

# **ANALISIS EFISIENSI *BOILER* MENGGUNAKAN METODE LANGSUNG DAN TIDAK LANGSUNG PADA PT PLN NUSANTARA POWER UP UNIT 9 KAPASITAS 660 MW**

Andhika Rifqi Putra Pratama<sup>1</sup>, Eko Naryono<sup>1</sup>, Novan Kurnia Yusuf<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

<sup>2</sup> PT PLN Nusantara Power UP Paiton Unit 9, Jl. Raya Surabaya – Situbondo Km. 141, Probolinggo 67291, Indonesia

[pandhika882@gmail.com](mailto:pandhika882@gmail.com) ; [eko.naryono@polinema.ac.id](mailto:eko.naryono@polinema.ac.id)

## **ABSTRAK**

*Boiler* adalah komponen utama dalam sistem tenaga uap yang berfungsi untuk memproduksi uap guna menggerakkan turbin. Pada PT PLN Nusantara Power Unit 9 Paiton menggunakan *boiler* jenis *coal fired drum* dengan bahan bakar batubara untuk menghasilkan campuran fase cair dan uap yang selanjutnya kedua fase dipisahkan dengan steam drum. Uap yang dihasilkan kemudian dipanaskan lebih lanjut menjadi superheated steam untuk menggerakkan turbin. Efisiensi pembentukan superheated steam ini bergantung pada kinerja perpindahan panas di dalam *boiler*. Oleh karena itu, analisis efisiensi *boiler* menjadi penting untuk menentukan besarnya energi optimal yang berasal dari bahan bakar diubah menjadi uap. Studi ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi *boiler* menggunakan dua metode, yaitu metode langsung dan metode tidak langsung. Pada metode langsung, efisiensi dihitung dengan membandingkan energi panas yang terkandung dalam uap yang dihasilkan dengan energi dari bahan bakar yang digunakan. Pada metode tidak langsung dengan menghitung kehilangan panas selama proses pembakaran. Data operasional yang diperoleh berasal dari *performance test* bulan September 2024, dengan kapasitas pembangkit sebesar 660 MW. Hasil analisis menunjukkan bahwa efisiensi *boiler* mencapai 84,95% berdasarkan metode langsung, dan 84,691% berdasarkan metode tidak langsung.

**Kata kunci:** *boiler, efisiensi boiler, metode langsung, metode tidak langsung*

## **ABSTRACT**

*Boilers* are the main component in steam power systems that function to produce steam to drive turbines. PT PLN Nusantara Power Unit 9 Paiton uses a coal fired drum type boiler with coal fuel to produce a mixture of liquid and vapor phases which are then separated by a steam drum. The steam produced is then further heated into superheated steam to drive the turbine. The efficiency of superheated steam formation depends on the heat transfer performance in the boiler. Therefore, boiler efficiency analysis becomes important to determine the optimal amount of energy derived from fuel converted into steam. This study aims to analyze boiler efficiency using two methods, namely the direct method and the indirect method. In the direct method, the efficiency is calculated by comparing the heat energy contained in the steam produced with the energy of the fuel used. In the indirect method by calculating heat loss during the combustion process. The operational data obtained comes from the performance test in September 2024, with a generating capacity of 660 MW. The analysis shows that the boiler efficiency reaches 84.95% based on the direct method, and 84.691% based on the indirect method.

**Keywords:** *boiler, boiler efficiency, direct method, indirect method*

## 1. PENDAHULUAN

PT PLN Nusantara Power Paiton Unit 9 merupakan salah satu unit pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang memiliki peran krusial dalam penyediaan energi listrik di Indonesia. Pada pembangkit ini, batubara merupakan bahan bakar utama untuk energi termal. Energi ini diperoleh dengan membakar batubara di dalam *boiler* yaitu mesin yang berfungsi mengubah air menjadi uap [1]. *Boiler* adalah alat konversi yang berfungsi untuk mengubah energi kimia yang tersimpan dalam bahan bakar menjadi energi panas melalui proses pembakaran. Energi panas ini kemudian digunakan untuk menghasilkan uap bertekanan [2]. Di dalam *boiler* terjadi perpindahan panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar ke dalam air, sehingga berubah menjadi uap [3]. *Boiler* yang digunakan dalam proses produksi di PT PLN Nusantara Power Paiton Unit 9 adalah jenis *coal fired drum*. Air yang digunakan dalam proses ini merupakan air demineralisasi melalui proses pertukaran ion menggunakan resin anion dan kation, sehingga terbebas dari kandungan ion-ion yang tidak diinginkan.

