

ANALISA EFISIENSI *THERMAL BOILER* TIPE *CIRCULATION FLUIDIZED BED* DI PLTU 3x10MW

Jihan Syalsabila¹⁾, Hendradinata^{2)*}, Fenoria Putri²⁾, Safe'i²⁾, Siproni²⁾, Indra HB²⁾

¹⁾Mahasiswa Program Studi Sarjana Terapan Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Sriwijaya, Jalan Sriwijaya Negara, Bukit Besar - Palembang 30139

²⁾Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Sriwijaya, Jalan Sriwijaya Negara, Bukit Besar - Palembang 30139

*email korespondensi: hendradinata@polsri.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

Received:
28/07/2023

Accepted:
05/10/2023

Online-Published:
13/11/2023

ABSTRAK

Kebutuhan energi listrik semakin meningkat dengan pertumbuhan ekonomi. Salah satu upaya pemerintah untuk meningkatkan produksi listrik adalah dengan adanya Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Boiler adalah alat digunakan untuk menghasilkan uap, yang terdiri dari dua bagian penting, sistem pemanas, yang menghasilkan panas dengan membakar bahan bakar dan sistem yang mengubah air menjadi uap. Persentase unjuk kerja boiler adalah persentase energi yang diserap oleh steam boiler dengan energi masukan bahan bakar. Efisiensi boiler sangat mempengaruhi kinerja PLTU dimana penggunaan bahan bakar mempengaruhi steam yang dihasilkan. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode langsung (*direct method*) dengan mengambil data harian logsheet boiler selama 2 bulan yaitu April dan Mei dengan menggunakan nilai kalori batubara yaitu 5615 kkal/kg dan 5654 kkal/kg. Dari hasil perhitungan didapatkan bahwasannya efisiensi boiler tertinggi yaitu 55,95% dengan nilai kalori batubara 5654 kkal/kg sedangkan efisiensi boiler terendah yaitu 36,29% pada nilai kalori yaitu 5615 kkal/kg. Dari hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwasannya laju alir steam yang tidak konstan dan penggunaan bahan bakar yang berlebih membuat efisiensi boiler mengalami kondisi yang tidak optimal. Nilai kalor batubara dipengaruhi oleh kandungan air yang terdapat didalam batubara. Semakin tinggi kandungan air, semakin banyak energi yang diperlukan untuk proses pembakaran batubara

Kata Kunci : Boiler, Batubara, Efisiensi Thermal, Metode Langsung, Nilai Kalori

ABSTRACT

The need for electrical energy is increasing with economic growth. One of the government's efforts to increase electricity production is with the existence of Steam Power Plants. Boiler or steam generator a tool utilized to generate steam which consists of two important components, namely a heating system to generate heat from burning fuel and a system that converts water into steam. The percentage of boiler performance is the percentage of energy absorbed by the steam boiler with fuel input energy. Boiler performance greatly affects the performance of a PLTU where the use of fuel affects the steam produced. This research was carried out using the direct method by taking daily boiler log sheet data for 2 months, namely April and May, using coal calorific values, namely 5615 kcal/kg and 5654 kcal/kg. The results, the highest boiler efficiency was 55.95% with a calorific value of 5654 coal while the lowest boiler efficiency was 36.29% with a calorific value of 5615 kcal/kg. From the results obtained, it can be concluded that the steam flow rate is not constant and the excessive use of fuel causes boiler efficiency to experience conditions that are not optimal. The calorific value of coal is affected by the water content contained in the coal. The higher the water content, the more energy is required for the coal burning process.

