

---

# Perhitungan Efisiensi Boiler TWA dengan Metode Secara Tidak Langsung

Mochammad Rochim, Rendi Oktaviansyah  
*PPSDM MIGAS*

## INFORMASI NASKAH

Diterima : 10 Juni 2024  
Direvisi : 22 November 2024  
Disetujui : 6 Desember 2024  
Terbit : 6 Desember 2024

Email korespondensi:  
[mochammad.rochim@esdm.go.id](mailto:mochammad.rochim@esdm.go.id)

Laman daring:  
[https://doi.org/10.37525/  
mz/2024-2/610](https://doi.org/10.37525/mz/2024-2/610)

## ABSTRAK

Efisiensi boiler merupakan indikator utama dalam menentukan kinerja operasional sistem boiler di industri, termasuk di PPSDM MIGAS. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung efisiensi Boiler TWA dengan metode tidak langsung, yang mempertimbangkan kerugian panas untuk mengidentifikasi potensi peningkatan kinerja. Berdasarkan kajian pustaka, metode tidak langsung dinilai lebih akurat dalam mengevaluasi efisiensi karena mempertimbangkan parameter seperti suhu dan komposisi gas buang, kelembaban udara, dan kerugian panas lainnya. Penelitian dilakukan pada bulan Juli 2024 melalui survei, observasi langsung, dan studi literatur. Hasil perhitungan menunjukkan efisiensi Boiler TWA sebesar 83,19%, yang masih berada dalam batas efisiensi minimum sebesar 75% menurut ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) PTC 4. Namun, hasil ini belum mencapai tingkat efisiensi tertinggi yang mungkin dicapai. Faktor-faktor yang memengaruhi penurunan efisiensi termasuk kebocoran pada tabung, kerak pada pipa, dan ketidaklancaran aliran fluida. Penelitian ini menyimpulkan bahwa meskipun efisiensi Boiler TWA memenuhi persyaratan operasional, perbaikan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan kinerja.

**Kata kunci:** Boiler, Efisiensi, Metode Tidak Langsung, Kerugian Panas.

## ABSTRACT

Boiler efficiency is a key indicator in determining the operational performance of boiler systems in industries, including at PPSDM MIGAS. This study aims to calculate the efficiency of the TWA Boiler using the indirect method, which considers heat losses to identify potential performance improvements. Based on literature review, the indirect method is considered more accurate in evaluating efficiency as it takes into account parameters such as exhaust gas temperature and composition, air humidity, and other heat losses. The research was conducted in August 2024 through surveys, direct observations, and literature studies. The calculation results show that the efficiency of the TWA Boiler is 83.19%, which is still within the minimum efficiency limit of 75% according to ASME (American Society of Mechanical Engineers) PTC 4. However, this result has not yet reached the highest possible efficiency level. Factors affecting the decrease in efficiency include tube leaks, pipe scaling, and fluid flow obstructions. This study concludes that although the TWA Boiler efficiency meets operational requirements, further improvements are needed to enhance performance

**Keywords:** Fire-tube boilers, efficiency, indirect methods

## PENDAHULUAN

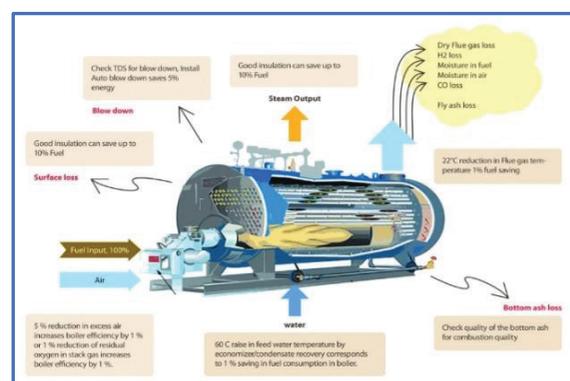
Boiler adalah bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan uap. Uap yang dihasilkan dari boiler ini pada umumnya berasal dari proses pembakaran yang menggunakan bahan bakar gas, cair maupun bahan bakar padat. Pada industri migas, uap yang dihasilkan bisa digunakan untuk proses pembangkitan listrik, proses di kilang, pemanas, *steam flooding* dan sebagainya.

