	9.813.399.608,01	9.724.265.721,57
Biaya (per bulan) (dalam Rupiah)	304.215.387.848,18	301.452.237.368,58

Pada Tabel 11, menyajikan selisih penggunaan batubara saat beroperasi tanpa LTE dan saat LTE beroperasi setelah dilakukan perbaikan terhadap kebocoran pipa.

Tabel 11. Perbandingan Biaya Bahan Bakar dengan LTE dan Tanpa LTE

	Nominal	Unit
Selisih Batubara (per jam)	4.85	t/h
Selisih Batubara (per hari)	116.41	t/d
Selisih Efficiency	9.316	%
Tambahan Biaya (per hari)	89.133.886,44	Rupiah
Tambahan Biaya (per bulan)	2.763.150.479,60	Rupiah

Perbaikan pipa LTE dapat menghemat penggunaan batubara sebanyak 4,85 ton perjam atau setara dengan 116,41 ton per hari. Biaya produksi khususnya pada penggunaan batubara dapat berkurang mencapai Rp. 89.133.886,44 setiap harinya, atau setara dengan Rp. 2.763.150.479,60 per bulan.

4. KESIMPULAN

Adanya studi kasus pada unit 1 PLTU di Serang pada saat berhentinya LTE dan saat LTE beroperasi kembali dapat disimpulkan bahwa LTE memiliki pengaruh yang besar terhadap efisiensi boiler dan penggunaan batubara.

1. Setelah LTE dapat beroperasi kembali performa LTE rata-rata sebesar 69.55%, efisiensi boiler mengalami kenaikan mencapai 85.12%, lebih tinggi dibandingkan efisiensi boiler pada saat LTE berhenti beroperasi yaitu sebesar 76.04%. Nilai efisiensi boiler pada saat setelah LTE diperbaiki, tidak jauh berbeda dengan efisiensi boiler saat (Commercial Operation Date) COD sebesar 86.10%.
2. Pada saat LTE beroperasi kembali, penggunaan batubara dapat berkurang 4.85 ton per jam atau 116.41 ton per hari. Sehingga, biaya yang dikeluarkan untuk batubara mengalami penurunan mencapai Rp. 89.133.886,44 per hari atau setara dengan Rp. 2.763.150.479,60 per bulan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Wang *et al.*, "Application of a low pressure economizer for waste heat recovery from the exhaust flue gas in a 600 MW power plant," *Energy*, vol. 48, no. 1, pp. 196–202, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.01.045.
- [2] S. Suhardi, K. Kamriani, S. Suryanto, and J. Jamal, "Efek Pemakaian Economizer Terhadap Peningkatan Efisiensi Boiler Pulverized Pada Unit Pembangkit Listrik Tenaga Uap," *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, vol. 18, no. 1, p. 137, Sep. 2020, doi: 10.31963/sinergi.v18i1.2253.
- [3] C. Wang, B. He, L. Yan, X. Pei, and S. Chen, "Thermodynamic analysis of a low-pressure economizer based waste heat recovery system for a coal-fired power plant," *Energy*, vol. 65, pp. 80–90, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2013.11.084.
- [4] X. Lin, Q. Li, L. Wang, Y. Guo, and Y. Liu, "Thermo-economic analysis of typical thermal systems and corresponding novel system for a 1000 MW single reheat ultra-supercritical thermal power plant," *Energy*, vol. 201, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117560.
- [5] H. Liu, P. Yu, J. Xue, L. Deng, and D. Che, "Research and application of double-reheat boiler in China," *Processes*, vol. 9, no. 12, MDPI, Dec. 01, 2021. doi: 10.3390/pr9122197.
- [6] P. GoldsWorthy, D. J. Eyre, and E. On, "Value-in-use (VIU) assessment for thermal and metallurgical coal," in *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*, vol. 2, Elsevier Inc., 2013, pp. 455–496. doi: 10.1533/9781782421177.3.455.
- [7] A. G. Vinchurkar, R. R. Lakhe, and R. L. Shrivastava, "Energy Efficiency Analysis of Thermal Power Plant Boilers," *International Journal of Research in Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 07–17, 2014, [Online]. Available: www.iaster.com,
- [8] E. K. Vakkilainen, "Boiler Processes," in *Steam Generation from Biomass*, Elsevier, 2017, pp. 57–86. doi: 10.1016/b978-0-12-804389-9.00003-4.
- [9] A. Panji Permana, "Kajian Coal Rank Berdasarkan Analisa Proximate (Studi Kasus Batubara di Kabupaten Sorong)," 2016.
- [10] A. Ohji and M. Haraguchi, "Steam turbine cycles and cycle design optimization: The Rankine cycle, thermal power cycles, and IGCC power plants," in *Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants*, Elsevier Inc., 2017, pp. 11–40. doi: 10.1016/B978-0-08-100314-5.00002-6.