

ANALISA FAKTOR PENYEBAB PERUBAHAN EFISIENSI BOILER PADA BEBAN 300 MW DENGAN BAHAN BAKAR LOW RANK COAL PADA BOILER UNIT 10 PT. PLN NUSANTARA POWER UP REMBANG

Khaidin¹, Arif Rahman Saleh², Fuad Hilmy³,

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Magelang, Jawa Tengah, Indonesia

Email : ¹khaidin155@gmail.com, ²arifrahmansaleh@untidar.ac.id, ³fuadhilmy@untidar.ac.id

ABSTRAK

Boiler merupakan salah satu komponen utama pada sistem PLTU yaitu sebagai penghasil uap, maka performa boiler harus dijaga agar produksi uap maksimal, apabila terjadi permasalahan pada sistem boiler maka dapat menghambat kinerja dan energi yang dihasilkan. Boiler unit 10 di PT. PLN Nusantara Power Unit Pembangkit Rembang beroperasi dari tahun 2011 jadi sudah cukup lama boiler beroperasi sehingga unjuk kerjanya mengalami banyak penurunan. Dengan kondisi ini perlu dilakukan pengkajian tentang studi dan analisis unjuk kerja boiler, dengan tujuan untuk mengetahui faktor penyebab perubahan efisiensi boiler dan upaya untuk mereduksi nilai *losses* akibat *moisture in fuel*, yaitu dengan metode *blending* dengan rasio 25% LRC: 75% MRC dan 50% LRC: 50% MRC. Dari hasil perhitungan dan analisa diketahui faktor penyebab perubahan efisiensi boiler yaitu kerugian yang cukup besar pada gas buang kering 6,888%, *moisture* pada pembakaran H₂ sebesar 4,010%, dan *moisture* pada batubara sebesar 5,632%. Selain itu presentase *exces air* juga mempengaruhi perubahan efisiensi boiler, terlihat pada campuran batubara 75% LRC:25% MRC memiliki presentase *exces air* 33,887%, yang seharusnya dapat meningkatkan efisiensi boiler namun dengan tingginya presentase *exces air* justru efisiensi boiler mengalami penurunan. Metode *blending* juga mampu mereduksi nilai *losses* akibat *moisture in fuel* sebesar 0,6%.

Kata kunci: efisiensi boiler, metode *blending*, *losses moisture in fuel*

ABSTRACT

The boiler is one of the main components in the PLTU system, namely as a steam producer, so the boiler performance must be maintained so that maximum steam production, if there is a problem in the boiler system it can hamper the performance and energy produced. Boiler unit 10 at PT. PLN Nusantara Power Unit Rembang Power Plant has been operating since 2011 so that the boiler has been operating for quite a long time so that its performance has decreased a lot. With this condition, it is necessary to conduct an assessment of the study and analysis of boiler performance, with the aim of determining the factors causing changes in boiler efficiency and efforts to reduce the value of losses due to moisture in fuel, namely by blending method with a ratio of 25% LRC: 75% MRC and 50% LRC: 50% MRC. From the results of calculations and analysis, it is known that the factors causing changes in boiler efficiency are considerable losses in dry flue gas of 6.888%, moisture in H₂ combustion is 4.010%, and moisture in coal is 5.632%. In addition, the percentage of water *exces* also affects changes in boiler efficiency, seen in the coal mixture 75% LRC: 25% MRC has a percentage of water *exces* of 33.887%, which should be able to increase boiler efficiency but with the high percentage of water *exces*, boiler efficiency decreases. The blending method is also able to reduce the value of losses due to moisture in fuel by 0.6%.

Keywords: boiler efficiency, blending method, *losses moisture in fuel*

PENDAHULUAN

Boiler merupakan komponen penting dalam sistem PLTU karena berfungsi untuk memproduksi uap bertemperatur dan bertekanan tinggi, yang mana uap nanti digunakan untuk memutar turbin, untuk menghasilkan energi listrik. Sehingga apabila boiler bermasalah maka dapat menghambat kinerja dan energi yang dihasilkan untuk proses industri. Pada saat boiler beroperasi kemungkinan besar akan terjadi kehilangan jumlah energi pada suatu komponennya. Berdasarkan *standard* pengoperasian boiler, terdapat beberapa potensi kehilangan panas yang mengakibatkan pada penurunan kinerja boiler [1].

