

ANALISIS EFISIENSI WATER TUBE BOILER MENGGUNAKAN METODE LANGSUNG DI PT. TOBA PULP LESTARI, Tbk PORSEA-SUMATERA UTARA

Marcell Hasudungan Baringbing¹, Dr. Ir. Nazaruddin Sinaga²

¹Marcell Hasudungan Baringbing, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dr. Ir. Nazaruddin Sinaga, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: marcellhasudungan@gmail.com

Abstrak

Beberapa factor yang mempengaruhi efisiensi boiler adalah tekanan superheater, temperature air umpan, temperature uap, jumlah uap yang dihasilkan, jumlah konsumsi bahan bakar, dan nilai kalor pembakaran bahan bakar. Tujuan dari laporan ini adalah mendapatkan hubungan variasi tekanan superheater dengan efisiensi boiler, hubungan variasi temperature air umpan dengan efisiensi boiler, hubungan variasi jumlah uap yang dihasilkan dengan efisiensi boiler, menganalisa nilai kalor bahan bakar fiber 50% + cangkang sawit 20% + kulit kayu 30% dan menganalisa efisiensi boiler. Dari hasil analisa yang telah dilakukan didapatkan bahwa, semakin tinggi tekanan superheater mengakibatkan penurunan jumlah uap yang dihasilkan namun tidak signifikan, hubungan enthalpy uap dengan efisiensi boiler tidak konstan melainkan naik turun, sama halnya pada hubungan tekanan superheater dengan efisiensi boiler tidak konstan naik maupun turun namun pada tekanan 61,97 bar memiliki efisiensi paling tinggi berdasarkan dari data. Hubungan temperature air umpan dengan efisiensi boiler, berdasarkan data pada suhu 129,5 mencapai efisiensi tinggi, namun setelah suhunya meningkat, efisiensi mengalami penurunan yang cukup konstan namun tidak signifikan perubahannya. Namun pada variasi jumlah uap yang dihasilkan dengan efisiensi boiler relatif konstan naik, semakin tinggi jumlah uap yang dihasilkan, maka efisiensi boiler semakin tinggi. Nilai kalor pembakaran tinggi (HHV) adalah 18673,5558 kJ/kg, nilai kalor pembakaran rendah (LHV) adalah 17444,51586 kJ/kg. Nilai efisiensi boiler tertinggi dihasilkan sebesar 60,68%, dan nilai efisiensi boiler terendah yang dihasilkan adalah 57,23%.

Kata kunci : boiler; nilai kalor bahan bakar; efisiensi boiler

Abstract

Several factors that affect boiler efficiency are superheater pressure, feedwater temperature, steam temperature, steam production quantity, fuel consumption quantity, and fuel combustion calorific value. The aim of this report is to establish the relationship between variations in superheater pressure and boiler efficiency, the relationship between variations in feedwater temperature and boiler efficiency, the relationship between variations in steam production quantity and boiler efficiency, analyze the calorific value of the fuel composed of 50% fiber, 20% palm shell, and 30% wood bark, and analyze the boiler efficiency. Based on the analysis conducted, it was found that increasing the superheater pressure results in a decrease in steam production quantity, although it is not significant. The relationship between steam enthalpy and boiler efficiency is not constant but fluctuates. Similarly, the relationship between superheater pressure and boiler efficiency does not show a consistent upward or downward trend, except at a pressure of 61.97 bar, which has the highest efficiency based on the data. The relationship between feedwater temperature and boiler efficiency indicates that the highest efficiency is achieved at a temperature of 129.5, but as the temperature increases, the efficiency gradually decreases without significant changes. However, the relationship between steam production quantity and boiler efficiency is relatively constant, where a higher steam production quantity results in higher boiler efficiency. The high heating value (HHV) is 18673.5558 kJ/kg, and the low heating value (LHV) is 17444.51586 kJ/kg for the fuel. The highest boiler efficiency obtained is 60.68%, while the lowest boiler efficiency achieved is 57.23%.