Keywords : boiler, coal, thermal efficiency, direct method, calorific value

© 2023 The Authors. Published by
Machinery: Jurnal Teknologi Terapan
(Indexed in SINTA)

doi:
doi.org/10.5281/zenodo.10122406

1 PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik akan semakin meningkat seiring dengan kemajuan teknologi. Besarnya energi listrik yang dikonsumsi akan berkorelasi dengan kemajuan teknologi. Kebutuhan listrik Indonesia mencapai 1.172 kilowatt-jam per orang pada tahun 2022, dan akan terus meningkat dengan pertumbuhan ekonomi yang diharapkan mencapai 5,3% pada tahun 2023, untuk mencapai hal ini, kapasitas pembangkit harus ditingkatkan (EBTKE, 2023). Salah satu pembangkit yang paling populer untuk memasok listrik di seluruh dunia, termasuk Indonesia adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). PLTU sendiri terdiri beberapa komponen utama yaitu *boiler* (ketel uap), turbin, kondensator dan generator yang tersusun dalam siklus rankine.

Boiler atau ketel uap adalah alat yang digunakan untuk menghasilkan uap yang terdiri dari dua komponen penting yaitu sistem pemanas untuk menghasilkan panas dari pembakaran bahan bakar dan sistem yang mengubah air menjadi uap (Pravitasari et al., 2017). Uap yang bertekanan dan bersuhu tinggi dihasilkan dari proses pemanfaatan energi panas yang dilepaskan selama pembakaran bahan bakar di dalam *boiler*. Uap ini digunakan untuk berbagai hal, termasuk menggerakkan turbin untuk menghasilkan energi mekanik dan kemudian mengubah energi mekanik tersebut menjadi energi listrik didalam generator.

Salah satu PLTU di Indonesia yaitu PLTU yang berada di daerah Sumatera Selatan yang menggunakan *Boiler Type CFB (Circulating Fluidized Bed)* dengan kapasitas 3x10 MW. Pembangkit ini menggunakan bahan bakar batubara sebagai bahan bakar utama dan solar sebagai pemanasan awal. Berdasarkan data histori pembangkit tersebut pada tahun 2022 produksi listrik dan jam jalannya PLTU mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan sering terjadinya gangguan internal yaitu berupa kebocoran pipa yang terdapat didalam *boiler* yang mengakibatkan batubara tercampur dengan *steam* yang berasal dari pipa yang bocor sehingga terjadinya pembakaran yang tidak sempurna didalam ruang bakar, proses produksi *steam* yang mengalami penurunan, sehingga menghambat proses produksi listrik dan pada akhirnya seringkali *boiler* mengalami trip.

