

PERBANDINGAN EFISIENSI *BOILER* 4 *PLANT* 1 PT SATORIA ANEKA INDUSTRI MENGGUNAKAN PERHITUNGAN METODE LANGSUNG DAN TIDAK LANGSUNG

Intan Aprilia¹, Dwina Moentamaria¹, Fandi Nur Arifin²

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

²PT Satoria Aneka Industri, Jl. Raya Kejayan - Purwosari KM. 16, Pasuruan 67173, Indonesia

intanparalia12403@gmail.com ; [dwina_mnt@yahoo.com]

ABSTRAK

Boiler merupakan komponen penting dalam industri karena berperan dalam menghasilkan uap panas yang dibutuhkan untuk berbagai proses produksi. Tingkat efisiensi *boiler* sangat memengaruhi konsumsi energi dan biaya operasional, di mana efisiensi yang rendah dapat menyebabkan pemborosan bahan bakar dan menurunnya kinerja sistem. Di PT Satoria Aneka Industri, efisiensi unit *boiler* yang beroperasi di *Plant* 1 belum pernah dievaluasi secara menyeluruh, sehingga diperlukan analisis untuk menilai kelayakan operasional dan potensi peningkatan performa. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menentukan efisiensi kerja *boiler* menggunakan dua pendekatan, yaitu perhitungan dengan metode langsung dan metode tidak langsung. Metode langsung digunakan untuk menilai perbandingan antara energi uap yang dihasilkan dan energi dari bahan bakar, sedangkan metode tidak langsung digunakan untuk menentukan efisiensi melalui akumulasi berbagai bentuk *heat loss*. Hasil perhitungan menunjukkan efisiensi sebesar 81,9% menggunakan metode langsung dan 77,84% menggunakan metode tidak langsung. Kedua hasil tersebut masih berada dalam rentang efisiensi *boiler* industri yang baik, yaitu sebesar 70–90%, sehingga sistem *boiler* di *Plant* 1 PT Satoria Aneka Industri dinilai masih layak beroperasi dan berfungsi secara optimal.

Kata kunci: *boiler*, efisiensi kerja, metode langsung, metode tidak langsung, *heat loss*

ABSTRACT

The boiler is an essential component in industry as it plays a crucial role in generating steam required for various production processes. The efficiency level of a boiler significantly affects energy consumption and operational costs, where low efficiency may lead to fuel wastage and decreased system performance. At PT Satoria Aneka Industri, the efficiency of the boiler unit operating in Plant 1 had never been comprehensively evaluated, thus an analysis was required to assess its operational feasibility and potential performance improvement. This study was conducted with the aim of determining the operational efficiency of the boiler using two approaches, namely the direct method and the indirect method. The direct method was used to evaluate the ratio between the energy of the generated steam and the energy supplied by the fuel, while the indirect method was used to determine efficiency through the accumulation of various forms of heat losses. The calculation results showed an efficiency of 81.9% using the direct method and 77.84% using the indirect method. Both results are still within the range of good industrial boiler efficiency (70–90%), indicating that the boiler system in Plant 1 of PT Satoria Aneka Industri is still feasible for operation and functions optimally.

Keywords: *boiler*, operational efficiency, direct method, indirect method, *heat loss*

1. PENDAHULUAN

Salah satu komponen vital dalam suatu industri atau pabrik adalah unit *boiler*. *Boiler* adalah wadah tertutup yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap melalui proses pemanasan [1, 2]. Uap panas yang dihasilkan digunakan sebagai sumber energi dalam berbagai proses produksi, seperti pemanasan, sterilisasi, atau penggerak turbin. Prinsip kerja *boiler* didasarkan pada perpindahan panas dari hasil pembakaran bahan bakar ke air di dalam bejana, yang menyebabkan air dari fase liquid berubah fase menjadi uap [3]. Namun, karena proses pembakaran dan perpindahan panas tersebut berlangsung secara terus-menerus dalam jangka panjang, sistem *boiler* sangat rentan mengalami penurunan efisiensi akibat kerak, korosi, atau gangguan distribusi panas, sehingga perlu dilakukan evaluasi performa secara berkala.