Efisiensi *boiler* dapat mempengaruhi kelangsungan operasional PT PLN Nusantara Power Paiton Unit 9. Efisiensi *boiler* adalah perbandingan antara energi panas yang berhasil diubah menjadi uap dengan total energi yang tersedia dari bahan bakar [4]. Besarnya efisiensi menunjukkan tingkat energi di dalam bahan bakar yang dapat dimanfaatkan secara optimal untuk menghasilkan uap dalam proses pembangkitan listrik. Penurunan daya *boiler* berdampak signifikan terhadap efisiensi operasionalnya. Kondisi ini dipengaruhi oleh laju aliran massa, tekanan dan temperatur air umpan yang masuk ke *boiler*, serta tekanan dan temperatur uap yang dihasilkan pada keluaran *boiler* [5]. Apabila daya *boiler* menurun, proses pembakaran dan konversi energi menjadi tidak maksimal, yang mengakibatkan peningkatan konsumsi bahan bakar dan penurunan jumlah energi yang dapat dimanfaatkan. Untuk itu perlu dilakukan evaluasi dan pengukuran efisiensi *boiler* secara berkala dan menerus.

PT PLN Nusantara Power Paiton Unit 9 menggunakan dua metode utama untuk mengevaluasi efisiensi *boiler* dalam operasionalnya yaitu metode langsung dan metode tidak langsung. Pada metode langsung, efisiensi dihitung dengan membandingkan energi dalam aliran uap keluaran *boiler* dengan energi yang diberikan oleh bahan bakar. Pada metode tidak langsung, efisiensi ditentukan dengan menghitung persentase kehilangan panas (*heat loss*) [6].

Beberapa penelitian sebelumnya telah melakukan perbandingan antara metode langsung dan tidak langsung dalam menghitung efisiensi *boiler*. Dalam studi yang dilakukan oleh Sugiharto (2020), disebutkan bahwa metode langsung perhitungannya lebih cepat dan mudah, hanya memerlukan beberapa parameter dan analisis laboratorium yang relatif sederhana [7]. Pada penelitian lain oleh Rohim dan Oktaviansyah (2024) disebutkan bahwa metode tidak langsung dapat digunakan untuk perhitungan efisiensi yang lebih detil dengan mempertimbangkan kemungkinan kehilangan panas [8].

Pada studi ini, dilakukan analisis efisiensi *boiler* PT PLN Nusantara Power Paiton Unit 9 menggunakan metode langsung dan tidak langsung. Data operasional yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari *performance test* yang dilakukan PT PLN Nusantara Power Paiton Unit 9 pada bulan September 2024 dengan kapasitas pembangkit 660 MW. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar perhitungan efisiensi *boiler*. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung efisiensi *boiler* pada PT PLN Nusantara Power Paiton Unit 9

menggunakan metode langsung dan metode tidak langsung, dan menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi *boiler*, dan kehilangan panas yang terjadi selama proses pembakaran. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi *boiler* dengan cara mengurangi kehilangan panas serta mengoptimalkan kondisi pengoperasiannya.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini, digunakan metode kuantitatif untuk menganalisis kehilangan panas pada *boiler coal fired drum* di PT PLN Nusantara Power Paiton Unit 9. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghitung efisiensi *boiler* sesuai dengan standar operasi yang berlaku. Metode yang diterapkan mencakup metode langsung dan tidak langsung, mengikuti pedoman ASME PTC-4.1. Data yang digunakan diperoleh melalui pengamatan langsung di lapangan, yang selanjutnya dianalisis untuk menilai kinerja *boiler* dengan kedua metode tersebut. Data yang diperoleh dari PT PLN Nusantara Power Paiton Unit 9 untuk perhitungan kedua metode disajikan Tabel 1 dan 2.