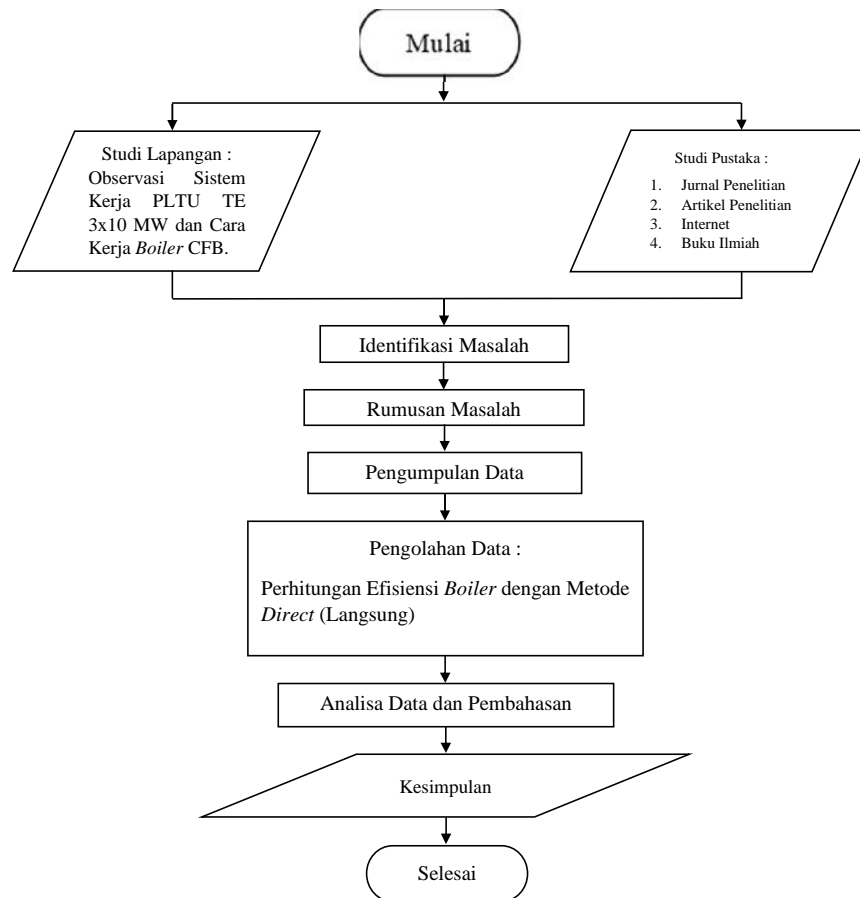
Persentase unjuk kerja *boiler* adalah persentase energi yang diserap oleh *steam boiler* dengan energi masukan bahan bakar (Sahda et al., 2022). Kinerja *Boiler* sangat mempengaruhi kinerja suatu PLTU dimana penggunaan bahan bakar berpengaruh terhadap uap yang dihasilkan. Komposisi bahan bakar didalam proses pembakaran sangat perlu diperhatikan dikarenakan mempengaruhi nilai kalor (Anggreini et al., 2021). Laju alir *steam*, tekanan dan suhu *steam* masuk dan keluar *boiler* adalah beberapa komponen yang memengaruhi efisiensi *boiler* (Muzaki & Mursadin, 2019). Menurut (Pravitasari et al., 2017) pengaruh efisiensi *boiler* disebabkan oleh bahan bakar yang tidak terbakar sempurna. Penelitian yang dilakukan oleh (Arham et al., 2015) menyatakan bahwasannya nilai kalor batubara berpengaruh terhadap efisiensi *boiler* di mana pada situasi operasi tanggal 13 Januari 2014 efisiensi *boiler* mencapai 89,21% dengan nilai kalor batubara sebesar 4256 kkal/kg sedangkan pada situasi operasi tanggal 3 Juni 2014 efisiensi *boiler* mencapai 70,46% dengan nilai kalor batubara sebesar 4005 kkal/kg. Penelitian (Putra et al., 2021) didapatkan hasil bahwasannya nilai LHV sebesar 23.916,31 kJ/kg yang memiliki keefektifan sebesar 65,54% lebih tinggi dibandingkan dengan batubara dengan nilai LHV 23.183,90 kJ/kg memiliki keefektifan sebesar 62,98%. Penelitian (Nanda Kumara et al., 2021) menyatakan laju aliran *steam* mempengaruhi besarnya nilai heat rate pembangkit dimana semakin besar laju *steam* maka heat rate pembangkit akan semakin besar begitu pula sebaliknya. Penelitian (Sandi, 2022) bahwasannya pengaruh nilai Nilai Kalor Terbakar Tinggi (HHV) terhadap kinerja ketel dengan hasil kinerja terbesar yaitu 83,88% pada HHV 4.125 kcal/kg dan terendah sebesar 80,52% pada HHV 4.103 kcal/kg dengan kerugian panas terbesar karena emisi gas kering, pembakaran H₂ dan kelembaban bahan bakar. Menurut (Sumarna et al., 2023) pengaruh kandungan air pada yang memasuki ruang bakar akan mempengaruhi efisiensi *boiler*. Berdasarkan penjelasan diatas dilakukanlah penelitian dengan menggunakan metode langsung (*direct*) dengan mengambil sumber data dari *logsheet* harian kerja *Boiler* di PLTU yang berbahan bakar batubara dan solar sebagai proses pemanasan awal.