Permasalahan ini menjadi sangat penting terutama di industri yang bergantung pada alat penunjang (*boiler*), seperti PT Satoria Aneka Industri. Uap yang dihasilkan dari proses tersebut memainkan peran penting dalam operasional industri, di mana *steam* digunakan dalam beberapa proses kritis seperti sebagai preheater dalam pembuatan *Water for Injection* (WFI), sebagai fluida panas dalam *Pure Steam Generator* (PSG), serta sebagai sumber panas pada *Plate Heat Exchanger* untuk sterilisasi menggunakan *autoclave*. Untuk memenuhi kebutuhan ini, perusahaan menggunakan *Boiler Fire Tube*, yaitu jenis *boiler* di mana api melewati pipa-pipa yang dikelilingi oleh air. Jenis ini umumnya digunakan pada industri berskala kecil hingga menengah karena bentuknya yang kompak dan efisien dalam penggunaan ruang. Hal ini berbeda dengan *Boiler Water Tube*, yang lebih cocok untuk pembangkit listrik, di mana air mengalir melalui pipa dan dikelilingi oleh nyala api, cocok untuk aplikasi tekanan tinggi [4], [5].

Mengacu pada kebutuhan operasional yang tinggi dan penggunaan *boiler* yang berkelanjutan, sistem *boiler* di PT Satoria Aneka Industri dioperasikan secara terus-menerus selama proses produksi berlangsung. Perawatan hanya dilakukan setiap enam bulan saat masa downtime, sehingga berisiko menyebabkan akumulasi masalah yang berdampak pada penurunan kualitas dan efisiensi. Oleh karena itu, pengukuran efisiensi *boiler* menjadi penting untuk mengetahui sejauh mana energi dari bahan bakar dimanfaatkan secara optimal. Efisiensi *boiler* diartikan sebagai rasio antara energi panas yang dimanfaatkan untuk memanaskan air atau membentuk uap terhadap keseluruhan energi yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar. Semakin tinggi efisiensinya, semakin besar energi yang dapat dimanfaatkan, yang berdampak langsung terhadap penghematan energi dan biaya produksi [2].

Dalam mengevaluasi efisiensi, terdapat dua pendekatan perhitungan yang umum digunakan, yaitu metode langsung dan metode tidak langsung [5-7]. Pada metode langsung, efisiensi dihitung berdasarkan perbandingan antara panas yang diterima fluida dengan panas dari bahan bakar yang digunakan. Perhitungan metode tersebut bersifat sederhana dan dapat dilakukan dengan data operasional dasar seperti tekanan, temperatur, dan laju alir, sehingga biasanya digunakan untuk evaluasi efisiensi *boiler* harian. Di sisi lain, metode tidak langsung lebih kompleks karena menghitung efisiensi dengan menjumlahkan berbagai jenis kehilangan panas (*heat loss*) seperti melalui gas buang karena residu atau kerak pada pipa *boiler*, adanya perpindahan secara radiasi atau konveksi, dan kelembaban bahan bakar atau udara. Metode ini digunakan ketika ingin mengetahui dan mengevaluasi sumber-sumber kehilangan energi

secara spesifik [3, 5]. Meskipun lebih rumit, metode tidak langsung dapat memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai faktor-faktor penyebab penurunan efisiensi.

Metode langsung dan tidak langsung memiliki karakteristik, kelebihan, serta kekurangannya masing-masing. Metode langsung dalam evaluasi efisiensi *boiler* memiliki keunggulan karena sederhana, cepat, dan tidak memerlukan asumsi atas kerugian yang tidak terukur. Namun, metode ini sangat bergantung pada akurasi data bahan bakar dan uap, serta tidak mampu mengidentifikasi sumber inefisiensi secara detail. Sebaliknya, metode tidak langsung mampu menunjukkan sumber kerugian energi secara rinci dan memiliki tingkat ketidakpastian rendah, namun membutuhkan lebih banyak data, waktu, dan perhitungan. Metode ini juga tidak secara otomatis memberikan informasi kapasitas *output* dan sering memerlukan teknisi khusus, sehingga menambah biaya. Kedua metode ini saling melengkapi dan dapat digunakan bersamaan untuk memberikan gambaran efisiensi *boiler* yang lebih akurat dan menyeluruh [3, 7].