Keywords: boiler; fuel combustion calorific value; boiler efficiency

1. Pendahuluan

Industri 4.0 sekarang semakin membuat seluruh masyarakat dunia tertantang, karena begitu pesatnya perkembangan industri dunia yang menimbulkan persaingan antar individu maupun antar Negara. Seiring dengan pertumbuhan penduduk dan kemajuan industri, kebutuhan energi pun bertambah. Selama bertahun-tahun, sejak ditemukannya minyak yang

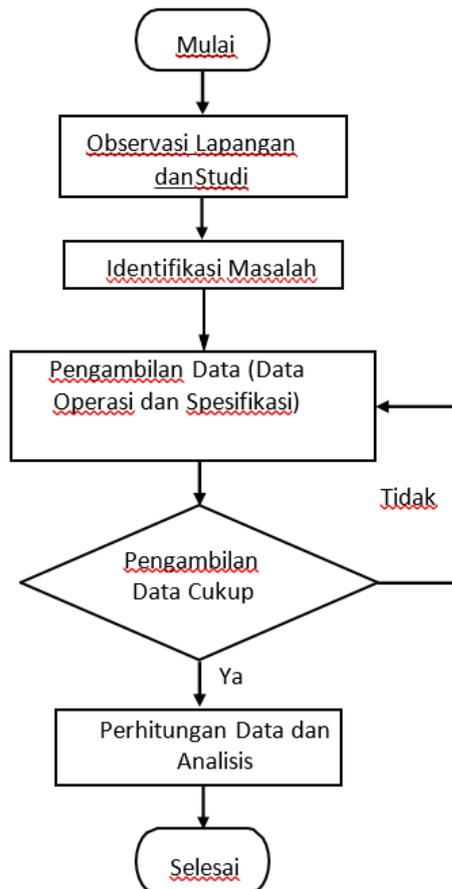
murah, manusia telah menggantungkan pemenuhan kebutuhan energinya dari bahan bakar fosil (minyak bumi, gas alam dan batubara). Ketergantungan manusia pada bahan bakar fosil telah mengakibatkan masalah yang menyangkut polusi lingkungan dan ketahanan energi (energy security). Penggunaan bahan bakar fosil telah mengakibatkan emisi gas rumah kaca yang dapat memicu pemanasan global. Selain itu, cadangan energi fosil yang terus berkurang juga menimbulkan kekhawatiran mengenai aspek ketahanan dan kelestariannya (Haryanto, 2017). Oleh karena itu, energi baru dan terbarukan harus segera dikembangkan Sehingga setiap industry harus memikirkan bahan bakar selain dari minyak bumi dikarenakan ketersediaannya yang semakin lama semakin menipis dan juga mempertimbangkan harga yang mahal karena konsumsi yang besar.

Boiler adalah bagian yang sangat penting dalam kelangsungan kinerja pada sebuah pabrik khususnya pabrik penghasil pulp (bubuk kertas yang dipadatkan) karena boiler berfungsi untuk mengubah energy kimia bahan bakar menjadi energy uap . dimana uap yang dihasilkan akan digunakan untuk menggerakkan turbin yang akan menghasilkan listrik yang digunakan untuk kebutuhan pabrik dan juga

Efisiensi ketel uap(Boiler) dinyatakan sebagai perbandingan panas sebenarnya yang digunakan untuk memanaskan air dan pembentukan uap terhadap panas hasil pembakaran bahan bakar . Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai efisiensi boiler antara lain mass flow, tekanan dan temperatur uap masuk boiler, serta tekanan dan temperatur uap keluar boiler (Pravitasari, Malino and Mara, 2017) . Oleh karena itu efisiensi boiler memiliki peranan penting dalam melakukan fungsinya. Apabila terjadi gangguan pada system boiler maka penurunan efisien boiler akan mempengaruhi kualitas dari fungsi boiler itu sendiri. sering kali efisiensi kualitas kerja boiler tersebut diabaikan padahal peningkatan efisiensi kualitas kerja boiler itu sendiri akan memberikan nilai ekonomis sendiri bagi perusahaan. Oleh karena itu peningkatan efisiensi boiler ini sangat penting guna mendapatkan output yang baik.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Alur penelitian yang dilakukan selama magang dapat dilihat pada Gambar 1



Gambar 1 Diagram Alir

Pengumpulan data dilakukan di PT.Toba Pulp Lestari, Tbk. Pengumpulan data dilakukan mulai 9 Januari hingga 9 Februari 2023.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Data Operasional

Tabel 1 sampai tabel 4 merupakan table hasil pengambilan dan perhitungan data selama di PT.Toba Pulp Lestari, Tbk.