2. BAHAN DAN METODA

2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan survei industri untuk mengetahui masalah yang terjadi di industri dengan studi pustaka dan studi lapangan. Setelah menyelesaikan survei penelitian, dilanjutkan dengan mengidentifikasi permasalahan industri yang ada untuk membangun permasalahan yang ada, kemudian mengumpulkan data yang dibutuhkan sebagai data primer dan sekunder terkait permasalahan yang diangkat. Langkah selanjutnya adalah pengolahan dan analisis berdasarkan data yang diperoleh. Proses

penelitian ini memiliki banyak tahapan – tahapan dalam proses melakukan penelitian. Langkah-langkah penelitian ini terdapat pada diagram pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2 Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap yang dikelola oleh salah satu Perusahaan di daerah Sumatera Selatan dengan difokuskan pada unit PLTU Batubara 3x10 MW untuk mengukur efisiensi boiler unit 2 yang terdapat di PLTU tersebut. Boiler yang dimiliki oleh PLTU Batubara 3x10 MW dengan Tipe *Circulation Fluidized Bed*.



Gambar 2. Boiler CFB

2.3 Pengambilan Data

Penelitian ini dilakukan selama dua bulan, April dan Mei 2023. Data sekunder didapatkan dari *logsheet* harian Unit *Boiler* 2 PLTU 3x10 MW. Data yang digunakan adalah laju alir *steam*, temperatur *steam*, tekanan *steam*, temperatur *feedwater*, laju alir massa batubara dan nilai kalori batubara yang didapatkan dari hasil pengujian batubara yang dilakukan setiap bulan oleh PLTU. Variabel data yang diukur setiap dua jam seharusnya memiliki 12 titik data, namun untuk penelitian variabel data yang digunakan adalah rata-rata harian. Data dikumpulkan dari 30 hari pencatatan *daily logsheet* dari April hingga Mei 2023.

2.4 Analisa Data

Analisa yang dilakukan adalah dengan menggunakan metode *direct* (langsung) dengan rumus persamaan sebagai berikut (Çengel, 2017):

$$\eta = \frac{\dot{m}_{steam} \times (h_{steam} - h_{feedwater})}{\dot{m}_{batubara} \times GCV} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan :

\dot{m}_{steam}	= laju alir <i>steam</i>
h_{steam}	= entalpi <i>steam</i>
$h_{feedwater}$	= entalpi <i>feedwater</i>
$\dot{m}_{batubara}$	= massa batubara
GCV	= nilai kalori batubara

Untuk mencari entalpi *steam* menggunakan data tekanan *steam* dan data temperatur *steam* dengan menggunakan persamaan Interpolasi sebagai berikut .

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{h-h_1}{h_2-h_1} \quad (3)$$

Untuk mendapatkan entalpi *steam*, hal pertama yang harus dilakukan adalah melihat data tekanan aktual *steam*. Selanjutnya apabila data tersebut tidak terdapat pada tabel *Appendix Superheated Water Vapor* (Moran, n.d.) maka dilakukan interpolasi pertama dengan menggunakan data tekanan aktual *steam*, temperatur aktual *steam*, tekanan referensi bawah aktual, temperatur referensi atas aktual dan temperatur referensi atas aktual. Selanjutnya untuk interpolasi kedua dilakukan hal yang sama akan tetapi untuk tekanan referensi menggunakan tekanan referensi atas aktual. Setelah didapatkan interpolasi kedua dilakukan interpolasi ketiga menggunakan tekanan aktual, tekanan referensi atas aktual, tekanan referensi bawah aktual, entalpi referensi atas aktual dan entalpi referensi bawah aktual.