Boiler unit 10 di PT. PLN Nusantara Power Unit Pembangkit Rembang sudah beroperasi dari tahun 2011 sampai sekarang, jadi sudah cukup lama boiler beroperasi sehingga unjuk kerjanya mengalami banyak penurunan. Dengan kondisi ini perlu dilakukan pengkajian tentang studi dan analisis unjuk kerja boiler. Dari analisa yang didapat nantinya diharapkan dapat dilakukan tindak lanjut yang berdampak pada penurunan nilai kehilangan panas sehingga dapat meningkatkan efisiensi boiler [8].

Beberapa peneliti telah melakukan *research* tentang *performance* dari boiler, seperti penelitian yang telah dilakukan pada PLTU PT. Indonesia Power UBP Perak untuk menganalisis unjuk kerja boiler yang beroperasi sejak 1978. Boiler tersebut tergolong tua sehingga banyak mengalami penurunan unjuk kerja. Boiler mengalami penurunan performa sebesar 14,15%. Dari 87,35% pada saat komisioning menjadi 73,20% pada kondisi sekarang. Penurunan performa ini diakibatkan adanya pengotor pada bahan bakar dan air umpan dengan indikasi naiknya gas buang dari 11,25% menjadi 14,85% [1].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka pada penelitian ini penulis akan melakukan analisa faktor penyebab perubahan efisiensi boiler di PT. PLN Nusantara Power Unit Pembangkit

Rembang dan bagaimana upaya yang harus dilakukan untuk mereduksi nilai *heat losses* akibat *moisture in fuel*. dimana berdasarkan penelitian terdahulu kerugian panas karena *moisture* pada batubara termasuk dalam nilai *losses* yang paling tinggi pada sistem boiler. Dengan meminimalisir nilai kerugian panas pada sistem boiler maka diharapkan dapat meningkatkan efisiensi kinerja boiler. Peningkatan efisiensi boiler tenaga fosil dapat berkontribusi dalam menghemat sejumlah bahan bakar dan mengurangi emisi karbon dioksida [9].

Pada penelitian ini, metode yang akan digunakan yaitu *coal blending* untuk mereduksi nilai *losses* akibat kandungan *moisture in fuel* pada boiler unit 10 di PT. PLN Nusantara Power UP Rembang 2 × 300 MW dengan bahan bakar *Low Rank Coal* (LRC) yang dicampur dengan batubara *Medium Rank Coal* (MRC) dengan rasio *blending* yang berbeda, dimana menurut penelitian terdahulu batubara jenis *low rank coal* mempunyai kadar air (*moisture content*) yang cukup tinggi yaitu sekitar 15-35% dan nilai kalor yang rendah yaitu kurang dari 5000 kcal/kg, dengan demikian diperlukan metode untuk meningkatkan kualitas batubara tersebut agar dapat mereduksi nilai *losses* yang tinggi akibat *moisture in fuel* dan mendapatkan efisiensi penggunaan yang baik. Dengan metode *coal blending* ini diharapkan dapat menurunkan nilai *losses* akibat *moisture in fuel*, sehingga dapat memaksimalkan pemanfaatan setiap energi dalam boiler guna meningkatkan efisiensi [2].

METODE

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PT. PLN Nusantara Power Unit Pembangkit Rembang yang beralamat di Jalan Raya Semarang-Surabaya Km. 130 Desa Leran, Kecamatan Sluke, Kabupaten Rembang, Provinsi Jawa Tengah. Dimana waktu penelitian akan dilaksanakan mulai bulan April 2023-Mei 2023.

Alat dan Bahan

1. Laptop

Digunakan untuk melakukan proses pengambilan data, perhitungan data dan proses analisis data

2. Program *software microsoft excel*

Digunakan untuk melakukan perhitungan dan pengambilan data

3. Komputer operasi UP Rembang

Digunakan untuk pengambilan data hasil operasi boiler unit 10 UP Rembang

4. Data spesifikasi boiler UP Rembang

Digunakan untuk mengetahui jenis boiler yang digunakan dan berapa kapasitas uap yang dapat dihasilkan

5. Data operasi boiler UP Rembang

Digunakan untuk menghitung presentase kehilangan panas (*loses*) dan menghitung efisiensi kinerja boiler

6. Data kualitas batubara UP Rembang

Digunakan untuk menghitung kebutuhan udara untuk proses pembakaran.