Efisiensi boiler adalah sebuah besaran yang menunjukkan hubungan antara suplai energi masuk ke dalam boiler dengan energi keluaran yang dihasilkan oleh boiler. Efisiensi pembakaran pada boiler secara umum menjelaskan kemampuan sebuah *burner* untuk membakar keseluruhan bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar (*furnace*) boiler. Efisiensi boiler dihitung dari jumlah bahan bakar yang tidak terbakar bersamaan dengan jumlah udara sisa pembakaran (*excess air*). Pembakaran pada boiler dapat dikatakan efisien apabila tidak ada bahan bakar yang tersisa di ujung keluaran ruang bakar boiler, begitu pula dengan jumlah udara sisa.

Untuk mendapatkan efisiensi pembakaran yang tinggi, *burner* dan ruang bakar boiler harus didesain seoptimum mungkin. Di sisi lain perbedaan penggunaan jenis bahan bakar juga mempengaruhi efisiensi pembakaran. Diketahui bahwa bahan bakar cair (seperti solar dan residu)

dan gas (seperti LPG dan LNG) menghasilkan efisiensi pembakaran yang lebih tinggi jika dibandingkan bahan bakar padat seperti batubara. Gambar di bawah ini menunjukkan sistem operasi secara umum pada suatu boiler, dimana gas panas hasil pembakaran yang digunakan untuk memanaskan air umpan boiler yang akan menghasilkan *steam* atau uap bertekanan. Tetapi pada proses pembakaran ini tidak mungkin berlangsung secara sempurna mengingat adanya panas yang hilang selama proses pembakaran terjadi, seperti panas yang terbuang melalui stack atau cerobong asap, *blow down*, dan kehilangan panas di permukaan boiler.

## TINJAUAN PUSTAKA



Gambar 1. Sistem Boiler

**A. Efisiensi Boiler**

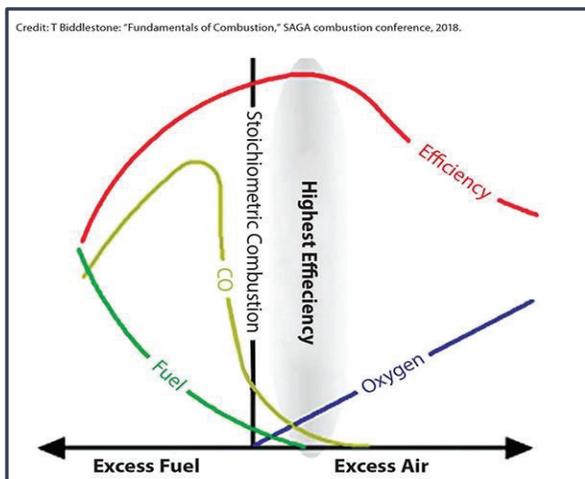
Perhitungan efisiensi pembakaran pada boiler dilakukan dengan menggunakan rumus seperti di bawah ini, dimana jumlah total energi panas yang dilepas oleh pembakaran dikurangi dengan energi panas yang lolos melewati *stack* (cerobong asap), dibagi dengan total energi panas.

$$\eta_{combustion} = \frac{Q_{in} - Q_{losses}}{Q_{in}} \times 100\%$$

Dimana :

- $\eta_{combustion}$  : Efisiensi pembakaran boiler (%)
- $Q_{in}$  : Energi panas total hasil pembakaran (kalori; Joule)
- $Q_{losses}$  : Energi panas lolos melewati cerobong asap (kalori; Joule)

Satu-satunya yang sulit dari efisiensi pembakaran adalah bagaimana mengejar angka yang paling optimal. Efisiensi pembakaran ditandai dengan terbakarnya keseluruhan bahan bakar di ruang bakar. Sedangkan parameter kontrol yang digunakan untuk memastikan keseluruhan bahan bakar terbakar, adalah jumlah udara sisa pembakaran (*excess air*) yang keluar melalui *stack*. Semakin banyak jumlah *excess air* yang keluar melewati cerobong asap, maka semakin kecil pula kemungkinan jumlah bahan bakar yang belum terbakar bisa melewati cerobong asap. Namun juga, semakin banyak jumlah *excess air* yang lolos melewati cerobong asap, jumlah energi panas yang lolos terbawa oleh udara sisa tersebut juga semakin banyak. Maka dari itu ada angka optimum dari besaran *excess air*, sehingga didapatkan efisiensi pembakaran boiler yang paling optimal.