Untuk mencari entalpi *feedwater* menggunakan data temperatur *feedwater* dengan menggunakan persamaan interpolasi sebagai berikut.

$$h = \left(\frac{T_{ref.up} - T_{aktual}}{T_{ref.up} - T_{ref.down}} \right) h_{ref.down} + \left(\frac{T_{aktual} - T_{ref.down}}{T_{ref.up} - T_{ref.down}} \right) h_{ref.up} \quad (4)$$

Keterangan :

$T_{ref.up}$	= Temperatur Referensi Atas
$T_{ref.down}$	= Temperatur Referensi Bawah
T_{aktual}	= Temperatur Aktual
$h_{ref.up}$	= Entalpi Referensi Atas
$h_{ref.down}$	= Entalpi Referensi Bawah

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Nilai Kalor Batubara

Berdasarkan data pengujian *proximate* batubara pada bulan April dan Mei didapatkan sesuai dengan Tabel 1.

Tabel 1. Data Pengujian Batubara

No.	Pengambilan Sampel	Hasil Pengujian						GCV (kkal/gr)
		Total Moisture (%)	Moisture Air Dry (%)	Ash (%)	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)	Total Sulfur (%)	
1.	April 2023	23,00	9,79	8,50	40,70	40,01	0,54	5618
2.	Mei 2023	22,67	13,82	5,95	40,10	41,13	0,23	5654

Dapat dilihat berdasarkan data pengujian batubara diatas bahwasannya kandungan *total moisture* berpengaruh didalam proses pembakaran dikarenakan akan mengganggu proses penguapan, kandungan VM (*Volatile Matter*) yang tinggi menyebabkan gangguan proses pembakaran dimana VM memiliki kadar zat yang mudah terbakar sehingga menyebabkan kualitas batubara yang menurun, kadar *ash* (abu) yang tinggi menyebabkan nilai kalor yang rendah, kadar sulfur yang tinggi dapat menyebabkan terjadinya korosi pada pipa sehingga menyebabkan terhambatnya proses perpindahan panas dan kandungan *fixed carbon* yang tinggi maka kualitas batubara semakin meningkat. Dimana semakin meningkatnya kualitas batubara berpengaruh terhadap efisiensi *boiler* didalam penggunaan bahan bakar (Huseini et al., 2018).

3.2 Perhitungan Efisiensi Boiler

Berdasarkan data *daily logsheet* yang telah didapatkan, berikut contoh perhitungan efisiensi untuk tanggal 11 April 2023 dengan data yang terdapat di Tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2. Data Parameter Penelitian

Parameter	Keterangan
GCV	5618 kkal/kg
Massa batubabara	7661 kg/hour
Massa <i>steam</i>	29.297 kg/hour
Entalpi <i>steam</i>	798,004 kkal/kg
Entalpi <i>feedwater</i>	245,095 kkal/kg

$$\eta = \frac{\dot{m}_{steam}(h_{steam} - h_{feedwater})}{GCV \times m_{batubara}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{29.297 \text{ kg/hour} (798,004 \frac{\text{kkal}}{\text{kg}} - 245,095 \text{ kkal/kg})}{5618 \frac{\text{kg}}{\text{hour}} \times 7661 \text{ kkal/kg}} \times 100\%$$

$$\eta = 37,79 \%$$

Untuk data hasil penelitian dari bulan April sampai bulan Mei terdapat pada Tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 3. Data Operasional Boiler dan Efisiensi Boiler