Tabel 1 Data hasil percobaan Bom Kalorimeter Cangkang 20 % + Fiber 50% + Kulit Kayu 30%

	<i>High Heating Value</i> (cal/gr)
Pengujian 1	4455,0270
Pengujian 2	4460,6249
Pengujian 3	4458,0560
Pengujian 4	4462,0673
Pengujian 5	4464,7358

Tabel 1 Analisis Nilai Kalor Bahan Bakar Fiber 50% + Cangkang Sawit 20% + Kulit Kayu 30%

Experiment	HHV (kJ/kg)	LHV (kJ/kg)
1.	18652,3070	17423,2670
2.	18675,7443	17446,7043
3.	18664,9888	17435,9488
4.	18681,7834	17452,7434
5.	18692,9558	17463,9158
Average	18673,5558	17444,51586

Tabel 3 Hubungan tekanan superheater dengan aliran uap berdasarkan pengamatan

Superheater pressure (bar)	Superheater pressure (bar)
61,4	118,2
61,2	117,1
61,5	113,5
61,9	85,2
61,7	90,2
61,9	85,0
62,0	83,3

Tabel 4 Data Hasil Pengamatan

Waktu pengamatan	Temperatur air umpan (°C)	Main Steam Flow(Ton/jam)	Main Steam Temperature(°C)	Main Steam pressure(kg/cm ²)
20/01/2023	140,3	118,2	472,2	61,4
21/01/2023	139,9	117,1	470,5	61,2
22/01/2023	135,6	113,5	469,9	61,5
23/01/2023	132,6	85,2	467,4	61,92
24/01/2023	130,5	90,2	464,7	61,7
25/01/2023	129,5	85,0	466,5	61,97
26/01/2023	129,2	83,3	471,0	62,0

3.2 Pengolahan Data

Jumlah bahan bakar boiler yang disediakan perbulan adalah sebagai berikut:

- Bahan bakar fiber adalah 12817,02 ton perbulan
 - Bahan bakar cangkang sawit adalah 5126,808 ton perbulan
 - Bahan bakar kulit kayu adalah 7690,212 ton perbulan
- Jadi jumlah bahan bakar total yang digunakan adalah 25634,04 ton perbulan.

Jumlah bahan bakar boiler yang digunakan perhari adalah sebagai berikut:

- Bahan bakar fiber adalah 427,234 ton perhari
 - Bahan bakar cangkang sawit adalah 170,8936 ton perhari
 - Bahan bakar kulit kayu adalah 256,3404 ton perhari
- Jadi jumlah bahan bakar total yang digunakan sekitar 854,468 ton perhari.

Persentase(%) bahan bakar yang digunakan :

$$\% \text{ Bahan bakar fiber sawit} = \frac{12817,02}{25634,04} \times 100\% = 50 \%$$

$$\% \text{ Bahan bakar Cangkang} = \frac{5126,808}{25634,04} \times 100\% = 20\%$$

$$\% \text{ Bahan bakar Kulit Kayu} = \frac{7690,212}{25634,04} \times 100\% = 30\%$$

3.2.1 Komposisi Bahan Bakar

Berikut data yang diperoleh dari PT. Toba Pulp Lestari, Tbk mengenai kandungan unsur-unsur yang terdapat pada fiber, cangkang sawit, dan kulit kayu adalah sebagai berikut:

Tabel 5 Komposisi dari unsur-unsur kimia bahan bakar

Nama Unsur	Fiber	Cangkang	Kulit Kayu
Karbon (C)	50 %	53,1 %	50,5%
Hidrogen (H ₂)	5,5 %	5,7 %	6,0%
Nitrogen (N ₂)	0,8 %	0,3 %	1,0 %
Total Sulfur (S)	0,25 %	0,0 %	0,0 %
Oksigen (O ₂)	32,45 %	40,2 %	41,5 %
Ash	11,0 %	0,7 %	1,0 %
Jumlah	100 %	100 %	100%