Gambar 2. Efisiensi Thermal Boiler

Nampak pada ilustrasi grafik di atas bahwa semakin tinggi jumlah udara (oksigen) yang lolos melewati *stack*, maka akan semakin kecil jumlah bahan bakar termasuk karbon monoksida yang belum terbakar sempurna. Namun juga seperti yang telah kita bahas di atas, semakin tinggi jumlah *excess air* maka grafik efisiensi pembakaran kembali turun, tidak lain hal ini dikarenakan energi panas yang ikut lolos dengan udara sisa tersebut. Maka dapat dipastikan ada nilai paling optimum dari *excess air* sehingga didapatkan efisiensi pembakaran paling baik. Secara umum nilai *excess air* optimum untuk pembakaran gas alam (LPG dan LNG) adalah 5 -10%, bahan bakar cair di angka 5 - 20%, dan 15-60% untuk pembakaran batubara. Oleh sebab itu penggunaan bahan bakar gas alam relatif jauh lebih bersih dibanding menggunakan bahan bakar jenis lainnya. Menurut Babcox & Wilcox, a McDermott Company nilai dari *excess air*.

Fuel	Excess air, % by weight
Pulverized coal	15-20
Coal	
Fluidized bed combustion	15-20
Spreader stoker	25-35
Water-cooled vibrating grate stoker	25-35
Chain and traveling grate stoker	25-35
Underfeed stoker	25-40
Fuel oil	3-15
Natural gas	3-15
Coke oven gas	3-15
Blast furnace gas	15-30
Wood/bark	20-25
Refuse-derived fuel (RDF)	40-60
Municipal solid waste (MSW)	80-100

SOURCE: Babcock & Wilcox, a McDermott company.

Gambar 3. Range *excess air* pada beberapa jenis bahan bakar pada boiler

**B. Perhitungan Efisiensi Dengan Metode Tidak Langsung**

Dikenal ada dua metode untuk menghitung efisiensi pada boiler, yaitu metode langsung dan metode tak langsung. Metode tidak langsung adalah cara yang digunakan untuk menghitung efisiensi boiler dengan cara menghitung besarnya presentase panas yang tidak bermanfaat. Metode ini sangat efektif digunakan dalam usaha untuk menemukan potensi penghematan bahan bakar boiler. Untuk menghitung metode ini kita harus menghitung besarnya panas yang masuk serta

panas keluar pada suatu boiler.

Rumusan sederhana dari perhitungan metode tidak langsung adalah sebagai berikut:

$$\eta_{\text{boiler}} = 1 - \frac{\text{Total kehilangan panas}}{\text{total panas digunakan}} \times 100 \%$$

$$= 1 - \frac{Q'_{fg} + Q'_{ma} + Q'_w + Q'_H + Q'_{BD} + Q'_{wall}}{Q_p + Q_f + Q_w + Q_{AI} + Q_{ma} + Q_{fw}} \times 100 \%$$

Dimana :

- $Q'_{fg}$  : Emisi gas hasil pembakaran
- $Q'_{ma}$  : Panas yang terbawa uap air dalam gas asap karena kelembaban udara dalam pembakaran
- $Q'_w$  : Panas yang terbawa oleh uap air dalam gas asap karena kelembaban bahan bakar
- $Q'_H$  : Panas yang terbawa oleh uap air dalam gas asap karena adanya hydrogen dalam bahan bakar
- $Q'_{BD}$  : Panas yang terbawa oleh Blow Down
- $Q'_{wall}$  : Panas yang hilang melalui dinding
- $Q'_p$  : Panas hasil pembakaran bahan bakar
- $Q'_f$  : Panas sensible bahan bakar
- $Q'_w$  : Panas sensible air karena kelembaban bahan bakar
- $Q_{AI}$  : Panas sensible udara pemakaian
- $Q_{ma}$  : Panas sensible air karena kelembaban udara
- $Q_{fw}$  : Panas sensible air umpan

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan selama bulan Juli 2024 di PPSDM Migas pada unit Boiler TWA. Penelitian yang dilakukan bersifat kuantitatif yaitu "Perhitungan Efisiensi Boiler TWA Dengan Metode Secara Tidak Langsung". Dengan penentuan nilai efisiensi faktor yang mempengaruhi efisiensi juga dapat diketahui. Sehingga dapat menjadi pembandingan dan upaya untuk meningkatkan nilai efisiensi boiler.