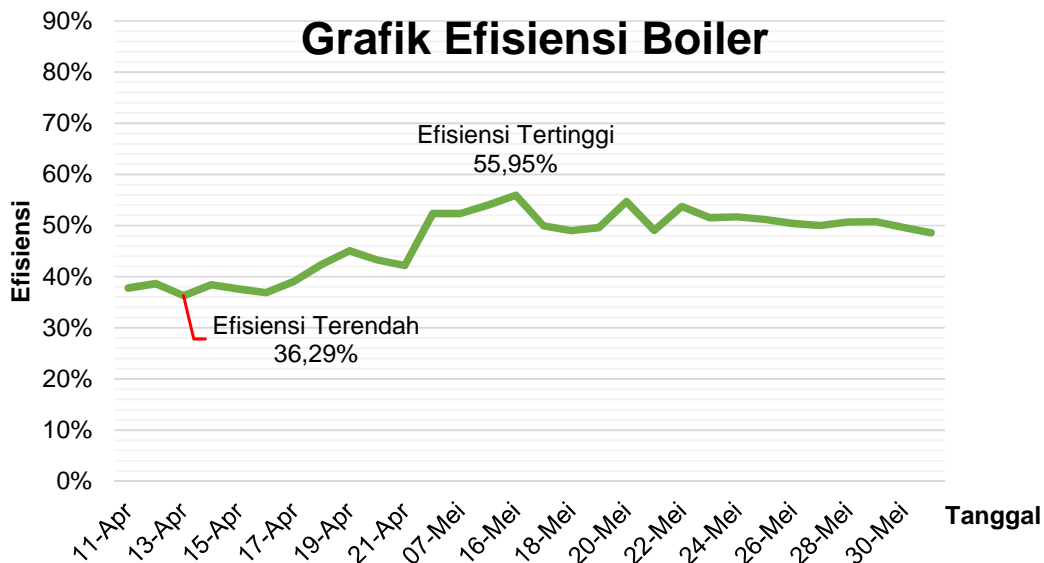
Tanggal	Penggunaan Bahan Bakar (T/hr)	Laju Alir Steam (T/hr)	Beban Generator (MW)	Efisiensi (%)
11/04/2023	7,661 T/hr	29,29 T/hr	122,9 MW	37,79 %
12/04/2023	10,32 T/hr	41,97 T/hr	10,32 MW	38,63 %
13/04/2023	9,81 T/hr	37,78 T/hr	188,93 MW	36,29 %
14/04/2023	10,26 T/hr	41,62 T/hr	219,71 MW	38,41 %
15/04/2023	10,38 T/hr	41,18 T/hr	210,19 MW	37,59 %
16/04/2023	10,66 T/hr	41,52 T/hr	213,22 MW	36,89 %

Tanggal	Penggunaan Bahan Bakar (T/hr)	Laju Alir Steam (T/hr)	Beban Generator (MW)	Efisiensi (%)
17/04/2023	9,14 T/hr	37,77 T/hr	211,10 MW	39,04 %
18/04/2023	9,26 T/hr	41,43 T/hr	209,25 MW	42,40 %
19/04/2023	9,15 T/hr	43,50 T/hr	220,98 MW	45,03 %
20/04/2023	9,47 T/hr	43,44 T/hr	219,19 MW	43,31 %
21/04/2023	9,49 T/hr	42,11 T/hr	53,72 MW	42,16 %
06/05/2023	2,57 T/hr	14,01 T/hr	87,41 MW	52,33 %
07/05/2023	4,16 T/hr	23,46 T/hr	113,07 MW	52,33 %
15/05/2023	5,91 T/hr	33,86 T/hr	126,28 MW	54,00 %
16/05/2023	6,78 T/hr	38,78 T/hr	198,93 MW	55,95 %
17/05/2023	6,88 T/hr	46,50 T/hr	190,15 MW	49,94 %
18/05/2023	7,22 T/hr	37,78 T/hr	193,35 MW	49,02 %
19/05/2023	7,84 T/hr	41,47 T/hr	207,97 MW	49,59 %
20/05/2023	6,83 T/hr	39,87 T/hr	200,68 MW	54,72 %
21/05/2023	7,05 T/hr	36,87 T/hr	195,21 MW	49,09 %
22/05/2023	6,80 T/hr	38,70 T/hr	199,79 MW	53,73 %
23/05/2023	7,45 T/hr	40,89 T/hr	210,48 MW	51,53 %
24/05/2023	7,59 T/hr	41,72 T/hr	214,67 MW	51,73 %
25/05/2023	7,74 T/hr	42,14 T/hr	211,32 MW	51,19 %
26/05/2023	7,73 T/hr	41,46 T/hr	213,18 MW	50,44 %
27/05/2023	7,53 T/hr	40,28 T/hr	215,61 MW	50,00 %
28/05/2023	7,66 T/hr	41,32 T/hr	202,15 MW	50,68 %
29/05/2023	7,69 T/hr	41,62 T/hr	210,17 MW	50,78 %
30/05/2023	7,68 T/hr	40,58 T/hr	213,03 MW	49,65 %
31/05/2023	7,68 T/hr	41,59 T/hr	213,77 MW	48,58 %

3.3 Pembahasan

3.3.2 Analisa Efisiensi Boiler

Dari data yang didapatkan dapat dilihat grafik efisiensi boiler pada bulan April dan Mei dibawah ini.