Maka Komposisi Bahan bakar adalah sebagai berikut:

$$C = \left(\frac{50}{100} \times 50\%\right) + \left(\frac{20}{100} \times 50\%\right) + \left(\frac{30}{100} \times 53,1\%\right) = 50,93 \%$$

$$H_2 = \left(\frac{50}{100} \times 5,5\%\right) + \left(\frac{20}{100} \times 5,7\%\right) + \left(\frac{30}{100} \times 6,0\%\right) = 5,69 \%$$

$$N_2 = \left(\frac{50}{100} \times 0,8\%\right) + \left(\frac{20}{100} \times 0,3\%\right) + \left(\frac{30}{100} \times 1,0\%\right) = 0,76 \%$$

$$S = \left(\frac{50}{100} \times 0,25\%\right) + \left(\frac{20}{100} \times 0,0\%\right) + \left(\frac{30}{100} \times 0,0\%\right) = 0,125 \%$$

$$O_2 = \left(\frac{50}{100} \times 32,45\%\right) + \left(\frac{20}{100} \times 40,2\%\right) + \left(\frac{30}{100} \times 41,5\%\right) = 36,715 \%$$

$$\text{Ash} = \left(\frac{50}{100} \times 11,0\%\right) + \left(\frac{20}{100} \times 0,7\%\right) + \left(\frac{30}{100} \times 1\%\right) = 5,94 \%$$

3.2.2 Nilai Kalor Bahan Bakar

Analisa percobaan dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

Nilai Kalor Pembakaran Rendah:

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400 (M + 9H_2) \text{ kJ/kg}$$

Keterangan :

HHV = Nilai Kalor Tertinggi

M = Moisture (kandungan air dalam bahan bakar)

H₂ = Hydrogen dalam bahan bakar

3.2.3 Analisa Nilai Kalor Bahan Bakar

a. Analisa Pengujian 1

Diketahui:

$$\text{HHV} = 4455,03 \text{ cal/gr}$$

$$\text{HHV} = 18652,30704 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{H}_2 = 5,69 \%$$

$$\text{M} = 0 \%$$

Nilai Kalor Pembakaran Rendah:

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400 (\text{M} + 9\text{H}_2) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = 18652,307 - 2400 (0 + 9 \times 0,0569) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = 18652,307 - 2400 (0,5121) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = (18652,307 - 1229,04) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = 17423,267 \text{ kJ/kg}$$

b. Analisa pengujian 2

Diketahui:

$$\text{HHV} = 4460,6249 \text{ cal/gr}$$

$$\text{HHV} = 18675,74433 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{H}_2 = 5,69 \%$$

$$\text{M} = 0 \%$$

Nilai Kalor Pembakaran Rendah:

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400 (\text{M} + 9\text{H}_2) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = 18675,74433 - 2400 (0 + 9 \times 0,0569) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = 18675,74433 - 2400 (0,5121) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = (18675,74433 - 1229,04) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = 17446,70433 \text{ kJ/kg}$$

c. Analisa pengujian 3

Diketahui:

$$\text{HHV} = 4458,0560 \text{ cal/gr}$$

$$\text{HHV} = 18664,9888 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{H}_2 = 5,69 \%$$

$$\text{M} = 0 \%$$

Nilai Kalor Pembakaran Rendah:

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400 (\text{M} + 9\text{H}_2) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = 18664,9888 - 2400 (0 + 9 \times 0,0569) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = 18664,9888 - 2400 (0,5121) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = (18664,9888 - 1229,04) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = 17435,9488 \text{ kJ/kg}$$

d. Analisa Pengujian 4

Diketahui:

$$\text{HHV} = 4462,0673 \text{ cal/gr}$$

$$\text{HHV} = 18681,7834 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{H}_2 = 5,69 \%$$

$$\text{M} = 0 \%$$

Nilai Kalor Pembakaran Rendah:

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400 (\text{M} + 9\text{H}_2) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = 18681,7834 - 2400 (0 + 9 \times 0,0569) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = 18681,7834 - 2400 (0,5121) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = (18681,7834 - 1229,04) \text{ kJ/kg}$$

$$\text{LHV} = 17452,7434 \text{ kJ/kg}$$

e. Analisa Pengujian 5

Diketahui:

$$\text{HHV} = 4464,7358 \text{ cal/gr}$$

$$\text{HHV} = 18692,9558 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{H}_2 = 5,69 \%$$

$$\text{M} = 0 \%$$

Nilai Kalor Pembakaran Rendah:

$$\begin{aligned} \text{LHV} &= \text{HHV} - 2400 (M + 9H_2) \text{ kJ/kg} \\ \text{LHV} &= 18692,9558 - 2400 (0 + 9 \times 0,0569) \text{ kJ/kg} \\ \text{LHV} &= 18692,9558 - 2400 (0,5121) \text{ kJ/kg} \\ \text{LHV} &= (18692,9558 - 1229,04) \text{ kJ/kg} \\ \text{LHV} &= 17463,9158 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Tabel 7 Hasil analisa nilai kalor bahan bakar Fiber 50% + Cangkang Kelapa sawit 20% + Kulit Kayu 30%

Percobaan	HHV (kJ/kg)	LHV (kJ/kg)
1.	18652,3070	17423,2670
2.	18675,7443	17446,7043
3.	18664,9888	17435,9488
4.	18681,7834	17452,7434
5.	18692,9558	17463,9158
Rata-rata	18673,5558	17444,51586

3.2.4 Kebutuhan Udara Bahan Bakar

a. Kebutuhan Udara Teoritis(Ut)

$$\begin{aligned} \text{Ut} &= (11,43 C + 34,5 (H - O/8) + 4,32 S) \times 1/100 \text{ kg/kgBB} \\ \text{Ut} &= 11,43(50,93) + 34,5 (5,69 - 36,715/8) + 4,32 (0,125) \times 1/100 \text{ kg/kg BB} \\ \text{Ut} &= (582,1299 + 37,9715625 + 0,54) \times 1/100 \text{ kg/kgBB} \\ \text{Ut} &= 6,206414625 \text{ kg/kgBB} \end{aligned}$$

b. Kebutuhan udara pembakaran sebenarnya/aktual (Us)

$$\begin{aligned} \text{EA (Persen udara berlebih yang dipasok)} \\ &= (O_2 \times 100)/(21 - O_2) \\ &= (36,715\% \times 100)/(21 - 36,715\%) \\ &= 1,7796 \end{aligned}$$

Maka kebutuhan Udara aktualnya adalah:

$$\begin{aligned} \text{Us} &= \text{Ut} (1 + \text{EA}/100) \text{ kg/kgBB} \\ \text{Us} &= 6,206414625 (1 + 0,01796) \text{ kg/kgBB} \\ \text{Us} &= 6,31788 \text{ kg/kgBB} \end{aligned}$$

3.2.5 Perhitungan Asap

a. Berat gas asap teoritis (Gt)

$$\begin{aligned} \text{Gt} &= \text{Ut} + (1 - A) \text{ kg/kgBB} \\ \text{Gt} &= 6,206414625 + (1 - 0,0594) \text{ kg/kgBB} \\ \text{Gt} &= 7,147014625 \text{ kg/kgBB} \end{aligned}$$

b. Berat gas asap sebenarnya (Gs)

$$\begin{aligned} \text{Gs} &= \text{Us} + (1 - A) \text{ kg/kgBB} \\ \text{Gs} &= 6,31788 + (1 - 0,0594) \\ \text{Gs} &= 7,25848 \text{ kg/kgBB} \end{aligned}$$

3.2.6 Volume Gas Asap

$$\begin{aligned} \text{Vg} &= \frac{1,866 C + 0,7 S}{0,11} + 1,24(9H_2) \text{ m}^3/\text{kgBB} \\ \text{Vg} &= \frac{1,866 (0,5093) + 0,7(0,00125)}{0,11} + 1,24(9 \times 0,0569) \\ \text{Vg} &= 8,64753454 + 0,635004 \\ \text{Vg} &= 9,282538 \text{ m}^3/\text{kgBB} \end{aligned}$$