**Tabel 1.** Data Parameter Perhitungan Efisiensi *Boiler* Metode Langsung (*Direct Method*)

Parameter	Operasi	Satuan
$T_1$ , Feed water temperature	200,092	°C
$P_1$ , Feed water pressure	201,652	bar
$T_2$ , Superheater outlet steam temperature	538,59	°C
$P_2$ , Superheater outlet steam pressure	170,31	bar
$T_3$ , Reheater inlet steam temperature	326,676	°C
$P_3$ , Reheater inlet steam pressure	35,524	bar
$T_4$ , Reheater outlet steam temperature	540,257	°C
$P_4$ , Reheater outlet steam pressure	35,524	bar
$\dot{m}_s$ , Steam flow	1.892.690	kg/jam
$\dot{m}_f$ , Coal flow	385.970	kg/jam
GCV	4.164	kkal/kg

**Tabel 2.** Data Parameter Perhitungan Efisiensi *Boiler* Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*)

Parameter	Operasi	Satuan
C, Carbon	44,62	wt%
O <sub>2</sub> , Oxygen	13,69	wt%
S, Sulfur	0,1	wt%
H <sub>2</sub> , Hydrogen	3,32	wt%
CO <sub>2</sub> , Carbon dioxide percentage dalam flue gas	15,2	%
CO, Carbon monoxide percentage dalam flue gas	0	%
O <sub>2</sub> , Oxygen percentage dalam flue gas	4,06	%
$T_f$ , Gas exhaust temperature	225	°C
$T_a$ , Ambient temperature	32	°C
Air humidity	0,0204	kg/kg

Parameter	Operasi	Satuan
GCV	4.164	udara kering Kkal/kg

Data pada kedua Tabel selanjutnya digunakan untuk menghitung efisiensi *boiler* dengan tahapan yang sesuai metode standar untuk perhitungan langsung dan tidak langsung yang rumusnya ditunjukkan persamaan (1) – (13).

### 2.1. Perhitungan Efisiensi *Boiler* Metode langsung (*Direct Method*)

Perhitungan efisiensi *boiler* ( $\eta$ ) metode langsung (*direct method*) diawali dengan penentuan laju alir *steam* ( $\dot{m}_s$ ). Selanjutnya, diidentifikasi entalpi spesifik dari berbagai komponen seperti entalpi *feed water* ( $h_1$ ), entalpi *superheater outlet steam* ( $h_2$ ), entalpi *superheater inlet steam* ( $h_3$ ), dan entalpi *reheater outlet steam* ( $h_4$ ). Perhitungan selanjutnya adalah menentukan laju alir bahan bakar ( $\dot{m}_f$ ) serta nilai kalor spesifik (GCV) bahan bakar kemudian efisiensi *boiler coal fired drum*, menggunakan persamaan (1).

$$\eta = \frac{\dot{m}_s \times (h_2 - h_1) + \dot{m}_s \times (h_3 - h_4)}{\dot{m}_f \times \text{GCV}} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

$\dot{m}_s$  = Laju aliran uap *superheated* (kg/jam)

$\dot{m}_r$  = Laju aliran uap *reheated* (kg/jam)

$\dot{m}_f$  = Laju aliran bahan bakar (kg/jam)

$h_1$  = Entalpi spesifik uap jenuh *outlet superheater* (kkal/kg)

$h_2$  = Entalpi spesifik air umpan (kkal/kg)

$h_3$  = Entalpi spesifik uap inlet *reheater* (kkal/kg)

$h_4$  = Entalpi spesifik uap outlet *reheater* (kkal/kg)

GCV = *Gross Calorific Value* (kkal/kg)

### 2.2. Perhitungan Efisiensi *Boiler* Metode Tidak langsung (*Indirect Method*)

Perhitungan efisiensi *boiler* metode tidak langsung (*indirect method*) diawali dengan tahapan menghitung berbagai bentuk kehilangan panas. Terdapat 8 jenis kehilangan panas yaitu : kehilangan panas dari gas buang kering ( $L_1$ ), kehilangan panas akibat penguapan air yang dihasilkan selama pembakaran hidrogen dalam bahan bakar ( $L_2$ ), kehilangan panas dari uap air yang terkandung dalam bahan bakar ( $L_3$ ) dan udara pembakaran ( $L_4$ ), kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna yang menghasilkan karbon monoksida ( $L_5$ ), kehilangan panas akibat radiasi dan konveksi yang sulit diukur secara langsung ( $L_6$ ), kehilangan panas karena *fly ash* yang tidak terbakar ( $L_7$ ), kehilangan panas karena *bottom ash* yang tidak terbakar ( $L_8$ ). Setelah seluruh persentase kehilangan panas dihitung, langkah selanjutnya adalah menghitung efisiensi menggunakan metode tidak langsung. Adapun langkah-langkah perhitungannya adalah sebagai berikut:

#### 1. Menghitung kebutuhan udara teoritis

$$\text{Udara Teoritis} = \frac{[11,43 \times C] + \left(34,5 \times \left(H_2 \cdot \frac{O_2}{8}\right)\right) + (4,32 \times S)}{100} \quad (2)$$

#### Menghitung persen kelebihan udara yang dipasok (EA)

$$\%EA = \frac{\%O_2}{21 - \%O_2} \quad (3)$$

**Mernghitung massa aktual udara suplai (AAS)**

$$AAS = \left[ 1 + \frac{\%EA}{100} \right] \times \text{udara teoritis} \quad (4)$$

## 2. Menentukan massa aktual gas buang kering

$$M = m_{CO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} + m_{N_2, \text{udara}} \quad (5)$$

## 3. Menghitung seluruh kehilangan panas

a. Persen kehilangan panas karena gas buang kering

$$L_1 = \frac{M \times C_{pf} \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100 \quad (6)$$

b. Persen kehilangan panas karena pembentukan air dari H<sub>2</sub> dalam bahan bakar

$$L_2 = \frac{9 \times H_2 \times \{584 + C_{ps} \times (T_f - T_a)\}}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100 \quad (7)$$

c. Persen kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar

$$L_3 = \frac{M \times \{584 + C_{ps} \times (T_f - T_a)\}}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100 \quad (8)$$

d. Persen kehilangan panas karena embun di udara

$$L_4 = \frac{AAS \times \text{Humidity} \times C_{ps} \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100 \quad (9)$$

e. Persen kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna

$$L_5 = \frac{(\%CO \times C) \times \left( \frac{5744}{GCV \text{ bahan bakar}} \right)}{\%CO + \%CO_2} \times 100 \quad (10)$$

f. Persen kehilangan panas karena radiasi dan konveksi

$$L_6 = \frac{\text{Radiation loss} \times A \text{ total}}{mf \times GCV \text{ bahan bakar}} \times 100 \quad (11)$$

g. Persen kehilangan panas karena *fly ash* yang tidak terbakar

$$L_7 = \frac{\text{Total fly ash dalam 100 kg bahan bakar} \times GCV \text{ fly ash} \times 100}{GCV \text{ bahan bakar}} \quad (12)$$

h. Persen kehilangan panas karena *bottom ash* yang tidak terbakar

$$L_8 = \frac{\text{Total bottom ash dalam 100 kg bahan bakar} \times GCV \text{ bottom ash} \times 100}{GCV \text{ bahan bakar}} \quad (13)$$

i. Penentuan efisiensi *boiler* metode tidak langsung

$$\eta = 100\% - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8) \quad (14)$$

Keterangan:

Udara Teoritis	= kebutuhan udara teoritis (kg udara/kg bahan bakar)
C	= kandungan karbon dalam bahan bakar (% massa)
H <sub>2</sub>	= kandungan hidrogen dalam bahan bakar (% massa)
O <sub>2</sub>	= kandungan oksigen dalam bahan bakar (% massa)
S	= kandungan sulfur dalam bahan bakar (% massa)
%EA	= persen kelebihan udara yang dipasok (%)
%O <sub>2</sub>	= kadar oksigen dalam gas buang kering (% volume)
AAS	= massa aktual udara suplai (kg udara/kg bahan bakar)
M	= massa aktual gas buang kering (kg gas buang/kg bahan bakar)
m <sub>CO<sub>2</sub></sub>	= massa CO <sub>2</sub> dalam gas buang (kg/kg bahan bakar)
m <sub>N<sub>2</sub></sub>	= massa nitrogen dari bahan bakar (kg/kg bahan bakar)
m <sub>O<sub>2</sub></sub>	= massa oksigen dalam gas buang (kg/kg bahan bakar)
m <sub>N<sub>2</sub>, udara</sub>	= massa nitrogen dari udara pembakaran (kg/kg bahan bakar)