Berbagai studi sebelumnya yang berkaitan dengan metode perhitungan tersebut menunjukkan bahwa efisiensi *boiler* sangat bergantung pada kondisi fisik alat dan operasional unit tersebut. Joniarta dkk.(2024) mencatat bahwa efisiensi di PLTU Jeranjang dengan metode langsung mencapai 73,13% akibat kebocoran pada *boiler* yang disebabkan kurangnya perawatan [10]. Menurut Gumelar dkk.(2022), terbentuknya kerak pada bagian dalam pipa *boiler* menyebabkan penurunan efisiensi, yaitu sebesar 73,78% berdasarkan perhitungan metode langsung dan 73,37% berdasarkan metode tidak langsung [3]. Selain itu, Hasudungan dan Nazarrudin (2023) menyatakan bahwa pengoperasian *boiler* di bawah kapasitas rancangannya juga dapat menyebabkan efisiensi menurun secara signifikan [11]. Temuan-temuan ini mengindikasikan bahwa pemeliharaan rutin dan pengoperasian pada kapasitas optimal merupakan kunci dalam menjaga efisiensi sistem *boiler*.

Berdasarkan latar belakang dan studi terdahulu tersebut, penelitian ini dilakukan di PT Satoria Aneka Industri untuk mengevaluasi performa unit *Boiler Fire Tube* yang menggunakan bahan bakar LNG (*Liquified Natural Gas*) dan memiliki kapasitas 6 ton/hari. Telah beroperasi sejak 2014, *boiler* ini digunakan secara terus-menerus dalam proses produksi. Penelitian ini dilakukan guna menilai apakah sistem masih bekerja dengan efisien atau menunjukkan tanda-tanda penurunan performa yang membutuhkan perbaikan atau pemeliharaan. Efisiensi diukur dengan menggunakan dua pendekatan, yaitu metode langsung yang mengandalkan data hasil pembakaran secara nyata, serta metode tidak langsung yang menghitung *heat loss* selama proses berlangsung. Hasil dari evaluasi ini diharapkan dapat menjadi dasar perbaikan sistem dan peningkatan efisiensi energi di perusahaan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Unit *Boiler* PT Satoria Aneka Industri, Pasuruan, Jawa Timur, dengan tujuan untuk menentukan efisiensi kerja *boiler* menggunakan dua pendekatan, yaitu perhitungan dengan metode langsung dan metode tidak langsung. Adapun pengambilan data dilakukan pada tanggal 14 November 2024 tepatnya pada *Boiler 4* dengan kapasitas 6 ton/hari yang menyediakan *steam* untuk *Production Plant 1*.

2.1. Perhitungan Efisiensi Metode Langsung

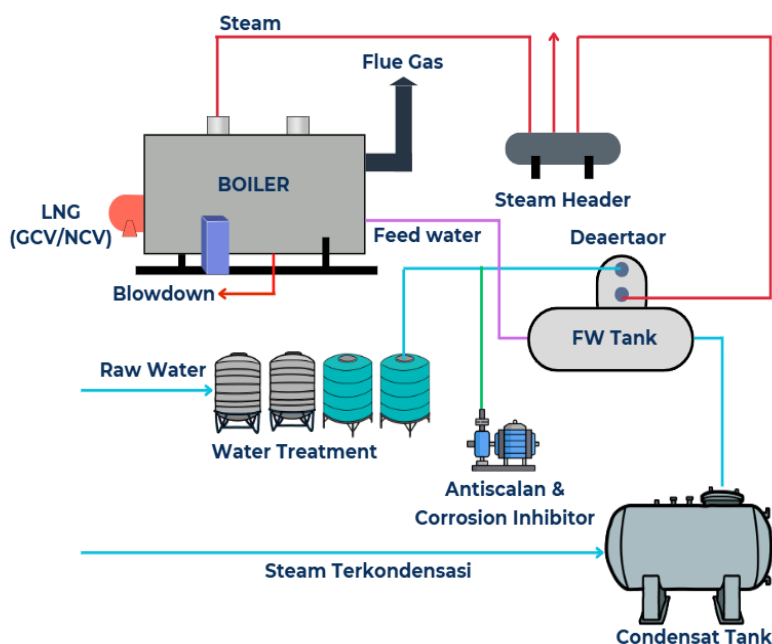
Perhitungan efisiensi *boiler* dengan metode langsung dilakukan dengan membandingkan energi yang dibawa oleh fluida kerja dari feed water menjadi *steam*