Proses pengumpulan data dilakukan melalui tiga pendekatan utama. Pendekatan pertama adalah survei, yaitu mengecek langsung pada alat. Pendekatan kedua adalah observasi, di mana data diperoleh melalui pengamatan langsung terhadap operasi boiler, termasuk pengukuran parameter operasional yang terkait. Pendekatan terakhir adalah studi literatur, yang melibatkan analisis

dokumen seperti jurnal perusahaan, petunjuk kerja operator, diagram teknis, serta buku-buku referensi yang mendukung penelitian.

Data yang diperoleh akan diolah dengan beberapa tahap yaitu :

- (1) Menghitung nilai HHV.
- (2) Menghitung reaksi pembakaran
- (3) Perhitungan Kebutuhan udara
- (4) Perhitungan panas yang masuk dan keluar dari boiler.
- (5) Perhitungan efisiensi dengan metode tidak langsung.

Pendekatan dan pengolahan data ini digunakan untuk memahami kinerja boiler secara menyeluruh dan mengidentifikasi peluang peningkatan efisiensi.

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian kali ini akan dihitung efisiensi boiler dengan menggunakan metode tidak langsung. Dimana data yang digunakan adalah Boiler TWA di PPSDM MIGAS, dimana spesifikasi teknisnya adalah sebagai berikut :

- Tipe : fire tube (pipa api)
- Kapasitas maksimum : 6 ton/jam
- Tekanan Operasi :  $\pm 4 \text{ kg/cm}^2$
- Tekanan maksimal :  $\pm 10 \text{ kg/cm}^2$
- Temperatur Operasi :  $\pm 130 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Temperatur Maksimal :  $\pm 180 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Dari data diatas bisa diketahui bahwa boiler yang dioperasikan merupakan jenis fire tube dengan kategori kapasitas dan tekanan rendah. Data - data operasi harian boiler dapat kita lihat seperti dibawah ini:

Tabel 1. Data bahan bakar

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Temperatur	$T_f$	58	$^\circ\text{C}$
Tekanan	$P_f$	13	$\text{kg/cm}^2$
Specific Gravity	SG(60/60)	0,9128	$\text{kg/L}$
Laju Alir	$W_f$	237	$\text{kg/jam}$
% Air	$W_{Af}$	0,095	$\%$
Panas Jenis Bahan Bakar	$C_{pf}$	0,48	$\text{J/kg}^\circ\text{C}$
Enthalpy	H'sup	672,08	$\text{KJ/Kg}$

Tabel 2. Data umpan boiler

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Suhu	$T$	65	$^\circ\text{C}$
Tekanan	$P_w$	0,1	$\text{kg/cm}^3$
Volume Spesifik	$V_w$	0,00102	$\text{m}^3/\text{Kg}$

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Enthalpy	H	272,06	KJ/Kg
Laju aliran	W <sub>w</sub>	4450	Kg/jam

Tabel 3. Data blow down

Parameter	Simbol	Jumlah	Satuan
Suhu	t <sub>BD</sub>	90	°C
Tekanan	P <sub>BD</sub>	0,7	kg/cm <sup>3</sup>
Enthalpy	H <sub>BD</sub>	376,85	KJ/Kg
Laju aliran	h <sub>BD</sub>	686,42	Kg/jam

Tabel 4. Data produksi uap

Parameter	Simbol	Jumlah	Satuan
Suhu	t <sub>s</sub>	180	°C
Tekanan	P <sub>s</sub>	4	kg/cm <sup>3</sup>
Enthalpy	H <sub>s</sub>	2778,2	KJ/Kg
Laju aliran	W <sub>s</sub>	3763,58	Kg/jam

Tabel 5. Data udara masuk

Parameter	Simbol	Jumlah	Satuan
Suhu	t <sub>a</sub>	30	°C
Humidity	R <sub>H</sub>	70	°C
Ratio kelembaban	M <sub>A</sub>	0,018	
Panas Spesifik udara	C <sub>pa</sub>	0,24	kkal/kg