C <sub>pf</sub>	= panas jenis gas buang (kkal/kg·°C)
C <sub>ps</sub>	= panas jenis uap air (kkal/kg·°C)
T <sub>f</sub>	= temperatur gas buang (°C)
T <sub>a</sub>	= temperatur udara lingkungan (°C)
GCV	= nilai kalor atas bahan bakar (Gross Calorific Value) (kkal/kg)
Humidity	= kelembaban udara (kg uap air/kg udara kering)
L <sub>1</sub>	= kehilangan panas karena gas buang kering (%)
L <sub>2</sub>	= kehilangan panas karena pembentukan air dalam bahan bakar (%)
L <sub>3</sub>	= kehilangan panas karena kadar air dalam bahan bakar (%)
L <sub>4</sub>	= kehilangan panas karena kelembaban udara pembakaran (%)
L <sub>5</sub>	= kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna (%)
L <sub>6</sub>	= kehilangan panas akibat radiasi dan konveksi (%)
L <sub>7</sub>	= kehilangan panas karena fly ash yang tidak terbakar (%)
L <sub>8</sub>	= kehilangan panas karena bottom ash yang tidak terbakar (%)
Fly ash	= abu terbang dalam pembakaran (kg/100 kg bahan bakar)
Bottom ash	= abu dasar dalam pembakaran (kg/100 kg bahan bakar)
GCV fly ash	= nilai kalor fly ash (kkal/kg)
GCV bottom ash	= nilai kalor bottom ash (kkal/kg)
η	= efisiensi boiler (%)

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Perhitungan Efisiensi *Boiler* Metode Langsung

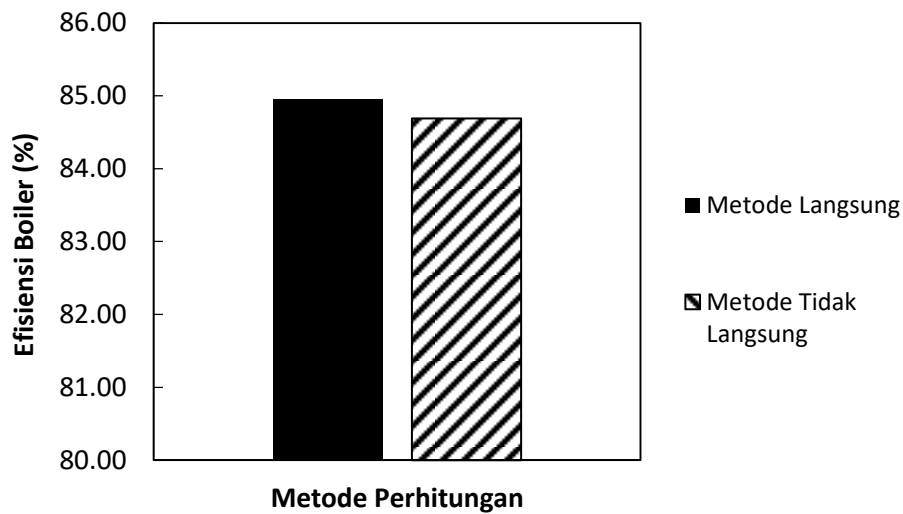
Perhitungan efisiensi *boiler* dengan metode langsung dilakukan menggunakan Persamaan (1) berdasarkan data operasi *boiler*. Perhitungan ini mempertimbangkan laju aliran uap, entalpi uap dan air umpan, serta laju aliran dan nilai kalor bahan bakar. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai efisiensi *boiler* sebesar 84,95%.

#### 3.2. Perhitungan Efisiensi *Boiler* Metode Tidak Langsung

Perhitungan efisiensi *boiler* dengan metode tidak langsung dilakukan berdasarkan Persamaan (2) – (14). Kehilangan panas dihitung melalui komponen L1 hingga L8 dan efisiensi ditentukan menggunakan Persamaan (14). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efisiensi *boiler* sebesar 84,691%.

#### 3.3. Pembahasan

Berdasarkan kedua metode perhitungan efisiensi *boiler* sesuai standar Amerika Serikat ASME PTC 4-1 *Power Test Code for Steam Generating Units*, terdapat perbedaan efisiensi *boiler* yang dihasilkan dari metode langsung dan metode tidak langsung. Metode langsung menghitung efisiensi dengan membandingkan rasio antara energi keluaran dan energi masukan, metode tidak langsung secara rinci menganalisis kehilangan energi (*heat loss*) untuk menentukan efisiensinya.