dengan energi dari bahan bakar atau LNG (Liquified Natural Gas), berdasarkan data lapangan seperti jumlah uap yang dihasilkan, jumlah bahan bakar yang digunakan, entalpi uap jenuh dalam kJ/kg uap, entalpi air umpan dalam kJ/kg air, serta nilai kalor bahan bakar [10, 11]. Data yang digunakan dalam metode ini terdapat pada Tabel 1. Adapun Gambar 1. menunjukkan *flow diagram* unit *boiler*, yang menggambarkan alur proses mulai dari masuknya air umpan (*feed water*), proses pemanasan dalam *boiler* menggunakan bahan bakar LNG, hingga terbentuknya uap (*steam*) yang kemudian didistribusikan ke proses berikutnya. Diagram ini membantu memberikan visualisasi mengenai sistem kerja *boiler* serta posisi titik-titik pengambilan data penting dalam perhitungan efisiensi. Perhitungan efisiensi *boiler* metode langsung memiliki persamaan 1 [7, 11]:

$$\eta_{boiler} = \frac{\dot{m}_{steam} (h_{steam} - h_{feed\ water}) + \dot{m}_{feed} \times C_{p_{feed}} \times \Delta T}{\dot{m}_{fuel} \times GCV_{fuel}} \quad (1)$$

Keterangan :

η_{boiler}	= efisiensi <i>boiler</i> (%)
$\dot{m}_{steam}$	= laju alir <i>steam</i> (kg/h)
$\dot{m}_{feed}$	= laju alir <i>feed water</i> (kg/h)
$\dot{m}_{fuel}$	= laju alir bahan bakar (kg/h)
h_{steam}	= entalpi uap (hg) (kJ/kg)
$h_{feed\ water}$	= entalpi air umpan (hf) (kJ/kg)
$C_{p_{feed}}$	= panas spesifik <i>feed water</i> (kJ/kg.K)
ΔT	= suhu <i>feed water</i> dikurangi suhu <i>steam</i>
GCV_{fuel}	= nilai kalor kotor bahan bakar (kJ/kg)



Gambar 1. Bagian-bagian unit *boiler*

Tabel 1. Data unit boiler 4

Parameter Metode Langsung		
Deskripsi	Operasi	Satuan
Laju alir <i>feed water</i>	30	m ³ /hari
Laju alir <i>blowdown</i>	3	m ³ /hari
Laju alir LNG	1803,518	m ³ /hari
CP <i>feed water</i>	4,204	kJ/kg.K
Tekanan <i>Steam</i>	6	Bar
GCV	41750	kJ/ m ³
NCV	37720	kJ/ m ³

2.2. Perhitungan Efisiensi Metode Tidak Langsung

Perhitungan efisiensi boiler dengan metode tidak langsung dilakukan dengan cara menghitung total energi dari bahan bakar, lalu dikurangi dengan jumlah *heat loss* yang terjadi. Metode ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar energi yang terbuang, sehingga efisiensi dihitung dari selisih antara energi masuk dan kerugian panas pada sistem boiler [10, 11]. Data-data yang diperlukan dalam perhitungan efisiensi boiler metode tidak langsung terdapat pada Tabel 2. Mengacu pada standar USA ASME PT 4 1 Power Test Code untuk *Steam* Generating Units, efisiensi dengan metode tidak langsung dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [3, 7] :

$$\eta_{boiler} = 100\% - \text{Jumlah Heat loss Boiler (\%)} \quad (2)$$

Heatloss pada boiler dapat disebabkan oleh

- L1 = heatloss gas buang kering
- L2 = heatloss *steam* dalam bahan bakar (H₂)
- L3 = heatloss kandungan air bahan bakar (H₂O)
- L4 = heatloss kandungan air di udara pembakaran (H₂O)
- L5 = heatloss pembakaran tidak sempurna (CO) (bahan bakar padat)
- L6 = heatloss radiasi permukaan, konveksi, dan yang tak terhitung lainnya
- L7 = heatloss karena *fly ash* (bahan bakar padat)
- L8 = heatloss karena *bottom ash* (bahan bakar padat)

Dalam menentukan efisiensi boiler menggunakan metode tidak langsung, terdapat beberapa tahapan yang mengacu pada ASME PTC 4 [3, 7] :

Tahap 1: Menghitung kebutuhan udara teoritis (m_{ta})

$$m_{ta} = 11,495 C + 34,48 \left(H - \frac{O}{8} \right) - 4,31 S \quad (3)$$

Tahap 2 : Menghitung persen kelebihan udara yang *disupply* (EA)

$$EA = \frac{O_2\%}{20,9 - O_2\%} \times 100\% \quad (4)$$

Tahap 3 : Menghitung massa aktual udara yang *disupply*/ kg bahan bakar (AAS)

$$AAS = \left(1 + \frac{EA}{100} \right) \times m_{ta} \quad (5)$$

Tahap 4 : Menghitung seluruh *heat loss*

- *Heat loss* di Gas buang kering

$$m = \left(C \times \frac{44}{12} \right) + N + \left(ASS \times \frac{77}{100} + (AAS - m_{ta}) \times \frac{23}{100} \right) \quad (6)$$

$$L1 = \frac{m \times Cp \times (Tf - Ta)}{GCV} \times 100 \quad (7)$$

Keterangan:

- m = massa dari *dry flue gas* (kg/kg bahan bakar)
- C = berat *carbon* di dalam bahan bakar (kg.°C/kg LNG)
- N = berat nitrogen di dalam bahan bakar (kg.N/kg LNG)
- GCV = nilai kalor bahan bakar (kkal/kg)
- Cp = panas spesifik *flue gas* (kkal/kg.°C)

- *Heat loss* karena H₂ di bahan bakar

$$L2 = \frac{9 \times H_2 \times (584 + Cps \times (Tf - Ta))}{GCV} \times 100 \quad (8)$$

Keterangan:

- H₂ = massa *hydrogen* (kg/kg bahan bakar)
- 584 = panas laten berhubungan dengan tekanan parsial uap air
- GCV = nilai kalor bahan bakar (kkal/kg)
- Cps = panas spesifik dari *superheated steam* (kkal/kg.°C)

- *Heat loss* karena kandungan air bahan bakar

$$L3 = \frac{M \times (584 + Cps \times (Tf - Ta))}{GCV} \times 100 \quad (9)$$

Keterangan:

- M = massa embun dalam bahan bakar 1 kg basis (kg)
- 584 = panas laten berhubungan dengan tekanan parsial uap air
- GCV = nilai kalor bahan bakar (kkal/kg)
- Cps = panas spesifik dari *superheated steam* (kkal/kg.°C)

- *Heat loss* karena uap air udara

$$L4 = \frac{AAS \times humidity \times Cps \times (Tf - Ta)}{GCV} \times 100 \quad (10)$$

Keterangan:

- Hum = massa air yang terkandung dalam setiap kg udara kering
- Cps = panas spesifik dari *superheated steam* (kkal/kg.°C)
- GCV = nilai kalor bahan bakar (kkal/kg)

- *Heat loss* karena pembakaran tidak sempurna

$$L5 = A \frac{\%CO \times C}{\%CO + \%CO_2} \times \frac{5744}{CGV \text{ batubara}} \times 100\% \quad (11)$$

- *Heat loss* karena radiasi

Heat loss secara umum akibat radiasi menurut ASME PTC 4 berkisar pada 0,5-1% (L6).

- *Heat loss fly ash* dan *bottom ash*

$$L7 = \frac{\text{total abu per kg bahan bakar terbakar } t \times \text{GCV fly ash}}{\text{CGV batubara}} \times 100\% \quad (12)$$

$$L8 = \frac{\text{total abu per kg bahan bakar terbakar } t \times \text{GCV bottom ash}}{\text{CGV batubara}} \times 100\% \quad (13)$$

Tahap 5: Menghitung efisiensi *boiler*

$$\text{Efisiensi boiler} = 100\% - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \quad (14)$$

Tabel 2. Data parameter metode tidak langsung

Parameter	Operasi	Satuan
Analisis Ultimate LNG		
Hidrogen	23,9	%
Oksigen	0,8	%
Sulfur	0	%
Carbon	72,1	%
Nitrogen	3,2	%
CO ₂ (Gas buang)	9,7	%
O ₂ (Gas buang)	11,8	%
Suhu gas buang (Tf)	200	°C
Suhu ambien (Ta)	33	°C
Humidity	0,0194	Kg/kg udara
GCV	13073,61	kcal/kg

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil

Nilai efisiensi boiler berdasarkan metode langsung diperoleh melalui persamaan 1 dilampirkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data hasil perhitungan metode langsung

Parameter	Efisiensi Boiler (%)
$\eta_{\text{boiler GCV}}$	81,90%
$\eta_{\text{boiler NCV}}$	90,65%

Perhitungan efisiensi dengan metode tidak langsung dilakukan berdasarkan standar ASME PT-4-1 *Power Test Code Steam Generating Units* dari Amerika Serikat. Namun, dalam penerapannya, tidak seluruh persamaan digunakan, melainkan disesuaikan dengan karakteristik bahan bakar yang digunakan. Bahan bakar pada unit *boiler* PT. Satoria Aneka Industri berupa LNG (*Liquified Natural Gas*), sehingga hanya beberapa persamaan *heat loss* yang dapat dihitung [3, 7].