3.2.7 Efisiensi Boiler

Unutk menghitung efisiensi boiler berdasarkan perbandingan-perbandingan antara konsumsi panas dengan suplai panas digunakan persamaan sebagai berikut:

$$Efisiensi\ Boiler\ (\eta) = \frac{Panas\ Pembentukan\ Uap}{Panas\ Masuk}$$

$$Efisiensi\ Boiler\ (\eta) = \frac{W_s \times h_3 - h_1}{W_f \times LHV}$$

Keterangan :

$$W_s = Kapasitas\ Produksi\ uap\ \left(\frac{kg\ uap}{jam}\right)$$

$$W_f = Komsumsi\ bahan\ bakar\ \left(\frac{kg}{jam}\right)$$

$$h_3 = Entalpi\ uap\ \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$h_1 = Entalpi\ air\ umpan\ (feed\ water)\ \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

Analisa Berdasarkan Data 1

Diketahui: $W_s = 130600\ kg/jam$

$P_3 = 61,4\ kg/cm^2$

$T_3 = 472,2\ ^\circ C$

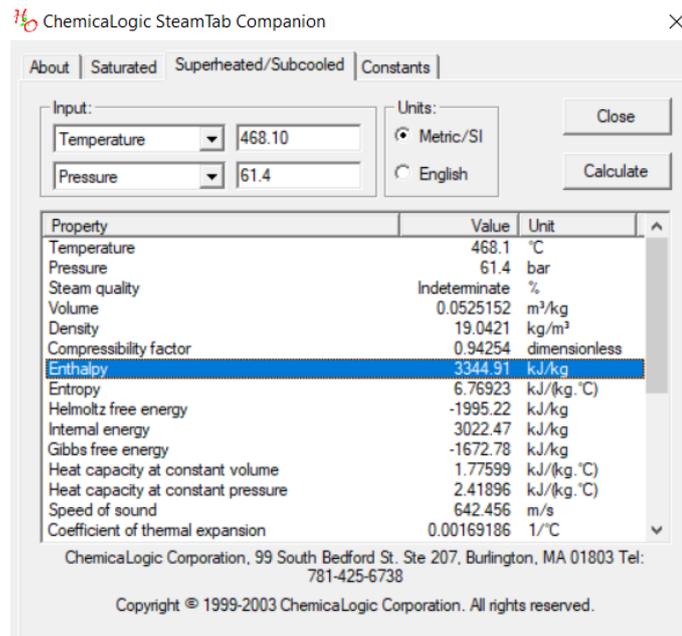
$T_1 = 140,3\ ^\circ C$

$W_f = 35873\ kg/jam$

$LHV = 17444,51586\ KJ/kg$

Untuk mencari Nilai Enthalpy uap pada $P = 61,4$ dan $T=468,10\ ^\circ C$, dicari menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh:

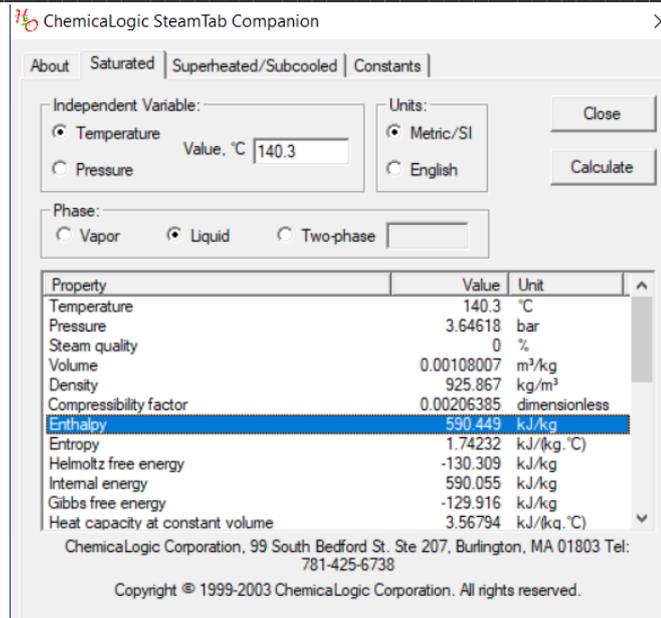
$h_3 = 3344,91\ kJ/kg$



Gambar 2 Nilai entalpi uap pada $T= 468,1\ ^\circ C$ dan $P=61,4$ menggunakan *steamtab*