Prosedur Penelitian

1. Studi literatur

Mencari dan mengumpulkan informasi yang ada kaitannya dengan penelitian yang akan dilakukan baik teori maupun rumus-rumus perhitungan dari sumber beberapa jurnal di internet, e-book, dan juga buku-buku di perpustakaan PT. PLN Nusantara Power Unit Pembangkit Rembang.

2. Pengumpulan data

Pengambilan data dilakukan di ruangan rendal operasi PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkit Rembang, dengan didampingi oleh pembimbing lapangan. Data yang dibutuhkan yaitu data spesifikasi boiler, data *performance test* boiler, data kualitas batubara, data persamaan efisiensi boiler.

3. Pengolahan data

Setelah tahap pengumpulan data tahap selanjutnya yaitu mengolah data dan melakukan perhitungan terhadap data yang diperoleh untuk menyelesaikan penelitian ini, antara lain:

a. Menghitung keperluan udara teoritis

b. Menghitung presentase *excces air*

c. Menghitung gas buang kering

d. Menghitung *heat loss* gas buang kering

e. Menghitung *heat loss moisture* karena pembakaran H₂

f. Menghitung *heat loss moisture* di batubara

g. Menghitung *heat loss moisture* di udara

h. Menghitung *heat loss* pembakaran tidak sempurna

i. Menghitung *heat loss* radiasi dan konveksi

j. Menghitung *heat loss* karbon yang tidak terbakar, yaitu menghitung *fly ash* dan *bottom ash* yang tidak terbakar

k. Menghitung efisiensi boiler.

4. Analisis data

Setelah mendapatkan data-data yang dibutuhkan kemudian penulis melakukan analisis dari hasil perhitungan sesuai dengan literatur dan referensi yang telah penulis kaji. Dalam teknik analisis data penulis menjelaskan tentang analisis hasil perhitungan pengaruh metode *blending* batubara terhadap nilai efisiensi boiler sebagai berikut:

1. Analisis hasil efisiensi boiler pada tiap batubara hasil *blending*

2. Analisis persentase kehilangan panas karena *moisture in fuel* pada tiap batubara hasil *blending*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Data kualitas batubara 100% LRC

Parameter	Satuan	Analisis	Nilai
HHV	kcal/kg	Coal	4125,70
Carbon	%	Ultimate	42,30
Hidrogen	%	Ultimate	2,65
Oxygen	%	Ultimate	15,04
Sulfur	%	Ultimate	0,13
Nitrogen	%	Ultimate	1,25
Ash	%	Ultimate	4,05
Moisture	%	Ultimate	34,58
Fixed Carbon	%	Proximate	30,11

Tabel 1. (Lanjutan)

Parameter	Satuan	Analisis	Nilai
Volatile Matter	%	Proximate	31,26
Carbon in fly ash	%	Proximate	0,23
Carbon in Bottom ash	%	Proximate	1,55

Tabel 2. Data performance test boiler bahan bakar 100% LRC

No	Parameter	Satuan	Nilai
1	General Output	MW	294,24
2	Coal Flow	t/h	194,15
3	Main Steam Pressure	Mpa	15,31
4	Main Steam Temperature	°C	539,47
5	Main Steam Flow	t/h	907,55
6	Feed Water Pressure	kg/cm ²	17,39
7	Feed Water Temperature	°C	2777,5
8	Feed Water Flow	t/h	1023,0
9	%CO ₂ In Flue Gas	%	13,85
10	%O ₂ In Flue Gas	%	5,28
11	% CO In Flue Gas	%	0,68
12	Average Flue Gas Temperature	°C	166,46
13	Humidity In Ambient Air	kg/kg dry air	0,02
14	Ambient Temperature	°C	31,05
15	Unburn Carbon in Fly Ash	%	0,23
16	GCV Fly Ash	kcal/kg	395
17	Unburn Carbon in Bottom Ash	%	1,55
18	GCV Bottom Ash	kcal/kg	889

Setelah diperoleh data kualitas batubara dan data performance boiler, maka dapat dilakukan perhitungan efisiensi boiler sebagai berikut:

1. Menghitung udara kebutuhan teoritis

$$(O_2) t = (11,6 C) + (34,8 (H_2 - O_2/8)) + (4,35 S)/100$$

$$(O_2) t = (11,6 \times 42,3) + (34,8 (2,65 - 15,04/8)) + (4,35 \times 0,13)/100$$

$$(O_2) t = 5,18 \text{ kg/kg coal}$$

2. Menghitung persentase Excess air (EA) menggunakan persamaan 2.3

$$EA = \frac{\%O_2 \text{ in fluegas}}{21 - \%O_2 \text{ in fluegas}} \times 100\%$$

$$EA = \frac{5,28}{21 - 5,28} \times 100\% = 33,58\%$$

3. Menghitung udara AAS

$$AAS = \left(1 + \frac{EA}{100}\right) \times \text{theoretical air}$$

$$AAS = \left(1 + \frac{33,58}{100}\right) \times 5,18$$

$$AAS = 6,92 \text{ kg/kg coal}$$

4. Menghitung kerugian panas gas buang kering

$$L1 = \frac{m \times cp \times (Tf - Ta)}{HHV \text{ Batubara}} \times 100$$

$$L1 = \frac{7,29 \times 0,24 \times (166,4 - 31,05)}{HHV \text{ Batubara}} \times 100$$

$$L1 = 5,741\%$$

5. Menghitung kerugian panas karena moisture dari H₂

$$L2 = \frac{9 \times H_2(584 \times CP(Tf - Ta))}{HHV \text{ Batubara}} \times 100$$

$$L2 = \frac{9 \times 0,026(584 \times 0,65(166 - 31,05))}{4125,7 \text{ kcal/kg}} \times 100$$

$$L2 = 3,884\%$$

6. Menghitung kerugian panas karena moisture di batubara

$$L3 = \frac{m \times (584 \times CP(Tf - Ta))}{HHV \text{ Batubara}} \times 100$$

$$L3 = \frac{0,345 \times (584 \times 0,65(166 - 31,05))}{4125,7 \text{ kcal/kg}} \times 100$$

$$L3 = 5,632\%$$

7. Menghitung kerugian panas karena moisture udara

$$L4 = \frac{AAS \times humidity \times CP(Tf - Ta)}{HHV \text{ Batubara}} \times 100$$

$$L4 = \frac{6,92 \times 0,02 \times 0,65(166,4 - 31,05)}{HHV \text{ Batubara}} \times 100$$

$$L4 = 0,295\%$$

8. Menghitung kerugian panas karena pembakaran tidak sempurna

$$L5 = \frac{\%CO \times C}{\%CO + \%CO_2} \times \frac{5744}{HHV \text{ Batubara}} \times 100$$

$$L5 = \frac{0,68 \times 42,3/100}{0,68 + 13,85} \times \frac{5744}{4125,7} \times 100$$

9. Menghitung kerugian panas karena karbon yang tidak terbakar pada *fly ash*

$$L7 = \frac{\text{carbon in fly ash} \times \text{HHV fly ash}}{\text{HHV Batubara}} \times 100$$

$$L7 = \frac{0,23 \times 395}{4125,7} \times 100 = 0,022\%$$

10. Menghitung kerugian panas karena karbon yang tidak terbakar pada *bottom ash*

$$L8 = \frac{\text{carbon in bottom ash} \times \text{HHV fly ash}}{\text{HHV Batubara}} \times 100$$

$$L8 = \frac{1,55 \times 899}{4125,7} \times 100 = 0,333\%$$

11. Menghitung efisiensi boiler

$$(p) = 100 - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8)$$

$$(p) = 100 - (5,74\% + 3,88\% + 5,63\% + 0,29\% + 2,75\% + 0,2\% + 0,02\% + 0,33\%)$$

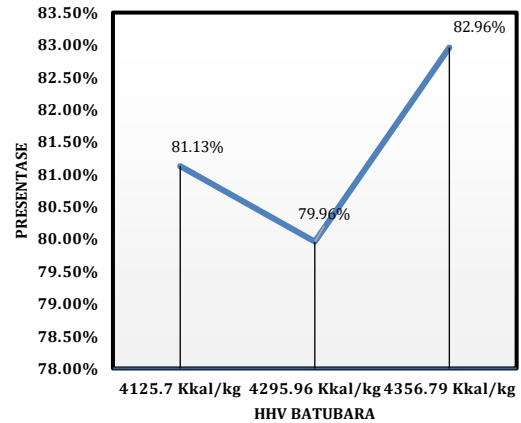
$$(p) = 81,13\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai efisiensi boiler pada masing masing batubara hasil *blending*, dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Efisiensi boiler