Tabel 4. Data hasil perhitungan metode tidak langsung

Parameter	Heat loss (%)
L1	10,776
L2	10,884
L3	0,00434
L6	0,5
Total	22,164
Efisiensi boiler	77,836

3.2. Pembahasan

Hasil perhitungan efisiensi pada boiler 4 tipe *Fire Tube* dengan menggunakan metode langsung menunjukkan efisiensi sebesar 81,90% berdasarkan *Gross Caloric Value* (GCV) dan 90,65% berdasarkan *Net Caloric Value* (NCV). Efisiensi boiler menggunakan GCV selalu lebih rendah karena menambahkan energi panas laten uap air, sedangkan NCV mengabaikan panas laten uap air yang terbentuk pada proses pembakaran [14]. Efisiensi boiler yang dihitung menggunakan metode tidak langsung diperoleh sebesar 77,84%. Basis yang digunakan pada metode tidak langsung adalah *Gross Caloric Value* (GCV), sehingga hasil perbandingan efisiensi boiler metode tidak langsung lebih kecil terhadap efisiensi metode langsung. Hasil yang diperoleh sama dengan penelitian Prasojo, dkk. (2020) dimana metode tidak langsung memiliki nilai efisiensi lebih kecil dibandingkan metode langsung [15]. Hal ini dikarenakan metode tidak langsung mengukur semua *heat loss* yang terjadi seperti *heat loss* pada gas buang, penguapan air akibat kandungan H₂ dalam bahan bakar, penguapan kadar air dalam udara kering, serta *heat loss* karena radiasi dan konveksi, sedangkan pada metode langsung hanya membandingkan panas yang dibutuhkan *steam* dengan panas yang disediakan oleh bahan bakar. Sehingga efisiensi metode tidak langsung memberikan hasil yang lebih akurat dan lebih rinci dalam memberikan informasi *heat loss* pada alat boiler.

Heat loss karena gas buang kering merupakan *losses* yang terjadi akibat panas terbuang ke atmosfer. *Heat loss* yang disebabkan oleh gas buang kering (L1) pada Tabel 4, sebesar 10,78%. Suhu *flue gas* berkisar pada 180°C-200°C dimana semakin tinggi suhu *flue gas* maka semakin besar panas yang terbuang [9]. Hal ini dapat disebabkan karena adanya kotoran yang menempel pada *tube boiler* sehingga mengganggu proses transfer panas. Dampak transfer panas yang buruk adalah banyaknya energi panas dibawa oleh gas buang, sehingga suhu gas buang meningkat dan menyebabkan *heat loss* yang lebih besar. *Heat loss* akibat kandungan H₂ dalam bahan bakar yang bereaksi dengan udara kering menghasilkan uap air (H₂O) [9]. Akibatnya sebagian energi panas digunakan untuk menguapkan H₂O, sehingga mengurangi jumlah panas pembentukan *steam*. Berdasarkan Tabel 4, *heat loss* dari kandungan H₂ pada bahan bakar yang dihitung menggunakan metode tidak langsung sebesar 10,88%. Uap air yang terbentuk mengandung panas laten dan sensibel. Apabila suhu gas buang lebih tinggi dari titik kondensasi uap air, uap tidak akan terkondensasi dan panas laten akan hilang sepenuhnya.

Heat loss lain yang dapat terjadi pada boiler adalah akibat adanya kadar air di dalam udara (*humidity*). Sehingga pada saat proses pembakaran, panas yang seharusnya digunakan untuk pembuatan *steam* sebagian digunakan untuk menguapkan kandungan air