Tabel 6. Data gas asap keluar

Parameter	Simbol	Jumlah	Satuan
Suhu	t <sub>fg</sub>	180	°C
Tekanan	P <sub>fg</sub>	5	kg/cm <sup>3</sup>
H' Supp		2.812	KJ/Kg
Laju aliran	W <sub>fg</sub>		Kg/jam

**A. Perhitungan HHV ( Higher Heating Value)**

Perhitungan ini digunakan untuk mengukur nilai kalor tertinggi yang dihasilkan dari kondensasi uap air yang terbentuk selama pembakaran.

Tabel 7. Data Komposisi Bahan Bakar

Komposisi	Persentase	x
Karbon (C)	86,20%	0,8620
Hidrogen (H)	12,39%	0,1239
Oksigen (O)	0,37%	0,0037
Nitrogen (N)	0,12%	0,0012
Sulfur (S)	0,39%	0,0039
Abu (Ash)	0,10%	0,0010
Air (H <sub>2</sub> O)	0,43%	0,0043

Nilai HHV di hitung menggunakan rumus berikut:

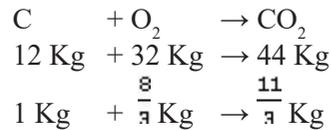
$$\begin{aligned}
 HHV &= 8.080 \times C + 34.500 \left( H_2 - \frac{O^2}{8} \right) \\
 &\quad + 2.220 \times S \\
 &= 8.080 \times 0,8620 + 34.500 \left( 0,1239 - \frac{0^2}{8} \right) \\
 &\quad + 2.220 \times 0,0039 \\
 &= 11.232,212 \text{ kg/jam}
 \end{aligned}$$

**B. Perhitungan Reaksi Pembakaran**

Reaksi pembakaran yang terjadi dibagi ke dalam 3 bagian khusus yaitu

1. Reaksi Pembakaran karbon

Jika karbon (C) dibakar akan menghasilkan karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dengan reaksi.



Maka berat dari tiap unsur dapat dihitung

- Unsur Karbon dalam bahan bakar

$$\begin{aligned}
 C &= x \cdot C \times W_f \\
 &= 0,8620 \times 237 \\
 &= 204,294
 \end{aligned}$$

- Unsur oksigen untuk kebutuhan pembakaran

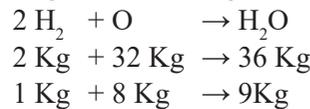
$$\begin{aligned}
 O_2 &= \frac{8}{3} \times C \\
 &= \frac{8}{3} \times 204,294 \\
 &= 544,784
 \end{aligned}$$

- Unsur karbon dioksida Hasil Pembakaran

$$\begin{aligned}
 CO_2 &= \frac{11}{3} \times C \\
 &= \frac{11}{3} \times 204,294 \\
 &= 749,0748
 \end{aligned}$$

2. Reaksi Pembakaran Hidrogen

Jika hydrogen dibakar akan menghasilkan air (H<sub>2</sub>O), dengan reaksi sebagai berikut



Maka berat dari tiap unsur dapat dihitung

- Unsur hidrogen dalam bahan bakar

$$\begin{aligned}
 H_2 &= x \cdot H_2 \times W_f \\
 &= 0,1239 \times 237 \\
 &= 29,3643
 \end{aligned}$$

- Unsur oksigen untuk kebutuhan pembakaran

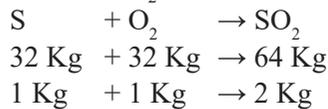
$$\begin{aligned}
 O &= 8 \times H_2 \\
 &= 8 \times 29,3643 \\
 &= 234,9144
 \end{aligned}$$

- Unsur hidrogen dioksida Hasil Pembakaran

$$\begin{aligned}
 H_2O &= 9 \times H_2 \\
 &= 9 \times 29,3643 \\
 &= 264,2787
 \end{aligned}$$

### 3. Reaksi Pembakaran Sulfur

Jika Sulfur (S) dibakar akan menghasilkan sulfur dioksida (CO<sub>2</sub>) dengan reaksi.