Gambar 3. Grafik Efisiensi Boiler

Dapat dilihat pada grafik bahwasannya efisiensi *boiler* tertinggi yaitu 55,95% sedangkan efisiensi *boiler* terendah yaitu 36,29%. Hal ini dapat dilihat bahwasannya nilai kalori batubara berpengaruh terhadap nilai efisiensi *boiler* dikarenakan rata – rata efisiensi pada bulan Mei yaitu 51,33% dengan nilai kalor batubara yaitu 5.654 kkal/kg sedangkan rata – rata efisiensi pada bulan April yaitu 36,89% dengan nilai kalor batubara yaitu 5.618 kkal/kg. Pada grafik juga dapat dilihat bahwasannya efisiensi *boiler* mengalami kenaikan dan penurunan yang sangat tidak konstan hal ini disebabkan oleh pemakaian batubara dan laju alir *steam* dikarenakan efisiensi merupakan persentase energi yang diserap oleh *steam boiler* dengan energi masukan bahan bakar.

Dari hasil yang diperoleh dapat dilihat bahwasannya laju alir *steam* yang tidak konstan dan penggunaan bahan bakar yang berlebih membuat efisiensi *boiler* mengalami kondisi yang tidak optimal. Dimana kondisi bahan bakar yang berlebih disebabkan terjadinya kebocoran pada pipa *water wall boiler* berdasarkan data histori gangguan operasi *boiler* pada bulan April sehingga menyebabkan pemborosan pemakaian bahan bakar. Nilai kalor yang tinggi dapat menghemat pemakaian batubara sedangkan semakin rendah nilai kalor yang digunakan dapat membuat pemakaian batubara boros. Hal ini dikarenakan pada hasil pengujian batubara nilai Total *Moisture* pada bulan April yaitu 23,00% sedangkan pada bulan Mei yaitu 22,67%. Nilai kalor batubara dipengaruhi oleh kandungan air yang terdapat didalam batubara. Semakin tinggi kandungan air, semakin banyak energi yang diperlukan untuk proses pembakaran batubara. Selain itu semakin tinggi dan rendah kandungan *fixed carbon*, *sulfur*, *ash* dan *volatile matter* mempengaruhi kualitas batubara, dimana kualitas batubara ini akan berpengaruh terhadap nilai kalori batubara.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian diatas dapat disimpulkan yaitu efisiensi tertinggi yaitu pada tanggal 16 Mei 2023 yaitu 55,95% dengan nilai kalori batubara 5.654 kkal/kg sedangkan efisiensi terendah yaitu pada tanggal 16 April 2022 yaitu 36,89% dengan nilai kalori batubara 5.618 kkal/kg. Efisiensi *boiler* dapat dikatakan dalam kondisi yang tidak baik dikarenakan efisiensi aktual lebih kecil dari efisiensi desain sehingga perlu dilakukannya *overhaul* pada *boiler* guna meningkatkan efisiensi *boiler*, dimana efisiensi desain *boiler* sendiri yaitu 90,27%.