dalam udara tersebut [9]. Nilai *heat loss* karena kadar air di dalam udara yang dihitung menggunakan metode tidak langsung sebesar 0,004345%. Uap air mengandung panas laten dan panas sensibel sehingga apabila suhu gas buang lebih tinggi dari pada suhu kondensasi uap air maka panas yang terkandung akan hilang melalui cerobong asap. *Heat loss* selanjutnya karena radiasi pada permukaan *boiler* ke lingkungan sekitar. Semakin tinggi suhu permukaan *boiler* maka semakin besar perbedaan suhu dengan lingkungan sekitar sehingga memperbesar *heat loss* [9]. *Heat loss* akibat radiasi dapat dihitung melalui metode tidak langsung yang mengacu pada standar ASME PTC 4 dapat dilihat pada Tabel 3.10. Nilai *heat loss* radiasi pada Tabel 4 di alat *boiler* 4 PT Satoria Aneka Industri sebesar 0,5%. Selain adanya faktor faktor tersebut, adanya penggunaan kapasitas pada *boiler* mempengaruhi hasil efisiensi. Kapasitas *boiler* yang digunakan hanya sebesar 30,1% dari kapasitas total yakni 6 ton/hari. Dengan demikian, *boiler* tidak dioperasikan pada kapasitas maksimum, melainkan dijalankan sesuai dengan kebutuhan uap yang diperlukan [11].

Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan yang telah dilakukan, nilai efisiensi *Boiler* 4 di PT Satoria Aneka Industri yang diperoleh dengan metode langsung adalah sebesar 81,90%, sedangkan metode tidak langsung menghasilkan nilai sebesar 77,84%. Perbedaan hasil tersebut menunjukkan adanya pengaruh dari pendekatan perhitungan yang digunakan, terutama karena metode tidak langsung mempertimbangkan berbagai bentuk *heat loss* selama proses operasi. Meskipun demikian, kedua nilai efisiensi tersebut masih berada dalam kisaran efisiensi *boiler* industri yang baik, yaitu 70% hingga 90% [16]. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja *Boiler* 4 masih tergolong baik dan masih mampu mendukung kebutuhan proses produksi secara efektif.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa efisiensi *Boiler* 4 di PT Satoria Aneka Industri yang dihitung menggunakan metode langsung sebesar 81,90%, sedangkan dengan metode tidak langsung sebesar 77,84%. Kedua nilai tersebut menunjukkan adanya perbedaan hasil perhitungan yang disebabkan oleh perbedaan pendekatan analisis yang digunakan. Metode langsung menghitung efisiensi berdasarkan perbandingan energi uap yang dihasilkan terhadap energi bahan bakar, sementara metode tidak langsung memperhitungkan berbagai *heat loss* yang terjadi selama proses operasi. Nilai tersebut masih berada dalam rentang efisiensi *boiler* industri yang baik, yaitu 70%–90%, sehingga dapat dinyatakan bahwa *Boiler* 4 masih layak beroperasi dan mampu bekerja secara optimal dalam menunjang kebutuhan proses produksi.

Sebagai saran untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan perbandingan efisiensi antar *boiler* yang terdapat pada unit utilitas PT Satoria Aneka Industri. Hal ini bertujuan untuk memperoleh gambaran performa masing-masing *boiler* secara lebih menyeluruh, mengidentifikasi potensi perbaikan efisiensi pada unit tertentu, serta mendukung upaya peningkatan kinerja energi secara berkelanjutan di lingkungan industri. Selain itu, disarankan pula untuk mengevaluasi kemungkinan penambahan alat *economizer* pada sistem *boiler*. *Economizer* berfungsi untuk memanfaatkan panas dari gas buang (*flue gas*) guna memanaskan air umpan sebelum masuk ke *boiler*, sehingga dapat menurunkan konsumsi bahan bakar dan meningkatkan efisiensi termal. Namun, penggunaan *economizer* juga memiliki beberapa kekurangan yang perlu dipertimbangkan, seperti risiko korosi pada

tabung *economizer* akibat kandungan asam dalam gas buang. Oleh karena itu, perencanaan penerapan *economizer* harus mencakup evaluasi teknis terhadap komposisi gas buang, material tahan korosi, serta perawatan rutin untuk mencegah penurunan umur pakai dan memastikan pengoperasian yang optimal