Maka berat dari tiap unsur dapat dihitung

- Unsur Sulfur dalam bahan bakar

$$\begin{aligned} S &= x \cdot S \times W_f \\ &= 0.0039 \times 237 \\ &= 0,9243 \end{aligned}$$

- Unsur oksigen untuk kebutuhan pembakaran

$$\begin{aligned} O_2 &= 1 \times S \\ &= 1 \times 0,9243 \\ &= 0,9243 \end{aligned}$$

- Unsur sulfur dioksida Hasil Pembakaran

$$\begin{aligned} SO_2 &= 2 \times S \\ &= 2 \times 0,9243 \\ &= 1,8486 \end{aligned}$$

### C. Perhitungan Kebutuhan Udara

#### 1. Koefisien Kelebihan udara (M)

Diasumsikan udara terdiri dari: 79% volume N<sub>2</sub> dan 21% volume O<sub>2</sub>, adapun secara berat adalah 77% berat N<sub>2</sub> dan 23% berat O<sub>2</sub>. Data dibandingkan dengan data analisis orsat gas asap (kebutuhan udara sebenarnya) dengan kebutuhan udara teoritis.

Tabel 8. Data Analisis orsat gas asap

Komposisi	Persentase
Karbon Dioksida (CO <sub>2</sub> )	12,00 %
Oksigen (O <sub>2</sub> )	5,60 %
Karbon Monoksida (CO)	0,00 %
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	82,20 %

Nilai di hitung menggunakan rumus berikut:

$$M = \frac{21 \times (\%N_2)}{21 \times (\%N_2) - 79 \times (\%O_2)}$$

$$= \frac{21 \times (82,20)}{21 \times (82,20) - 79 \times (5,60)}$$

$$= 1726,2/1726 = 1,3444$$

2. Kebutuhan Udara untuk pembakaran sempurna (W<sub>o</sub>)

$$W_o = \frac{8}{3} C + (8 \times H_2) + S$$

$$\begin{aligned} &= \frac{8}{3} 204,294 + (8 \times 29,3643) + 0,9243 \\ &= 780,6227 \text{ Kg/jam} \end{aligned}$$

3. Kebutuhan udara sebenarnya secara teoritis (W<sub>a</sub>).

$$\begin{aligned} W_a &= \frac{100}{79} \times W_o \\ &= \frac{100}{79} \times 780,6227 \\ &= 3.394,0117 \text{ Kg/ Jam} \end{aligned}$$

4. Kebutuhan udara sebenarnya (W<sub>A</sub>)

$$\begin{aligned} W_A &= M \times W_a \\ &= 1,3444 \times 3394,0117 \\ &= 4.563,0661 \text{ kg/ jam} \end{aligned}$$

5. Gas asap hasil pembakaran (W<sub>fg</sub>)

$$\begin{aligned} \% \text{ Excess air} &= \frac{W_A - W_a}{W_a} \times 100 \% \\ &= \frac{4.563,0661 - 3.394,0117}{3.394,0117} \times 100\% \\ &= 34,44 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{fg} &= \frac{11}{3} C + (9 \times H_2) + (2 \times S) + (0,77 \times W_A) + (0,23 \times \% \text{ excess air}) \\ &= \frac{11}{3} 204,294 + (9 \times 29,3643) + (2 \times 0,9243) + (0,77 \times 4.563,0661) + (0,23 \times 34,44 \%) \\ &= 4.797,6487 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

6. Kadar abu yang keluar (W<sub>abu</sub>)

$$\begin{aligned} W_f + W_A &= W_{fg} + W_{abu} \\ 237 + 4.563,0661 &= 4.797,6487 + W_{abu} \\ W_{abu} &= 237 + 4.563,0661 - 4.797,6487 \\ &= 2,4174 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

### D. Perhitungan Neraca Panas Masuk

1. Panas hasil Pembakaran bahan bakar (Q<sub>p</sub>)

$$\begin{aligned} Q_p &= W_f \times HHV \\ &= 237 \text{ kg/jam} \times 11.232,212 \text{ kcal/kg} \\ &= 2.662.034,2440 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

2. Panas sensible bahan bakar (Q<sub>f</sub>)

$$\begin{aligned} Q_f &= (1 - W_{Af}) \times C_{pf} \times t_f \times W_f \\ &= (1 - 0,00095) \times 0,48 \times 70 \times 237 \\ &= 7955,6350 \end{aligned}$$