Nilai kalori batubara memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi *boiler*. Kualitas kandungan batubara yang digunakan yaitu semakin tinggi kandungan *moisture* (air) didalam batubara maka semakin banyak energi yang diperlukan untuk proses pembakaran batubara. Selain itu semakin rendah kandungan air, maka semakin tinggi nilai kalori batubara tersebut. Semakin tinggi kandungan *fixed carbon* dapat meningkatkan kualitas batubara sedangkan semakin tinggi kandungan *sulfur*, *ash* dan *volatile matter* maka menyebabkan semakin menurunnya kualitas batubara.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggreini, D., Bahtiar, S., Widyawati, F., & Hidayat, S. (2021). *Science and Technology Analisis Hubungan Kandungan Total Moisture , Total Sulphur*. 5(3), 50–55.
- Arham, A., Septiawan, M. Y., Bhuana, C., & Mulyadi, M. (2015). *Evaluasi Kinerja Boiler Combustion Fluidized Bed (Cfb) Di Pt . Pln (Persero) Unit Pltu Barru*. 75–88.
- Çengel, Y. A. (2017). *Fundamentals of fluid-thermal sciences*. In *McGraw-Hill Education* (Vol. 2, Issue 27).
- EBTKE, H. (2023). *Dirjen EBTKE Paparkan Pemenuhan Kebutuhan Listrik Indonesia Melalui Pemanfaatan EBT*. EBTKE. [https://ebtke.esdm.go.id/post/2023/01/20/3405/dirjen.ebtke.paparkan.pemenuhan.kebutuhan.listrik.indonesia.melalui.pemanfaatan.ebt#:~:text="Pada tahun 2022%2C kebutuhan listrik,energi baru terbarukan \(EBT\).](https://ebtke.esdm.go.id/post/2023/01/20/3405/dirjen.ebtke.paparkan.pemenuhan.kebutuhan.listrik.indonesia.melalui.pemanfaatan.ebt#:~:text=)
- Huseini, F., Solihin, & Pramusanto. (2018). *Kajian Kualitas Batubara Berdasarkan Analisis Proksimat, Total Sulfur dan Nilai Kalor Untuk Pembakaran Bahan Baku Semen di PT Semen Padang Kelurahan Batu Gadang, Kecamatan Lubuk Kilangan, Kota Padang Provinsi Sumatera Barat*. *Prosiding Teknik Pertambangan*, 4(2), 668–677.
- Moran, M. J. (n.d.). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics Seventh Edition*.
- Muzaki, I., & Mursadin, A. (2019). *Analisis Efisiensi Boiler Dengan Metode Input– Output Di Pt. Japfa Comfeed Indonesia Tbk. Unit Banjarmasin*. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 4(1), 37–46. <https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v4i1.50>
- Nanda Kumara, I., Hie Khwee, K., Teknik Elektro, J., Teknik, F., & Tanjungpura Jln Hadari Nawawi, U. H.

- (2021). Studi Pengaruh Heat Rate Terhadap Kinerja Pada Pitu Biomassa Di Pt. Harjohn Timber. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura*, 2(1).
<https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jteuntan/article/view/48817/75676590332>
- Pravitasari, Y., Malino, M. B., & Mara, M. N. (2017). Analisis Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Langsung. *Prisma Fisika*, V(01), 9–12.
- Putra, B. R., Mangala, L. K., & Gunawan, Y. (2021). Analisis Pengaruh Nilai Kalor Batubara Dan Excess Air Terhadap Efisiensi Boiler. *Enthalpy*, 6(1), 12–17.
- Sahda, N. T., Sentosa, J. M., & Adhani, L. (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. <https://doi.org/10.31599/joes.v1i1.979>
- Sandi, R. P. (2022). Pengaruh Kualitas Batubara Terhadap Efisiensi Boiler Tipe CFB Unit 3 PLTU Jeranjang Lombok Barat dengan Metode ASME PTC 4. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(3), 85–92.
<https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jtm-unesa/article/view/50146/41297>
- Sumarna, H., Hidayati, B., Ramadhoni, T. S., Okviyanto, T., Anwar, Z., & Imam Rifa'i, A. (2023). Analisis Pengaruh Total Dry Solid Black Liquor. *Machinery Jurnal Teknologi Terapan*, 4(2), 120–127.