Parameter	Satuan	100 LRC	75 LRC	50 LRC
O ₂ Teoritis	kg/kg coal	5,18	5,72	5,296
Excess Air	%	33,587	33,8	21,8
AAS	kg/kg coal	6,920	7,66	6,45
Massa gas buang	kg/kg coal	7,292	8,03	6,81
L1	%	5,741	6,88	4,95
L2	%	3,884	4,01	3,86
L3	%	5,632	5,23	4,99
L4	%	0,295	0,44	0,266
L5	%	2,756	2,40	2,811
L6	%	0,2	0,2	0,2
L7	%	0,022	0,03	0,029
L8	%	0,333	0,81	0,183
Jumlah losses	%	18,86	20,0	17,30
Efisiensi boiler	%	81,13	79,9	82,69

Analisis efisiensi boiler



Gambar 1. Efisiensi Boiler

Grafik hasil perhitungan nilai efisiensi boiler yang diperoleh pada masing-masing campuran batubara dapat terlihat dari gambar 1, Pada batubara campuran 50% LRC:50% MRC terlihat adanya peningkatan nilai efisiensi. Besarnya peningkatan rasionya terbilang tidak cukup besar, namun untuk ukuran sebuah efisiensi atau unjuk kerja dari boiler, nilai penambahan tersebut merupakan suatu hasil kerja yang baik [4]. Hasil perhitungan tersebut sesuai dengan penelitian yang sudah dilakukan oleh [5] bahwa semakin tinggi nilai kalor batubara maka semakin bagus nilai efisiensinya. Namun pada nilai campuran 75% LRC:25% MRC justru mengalami penurunan efisiensi hal ini dikarenakan tingginya nilai *exces air* sehingga mengakibatkan tingginya kerugian panas karena gas buang. Kondisi ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh [3] bahwa semakin tinggi nilai *exces air* maka efisiensi semakin turun, karena semakin tinggi nilai kalor batubara maka *exces air* yang dibutuhkan semakin rendah. Dari penelitian ini dapat disimpulkan *blending* batubara mempengaruhi nilai efisiensi boiler, namun berdasarkan perhitungan didapatkan bahwa untuk menentukan *blending* yang optimal tidak hanya berdasarkan nilai kalori batubara, akan tetapi penentuan *blending* berdasarkan pada setiap kandungan yang dimiliki batubara, sehingga mendapatkan nilai efisiensi yang optimal. Nilai efisiensi

juga dipengaruhi operasi boiler dan jumlah pasokan udara. Jika pasokan udara berlebih kepada boiler sangat tinggi, walaupun menggunakan *blending* batubara dengan kualitas tinggi akan menghasilkan nilai efisiensi yang rendah. Jadi untuk mendapatkan nilai efisiensi yang optimal dibutuhkan keadaan operasi yang sesuai dengan *blending* batubara [4].

Analisis *loses moisture in fuel*

Tabel 4. *Loses moisture in fuel*

Parameter	Beban 300 MW		
HHV	4125,70	4295,96	4356,79
Batubara	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
<i>Loses</i>			
<i>Moisture in fuel</i>	5,632%	5,237%	4,998%
<i>Moisture content</i>	34,58%	32,91%	32,51%

Dapat dilihat dari tabel 4, bahwa nilai kadar *moisture* pada batubara menjadi faktor utama penyebab dari kerugian panas karena *moisture in fuel*. Pada batubara nilai kalori 4125,70 kcal/kg yaitu dengan bahan bakar 100% LRC mengalami kerugian panas paling besar yaitu 5,63% penyebab kerugian panas ini adalah kelembapan batubara yang meningkat karena tingginya kadar *moisture* batubara. Kandungan air bahan bakar batubara yang terlalu banyak mengakibatkan kehilangan panas yang lebih besar karena air menyerap panas untuk menaikkan titik didih bahan bakar batubara selama proses pembakaran [7]. Setelah dilakukan proses *blending* batubara dengan rasio 75% LRC: 25% MRC dengan nilai kalori 4295,96 kcal/kg, kerugian panas menjadi 5,23%. Dan kerugian panas terendah yaitu pada batubara campuran 50% LRC:50% MRC nilai kalori 4356,79 kcal/kg dengan kandungan *moisture* terendah yaitu 32,51%. Dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai kadar *moisture* pada kandungan batubara semakin besar kerugian panas akan kandungan air pada bahan bakar. Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh [6].