**Gambar 2.** Perbandingan Efisiensi *Boiler* Metode Langsung dan Metode Tidak Langsung

Pada Gambar 2 ditunjukkan efisiensi *boiler* yang dihitung dengan metode langsung lebih tinggi dibandingkan dengan metode tidak langsung. Hal ini disebabkan karena metode langsung hanya menghitung rasio antara energi yang dihasilkan dan energi yang dimasukkan, tanpa memperhitungkan kerugian yang terjadi selama proses pembakaran. Perhitungan metode tidak langsung memperhitungkan berbagai variabel yaitu sifat bahan bakar seperti nilai kalor dan kandungan kimia, dan dampak gas buang yang dihasilkan selama pembakaran [9]. Berdasarkan perhitungan, efisiensi yang diperoleh dengan metode langsung adalah sebesar 84,95%, sedangkan efisiensi metode tidak langsung 84,691%. Terdapat selisih sebesar 0,259%, yang menunjukkan bahwa metode langsung nilai efisiensinya lebih tinggi.

Besarnya kehilangan panas dalam *boiler* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensinya. Semakin besar kehilangan panas, semakin rendah efisiensi *boiler*. Berdasarkan perhitungan terdapat tiga jenis kehilangan panas terbesar yang berkontribusi secara signifikan terhadap efisiensi *boiler*, yaitu: kehilangan panas dari gas buang kering yang mencapai 4,491%, kehilangan panas akibat pembentukan air dari hidrogen dalam bahan bakar sebesar 4,671%, dan kehilangan panas yang disebabkan oleh embun dalam bahan bakar sebesar 5,7%. Persentase kehilangan panas dari ketiga faktor ini masing-masing melebihi 1%, sehingga memiliki dampak yang cukup besar terhadap efisiensi *boiler*. Jenis kehilangan panas lainnya yaitu radiasi, konveksi, *fly ash* dan *bottom ash* yang tidak terbakar, memiliki nilai yang jauh lebih rendah, sehingga dampaknya terhadap efisiensi *boiler* kecil.

Faktor penyebab pertama kerugian panas adalah kehilangan panas yang terjadi melalui gas buang kering. Kehilangan panas ini disebabkan oleh tingginya suhu gas buang yang dilepaskan ke atmosfer, yang mencapai angka 4,491%. Suhu gas buang yang tinggi mengakibatkan pemanfaatan panas untuk pembangkitan uap tidak optimal. Untuk mengurangi kehilangan panas ini, penting untuk menjaga suhu gas buang serendah mungkin, namun tetap di atas titik embun untuk mencegah kondensasi uap air pada dinding cerobong. Penggunaan *economizer* atau pemanas awal udara dapat secara

signifikan menurunkan suhu gas buang, sehingga meningkatkan efisiensi *boiler*. Setiap kenaikan suhu gas buang sebesar 1°C dapat menyebabkan penurunan efisiensi *boiler* hingga 0,05% [10].

Faktor kedua yang memengaruhi efisiensi adalah kehilangan panas yang ditimbulkan oleh pembentukan uap air dari hidrogen ( $H_2$ ) dalam bahan bakar, dengan nilai mencapai 4,671%. Kehilangan panas ini terjadi selama reaksi pembakaran hidrogen, yang menghasilkan uap air sebagai produk samping. Kandungan hidrogen dalam bahan bakar batu bara, berperan penting dalam menentukan besarnya kehilangan ini. Semakin tinggi kadar hidrogen, semakin besar jumlah panas yang hilang akibat pembentukan uap air [11]. Untuk meminimalkan kehilangan ini, salah satu langkah yang dapat diambil adalah memilih bahan bakar dengan kadar hidrogen yang lebih rendah, sesuai spesifikasi bahan bakar *boiler* yang standar.