REFERENSI

- [1] C. D. M. O. Ranaraja, J. W. Devasurendra, M. I. P. Maduwantha, G. A. L. Madhuwantha, dan R. Y. D. Hansa, "Optimization of an Industrial Boiler Operation," *Jurnal of Research Technology and Engineering*, vol. 1, no. 3, hal. 126–134, 2020.
- [2] N. T. Sahda, J. M. Sentosa, dan L. Adhani, "Analisis Efisiensi Boiler menggunakan Metode Langsung di Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Bantargebang," *Jurnal of Engineering Environtmental Energy Science*, vol. 1, no. 1, hal. 39–48, 2022.
- [3] G. P. A. Gumelar, M. N. Dewi, A. Miftah, W. Endranaka, dan B. A. F. Eka, "Analisis Efisiensi Boiler Berbahan Bakar Gas di PT XYZ Menggunakan Metode Langsung dan Tidak Langsung," *TREnD: Technology of Renewable Energy and Development*, vol. 2, no. 2, hal. 22–28, Jun 2022.
- [4] N. M. Pratama, Danial, dan M. Taufiqurrahman, "Analisa Efisiensi Water Tube Boiler Dengan Menggunakan Metode Langsung," *Jurnal Teknonolgi Rekayasa Teknik Mesin*, vol. 2, no. 2, hal. 105–110, 2021.
- [5] S. P. Wicaksana, A. Rahmatulloh, dan R. Subandi, "Analisis Efisiensi Boiler Fire Tube pada Produksi STTP di PT Petrocentral Gresik Menggunakan Metode Langsung dan Tidak Langsung," *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 9, no. 9, hal. 258–265, 2023.
- [6] M. Rochim dan R. Oktaviansyah, "Perhitungan Efisiensi Boiler TWA dengan Metode secara Tidak Langsung," *Migas Zoom: Jurnal Nasional Pengelolaan Energi*, vol. 6, no. 2, hal. 85–92, Nov 2024.
- [7] D. Darmawan dan S. Winarto, "Perbandingan Efisiensi pada Boiler II TWA PPSDM Migas Menggunakan Metode Langsung dan Tidak Langsung Periode Bulan Maret 2023," *Migas Zoom: Jurnal Nasional Pengelolaan Energi*, vol. 5, no. 2, hal. 167–174, Mar 2023.
- [8] M. Sagaf dan S. Alim, "Analisa Faktor-Faktor Penyebab Perubahan Efisiensi Boiler Jenis Pulverized Forced Circulation Sub-critical Pressure Menggunakan Metode Tidak Langsung," *Teknoin: Jurnal Teknik Elektro Universitas Islam Nahdlatul Ulama*, vol. 24, no. 2, hal. 147–158, 2018.
- [9] N. A. Z. Putri, I. Yuliani, dan S. Widarti, "Pengaruh Pemakaian Jenis Bahan Bakar Terhadap Kinerja Boiler dengan Metode Langsung dan Tidak Langsung," *Surya Teknika: Jurnal Teknologi Konversi Energi*, vol. 11, no. 2354–6751, hal. 349–356, 2024.
- [10] I. W. Joniarta, R. R. Al Buhori, dan M. Wijana, "Analisis Efisiensi Boiler CFB Unit 3 Menggunakan Metode Langsung di PT PLN Indonesia Power Omu Jeranjang," *Energy, Materials and Product Design*, vol. 3, no. 1, hal. 156–162, Mei 2024.
- [11] H. M. Baringbing dan N. Sinaga, "Analisis Efisiensi Water Tube Boiler Menggunakan Metode Langsung di Pt. Toba Pulp Lestari, Tbk Porsea-Sumatera Utara," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 11, no. 2, hal. 49–68, 2023.
- [12] A. A. Kharisma dan A. Budiman, "Perhitungan Efisiensi Mesin Boiler Jenis Fire Tube Menggunakan Metode Direct dan Indirect Untuk Produk Butiran Pelet," *Universitas Gunadarma Jurnal*, vol. 14, no. 12, hal. 1–10, Des 2020.

- [13] K. Saidah, D. S. Barus, dan A. Razak, "Analisis Peluang Penghematan Energi Pada Boiler Dengan Kapasitas 40 Ton/Jam Di Pks Aek Loba Pt. Socfin Indonesia," *Sinergi POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 3, no. 1, hal. 45–54, 2022.
- [14] E. R. Ogara, A. Fadhillah, dan A. Ilham, "Penentuan Peringkat dan Pengaruh Karakteristik Batubara Terhadap Nilai Kalori," *JGE: Jurnal Geofisika Eksplorasi*, vol. 9, no. 2, hal. 122–130, Jul 2023.
- [15] A. B. Prasojo, L. Hakim, dan A. Rijanto, "Analisis Efisiensi Boiler Hamada Dengan Direct dan Indirect Method di Pt Dayasa Aria Prima," *Majamecha: Jurnal Universitas Islam Majapahit*, vol. 2, no. 2, hal. 103–112, Des 2020.
- [16] D. Aprilia, "Penentuan Efisiensi Boiler Dengan Menggunakan Metode Langsung di Pt X Lumajang," *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 7, no. 2, hal. 421–426, 2021.