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan analisa yang dilakukan pada *blending* batubara maka dapat dibuat kesimpulan sebagai berikut:

1. Faktor yang mempengaruhi perubahan efisiensi boiler di UP Rembang adalah tingginya nilai kehilangan panas pada boiler saat beroperasi. Kerugian yang cukup besar yaitu dikarenakan adanya kerugian panas akibat massa gas buang kering yaitu sebesar 6,888%, *moisture* pada pembakaran H₂ sebesar 4,010%, dan *moisture* didalam batubara dengan presentase sebesar 5,632%. Selain itu jumlah presentase *exces air* juga mempengaruhi perubahan efisiensi boiler, terlihat pada campuran batubara 75% LRC:25% MRC yang memiliki presentase *exces air* paling tinggi yaitu sebesar 33,887%, yang seharusnya dengan nilai kalor yang tinggi dapat meningkatkan efisiensi boiler namun dengan tingginya presentase *exces air* justru efisiensi boiler mengalami penurunan, yang awalnya efisiensi boiler mencapai 81,13% turun menjadi 79,96%.
2. Dari hasil *blending* batubara dapat mereduksi nilai *loses* akibat *moisture in fuel* sebesar 0,64% yang mana sebelum dilakukan *blending* kerugian karena *moisture in fuel* mencapai 5,632% setelah dilakukan *blending* dengan rasio 50% LRC:50% MRC nilai *loses* menjadi 4,998 %, walaupun besarnya penurunan terbilang tidak cukup besar, namun untuk ukuran sebuah efisiensi atau unjuk kerja dari boiler, nilai penurunan tersebut merupakan suatu hasil kerja yang baik untuk meningkatkan efisiensi boiler.

SARAN

1. Bagi Peneliti Selanjutnya
Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik lagi untuk penelitian kedepannya, disarankan melakukan upaya untuk

mereduksi seluruh nilai *losses* yang menyebabkan penurunan efisiensi boiler

2. Bagi Perusahaan

Setelah melihat hasil perhitungan dan analisa yang telah dilakukan, maka sebaiknya UP Rembang menggunakan *blending* batubara pada rasio 50% LRC:50% MRC dengan nilai efisiensi paling tinggi yaitu sebesar 82,96 %. Dan juga perlu adanya perbaikan di UP Rembang dalam kontrol pengaturan bahan bakar dan udara yang masuk untuk menghasilkan nilai efisiensi yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Asmudi. (2008). Analisa Unjuk Kerja Boiler Terhadap Penurunan Daya Pada PLTU PT. Indonesia Power UBP Perak. *Laporan Tugas Akhir Fakultas Teknologi Kelautan ITS: Surabaya*, 1–15.

[2] Baaqy, L., Arias, G., Rachimoellah, M., & Nenu, R. K. T. (2013). Pengeringan Low Rank Coal dengan Menggunakan Metode Pemanasan tanpa Kehadiran Oksigen. *Jurnal Teknik Pomits*, 2(2), No. 2.

[3] Gunawan, W., & Ali, B. (2020). Studi Efisiensi Boiler Terhadap Nilai Kalor Batubara Pada Boiler Jenis Pulverizer Coal Kapasitas 300 T/H Studi Kasus PT XYZ. *Jurnal InTent*, 3(2), 122–130.

[4] Prayoga, T. A. (2020). *Optimasi Coal Blending Terhadap Efisiensi Boiler Di Unit 7 PT. Indonesia Power Suralaya PGU* [Skripsi, Institut Teknologi PLN].

[5] Priyantoro, F. H. (2020). *Optimasi Coal Blending Terhadap Efisiensi Boiler di Unit 1 Pltu Banten 3 Lontar Omu* [Skripsi, Institut Teknologi PLN].

[6] Sagaf, M., & Alim, S. (2018). Analisa faktor-faktor penyebab perubahan efisiensi boiler jenis pulverized coal fired forced circulation sub-critical pressure menggunakan metode tak langsung. *Teknoin*, 24(2), 147–158.

[7] Sandi, R. P., & Effendy, M. (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.

[8] Sangputri, M. E., S, A. G., Studi, P., Pembangkit, S., Teknik, D., & Boiler, A. P. (2015). Perhitungan Efisiensi Boiler PLTU UNIT 20 PT. PJB UBJOM Rembang Pada Beban 300 MW Dengan Menggunakan Metode Langsung (Direct Method). *Jurnal Kerja Praktek*, 1(1), 1–6.

[9] Song, C., Li, M., Zhang, F., He, Y. L., & Tao, W. Q. (2015). A data envelopment analysis for energy efficiency of coal-fired power units in China. *Energy Conversion and Management*, 102, 121–130.