Faktor ketiga adalah kehilangan panas akibat kadar air dalam bahan bakar, yang menyebabkan kehilangan panas terbesar, yakni mencapai 5,7%. Kehilangan panas ini disebabkan oleh kadar air yang harus diuapkan selama proses pembakaran. Semakin tinggi kandungan air (massa uap air) dalam bahan bakar, semakin besar jumlah kehilangan panas [12]. Kadar air berhubungan erat dengan kualitas batu bara yang digunakan, untuk mengurangi kehilangan panas, salah satu langkah yang dapat dilakukan adalah mengeringkan batu bara terlebih dahulu. Pengeringan dapat dioptimalkan dengan memanfaatkan fungsi *primary air fan* (PAF), selain untuk mengangkut batu bara ke tungku juga difungsikan untuk mengeringkan bahan bakar.

Kehilangan panas akibat kelembaban ( $L_4$ ) yang mencapai 0,255% terjadi karena kadar air di udara yang cukup tinggi, terutama di wilayah tropis yang memiliki kelembaban lebih tinggi dibandingkan dengan daerah kering. Salah satu solusi untuk mengurangi kelembaban tersebut adalah dengan memanfaatkan *air preheater*, yang berfungsi untuk meningkatkan suhu udara sebelum memasuki *boiler* [13].

Kehilangan panas sebesar 0,000323% akibat pembakaran atom karbon yang tidak sempurna ( $L_5$ ) terjadi akibat rasio udara yang masuk ke dalam *boiler* dengan jumlah bahan bakar yang digunakan tidak sesuai. Ketidakseimbangan ini menyebabkan pembentukan karbon monoksida (CO), yang semakin meningkat jumlahnya, dan berakibat pada meningkatnya kehilangan panas. Untuk mengurangi kerugian ini, diperlukan mengoptimalkan pasokan udara agar sesuai pembakaran bahan bakar.

Jenis kehilangan panas lainnya, seperti radiasi dan konveksi (0,0132%), *fly ash* (0,000381%), serta *bottom ash* yang tidak terbakar (0,176%), memiliki nilai yang tergolong sangat rendah. Hal ini menunjukkan bahwa struktur *boiler* PLTU Paiton Unit 9 telah dilengkapi dengan isolasi yang memadai, dan optimalisasi kinerja proses pembakaran yang efisien dapat meminimalisir kehilangan panas tersebut. Kehilangan panas ini merupakan energi panas bahan bakar terbuang ke lingkungan dan energi di dalam bahan bakar sisa pembakaran. Sebagian panas hilang melalui radiasi dan konveksi pada permukaan *boiler*, dan terbuang pada sisa pembakaran di dalam *fly ash* dan *bottom ash* yang tidak terbakar sempurna. *Bottom ash*, yang memiliki massa lebih besar daripada *fly ash*, dapat digunakan sebagai indikator efisiensi pembakaran bahan bakar. Semakin banyak karbon tidak terbakar yang terbawa dalam *bottom ash*, semakin besar kehilangan

panas [14]. Abu batubara yang menempel pada pipa-pipa boiler dapat menghambat proses perpindahan kalor dari tungku ke pipa-pipa penguapan air [15].

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan perhitungan efisiensi *boiler* pada PLTU Paiton Unit 9, diperoleh nilai efisiensi sebesar 84,95% menggunakan metode langsung dan 84,691% menggunakan metode tidak langsung. Selisih efisiensi sebesar 0,259% menunjukkan bahwa kedua metode memberikan hasil yang relatif konsisten, di mana metode langsung menghasilkan nilai efisiensi sedikit lebih tinggi karena tidak memperhitungkan kehilangan panas secara rinci. Sementara itu, metode tidak langsung mempertimbangkan berbagai komponen kehilangan panas (*heat loss*), sehingga hasilnya lebih merepresentasikan kondisi termal proses pembakaran yang terjadi di dalam.

Berdasarkan hasil perhitungan metode tidak langsung, kehilangan panas terbesar berasal dari panas gas buang kering, pembentukan uap air akibat kandungan hidrogen dalam bahan bakar, serta kadar air dalam bahan bakar. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengevaluasi potensi peningkatan efisiensi melalui penerapan atau optimasi *economizer* guna menurunkan temperatur gas buang, serta melakukan evaluasi efisiensi *boiler* secara berkala sebagai dasar penentuan strategi pemeliharaan yang optimal agar kinerja *boiler* tetap stabil dan efisien.