3. Panas sensible air karena kelembaban bahan bakar ( $Q_w$ )

$$\begin{aligned} Q_w &= WA_f \times C_{pf} \times t_f \times W_f \\ &= 0,00095 \times 0,48 \times 70 \times 237 \\ &= 7,5650 \end{aligned}$$

4. Panas sensible bahan bakar ( $Q_{AI}$ )

$$\begin{aligned} Q_{AI} &= W_A \times C_{pa} \times t_a \\ &= 3.394,0117 \times 0,24 \times 40 \\ &= 43.805,4346 \end{aligned}$$

5. Panas sensible air karena kelembaban udara ( $Q_{ma}$ )

$$\begin{aligned} Q_{ma} &= W_A \times C_{pa} \times t_a \times M_A \\ &= 4.563,0661 \times 0,24 \times 40 \times 0,018 \\ &= 788,4978 \end{aligned}$$

6. Panas sensible air umpan ( $Q_{fw}$ )

$$\begin{aligned} Q_{fw} &= W_w \times h_w \\ &= 4450 \times 65,02 \\ &= 289.339,0000 \end{aligned}$$

### E. Perhitungan Neraca Panas Keluar

1. Panas yang terbawa oleh hasil uap ( $Q'_s$ )

$$\begin{aligned} Q'_s &= W_s \times h_g \\ &= 3763,58 \times 664,01 \\ &= 2.499.054,76 \end{aligned}$$

2. Panas yang terbawa oleh gas asap ( $Q'_{fg}$ )

$$\begin{aligned} Q'_{fg} &= W_{fg} \times C_{pa} \times t_{fg} \\ &= 4.797,6487 \times 0,24 \times 180 \\ &= 207.258,42 \end{aligned}$$

3. Panas yang terbawa air dalam gas asap karena kelembaban udara dalam pembakaran ( $Q'_{ma}$ )

$$\begin{aligned} Q'_{ma} &= W_A \times M_A \times H'_{sup} \\ &= 4563,0661 \times 0,018 \times 672,08 \\ &= 55.201,42 \end{aligned}$$

4. Panas yang terbawa oleh uap air dalam gas asap karena kelembaban bahan bakar ( $Q'_w$ )

$$\begin{aligned} Q'_w &= WA_f \times M_f \times H'_{sup} \\ &= 0,00095 \times 237 \times 672,08 \\ &= 151,32 \end{aligned}$$

5. Panas yang terbawa oleh uap air dalam gas asap karena adanya hydrogen dalam bahan bakar ( $Q'_H$ )

$$\begin{aligned} Q'_H &= 9 \cdot H_2 \times H'_{sup} \\ &= 9 \times 29,3643 \times 672,08 \end{aligned}$$

$$= 177.616,43$$

6. Panas yang terbawa oleh blow down ( $Q'_{BD}$ )

$$\begin{aligned} Q'_{BD} &= W_{BD} \times h_{BD} \\ &= 686,42 \times 90,09 \\ &= 61.839,58 \end{aligned}$$

7. Panas yang hilang melalui dinding ( $Q'_{wall}$ )

$$\begin{aligned} Q'_{wall} &= \text{panas yang masuk} - \text{panas yang keluar} \\ &= (Q'_{fg} + Q'_{ma} + Q'_w + Q'_H + Q'_{BD}) - \\ &\quad (Q_p + Q_f + Q_w + Q_{AI} + Q_{ma} + Q_{fw}) \\ &= (207.258,42 + 55.201,42 + 151,32 + \\ &\quad 177.616,43 + 61.839,58) - (2.662.034,24 + \\ &\quad 7.955,63 + 7,57 + 43.805,43 + 788,50 + 289.3 \\ &\quad 39,00) \\ &= 3.001.121,92 - 3.007.704,94 \\ &= 6.583,02 \end{aligned}$$

### F. Perhitungan Efisiensi dengan Metode Tidak Langsung

Dari data harian di atas maka kita dapat menghitung Efisiensi boiler secara tidak langsung.