#### REFERENSI

- [1] M. Nasution dan S. Napid, "Aplikasi Boiler sebagai Pembangkit Uap dalam Menentukan Efisiensi," *Buletin Utama Teknik*, vol. 17, no. 3, hal. 314–319, 2022.
- [2] J. Purba, "Perancangan Boiler Pipa Api untuk Perebusan Bubur Kedelai pada Industri Tahu Kapasitas Uap Jenuh 160 Kg/Jam," Disertasi Doktor, hal. 1–8, 2015.
- [3] R. Nurhasanah, J. Edy, dan E. B. Pradana, "Perancangan Boiler dengan Memanfaatkan Sampah Kering untuk Bahan Bakar PLTU Mini 3 KW STT-PLN," *Power Plant*, vol. 5, no. 1, hal. 1–10, 2018.
- [4] I. M. Hardi, Y. Heryadi, dan W. Wawan, "Analisis Efisiensi Boiler Atmospheric Fluidized Bed Combustion Tipe Water Tube 75 Ton/Jam," *Jurnal Teknologika*, vol. 11, no. 2, hal. 1–11, t.t.
- [5] Z. Chen, P. M. Singh, dan Y. Do Choi, "Francis Turbine Blade Design on the Basis of Port Area and Loss Analysis," *Energies*, vol. 9, no. 3, hal. 164, 2016.
- [6] H. Suharyadi dan Ayyub, "Assessment Unjuk Kerja Boiler TWA 6000 Kg/H di Kilang PPSDM Migas Cepu," *SNTEM*, vol. 4, no. 1, hal. 249–257, 2024.
- [7] A. Sugiharto, "Perhitungan Efisiensi Boiler dengan Metode Secara Langsung pada Boiler Pipa Api," *Swara Patra: Majalah Ilmiah PPSDM Migas*, vol. 10, no. 2, hal. 1–6, 2020.
- [8] M. Rochim dan R. Oktaviansyah, "Perhitungan Efisiensi Boiler TWA dengan Metode Secara Tidak Langsung," *Jurnal Nasional Pengelolaan Energi MigasZoom*, vol. 6, no. 2, hal. 85–92, 2024.
- [9] M. Sagaf, "Analisa Faktor-Faktor Penyebab Perubahan Efisiensi Boiler Jenis Pulverized Coal Fired Forced Circulation Sub-Critical Pressure Menggunakan Metode Tak Langsung," *Teknoin*, vol. 24, no. 2, hal. 147–158, 2018.
- [10] C. T. Karaeng, I. Iswandi, F. Firman, dan M. Nuzul, "Analisis Kinerja Boiler pada PLTU Unit

- 1 PT Semen Tonasa,” *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, vol. 11, no. 1, hal. 74–85, 2019.
- [11] A. Suardi, N. Chairat, F. Muhammad, T. B. Impak, dan B. Tekuk, “Analisa Efisiensi Boiler dengan Metode Heat Loss Sebelum dan Sesudah Overhaul PT Indonesia Power UBP PLTU Lontar Unit 3,” *Jurnal Power Plant*, vol. 4, no. 4, hal. 218–227, 2017.
- [12] S. Salmi dan A. A. Nuraini, “Effect of Coal with High Moisture Content on Boiler Operation Parameters at Thermal Coal Fired Power Plant,” *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology*, vol. 17, no. 6, hal. 6236–6247, 2020.
- [13] J. Siburian, I. Nyoman, S. Winaya, K. Astawa, B. Jimbaran, dan B. Abstrak, “Pengaruh Pemeliharaan Air Heater terhadap Efisiensi Boiler PLTU Unit 4 UP Muara Karang,” *Jurnal Ilmiah Teknik Desain Mekanik*, vol. 8, no. 4, hal. 726–732, 2019.
- [14] S. Harnowo dan Y. Yunaidi, “Kinerja Boiler dengan Sistem Pembakaran Bersama antara Ampas Tebu dengan Sekam Padi dan Cangkang Kelapa Sawit,” *Semesta Teknik*, vol. 24, no. 2, hal. 102–110, 2021.
- [15] B. Kamara, D. V. Von Kallon, dan P. M. Mashinini, “Fouling and Slagging Investigation on Ash Derived from Sasol Coal Using ICP and XRF Analytical Techniques,” *Applied Science*, vol. 12, no. 22, hal. 2–11, 2022.