$$\begin{aligned} \eta_{boiler} &= 1 - \frac{\text{Total kehilangan panas}}{\text{total panas digunakan}} \times 100 \% \\ &= 1 - \frac{Q'_{fg} + Q'_{ma} + Q'_w + Q'_H + Q'_{BD} + Q'_{wall}}{Q_p + Q_f + Q_w + Q_{AI} + Q_{ma} + Q_{fw}} \times 100 \% \\ &= 1 - \frac{207.258,42 + 55.201,42 + 151,32 + 177.616,43 + 61.839,58 + 6.583,02}{2.662.034,24 + 7.955,63 + 7,57 + 43.805,43 + 788,50 + 289.339,00} \times 100 \% \\ &= 1 - \frac{504.875,621}{3.003.930,376} \times 100 \% \\ &= 83,19 \% \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan di atas efisiensi boiler TWA melalui metode tidak langsung adalah 83,19% sehingga kita bisa menyimpulkan bahwa boiler tersebut masih sangat baik dan layak digunakan. Berdasarkan standar minimum efisiensi pada boiler di PPSDM Migas adalah 75%. Sebenarnya semakin tinggi efisiensi boiler maka akan semakin baik kinerjanya.

Akan tetapi nilai efisiensi ini dapat mengalami penurunan yang didasari beberapa faktor seperti kebocoran pada tube, adanya flag atau kerak yang menepel pada pipa. Sebagaimana dipaparkan oleh aditiya dalam jurnalnya. Untuk itu agar efisiensi tetap stabil hingga mengalami peningkatan perlu dilakukan perawatan secara berkala.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian tentang efisiensi Boiler II TWA yang menggunakan metode tidak langsung, dapat disimpulkan bahwa efisiensi boiler tersebut mencapai 83,19%. Meskipun angka ini menunjukkan bahwa boiler masih dapat mengubah energi dari bahan bakar menjadi energi panas secara efektif, efisiensi ini belum mencapai tingkat optimal yang dapat dicapai oleh boiler tersebut. Boiler II TWA di PPSDM Migas menunjukkan kinerja yang masih memenuhi persyaratan operasional, karena efisiensinya lebih dari 75%, yang merupakan batas minimal efisiensi boiler untuk operasi yang ideal menurut ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) PTC 4. Meskipun demikian, penurunan performa boiler dapat terjadi akibat faktor-faktor seperti kebocoran pada pipa, adanya endapan atau keretakan pada saluran pipa, serta faktor-faktor lain yang dapat menghambat aliran fluida dan mengurangi efisiensi operasionalnya. Oleh karena itu, masih ada potensi perbaikan yang dapat dilakukan untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi dan optimal.

## DAFTAR PUSTAKA

- Sugiharto, Agus (2020), Perhitungan Efisiensi Boiler Dengan Metode Secara Langsung Pada Boiler Pipa Api. Majalah Ilmiah Swara Patra PPSDM Migas
- Aditya, Darmawan, D. dan Winarto, S. (2023) 'Artikel Perbandingan Efisiensi pada Boiler II TWA PPSDM Migas Menggunakan Metode Langsung dan Tidak Langsung Periode Bulan Maret 2023', (November).
- Ahmad Mahmoudi Lahijani, Eris. E. Supeni and Fatemeh Kalantari, 2008, A Review of Indirect Method For Measuring Thermal Efficiency In Fire Tube Steam Boilers, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University Putra Malaysia, 43400 Serdang, Journal of Industrial Pollution Control 34(1)(2018) pp 1825-1832.
- Bekti Santoso, Ahdiat Leksi Siregar dan Indriana Lestari, Perhitungan Debit Uap Boiler dan Ketercapaian Kebutuhan Uap Pabrik Kapasitas 45 Ton/Jam, Jurnal Citra Widya Edukasi Vol XI No. 1 Juli 2019.
- Sasonko, W. D. Analisis Perhitungan Efisiensi Boiler Kapasitas 55 Ton/Jam di PT PT. PJB (Pembangkit Jawa Bali) PLTU Ketapang 2X10 MW. JTRAIN: Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin, 1(1).
- The American Society of Mechanical Engineers (ASME PTC 4-2008)
- Kern, D.Q. (1983) *Process Heat Transfer*. McGraw-Hill INTERNATIONAL BOOK COMPANY.