Untuk mencari Nilai Enthalpy air umpan pada $T = 140,3\ ^\circ C$, dicari dengan menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh :

$h_1= 590,449\ kJ/kg$



Gambar 3 Nilai entalpi air umpan pada T= 140,3 °C menggunakan *steamtab*

Maka Efisiensi Boiler berdasarkan data 1 :

$$= \frac{130600(3344,91 - 590,449)}{35873 \times 17444,51586}$$

$$= \frac{625787117,44578}{359732606,6}$$

$$= 0,5748$$

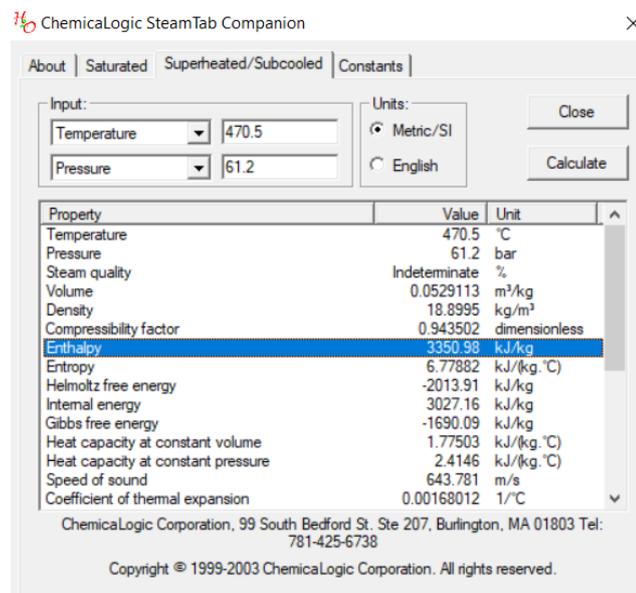
$$= 57,48\%$$

Analisa berdasarkan data 2

Diketahui: $W_s = 130600$ kg/jam
 $P_3 = 61,2$ kg/cm²
 $T_3 = 470,5$ °C
 $T_1 = 139,9$ °C
 $W_f = 36129$ kg/jam
 $LHV = 17444,51586$ KJ/kg

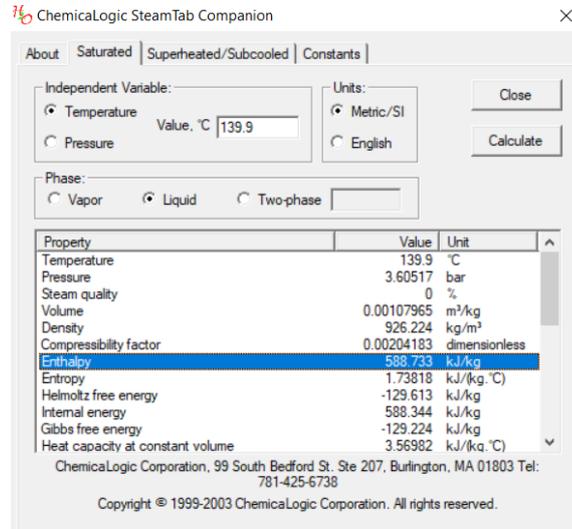
Untuk mencari Nilai Enthalpy uap pada P = 61,2 dan T=470,5 °C,dicari menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh:

$h_3 = 3350,98$ kJ/kg



Gambar 4 Nilai entalpi uap pada T= 470,5 °C dan P=61,2 menggunakan *steamtab*

Untuk mencari Nilai Enthalpy air umpan pada $T = 139,9 \text{ }^\circ\text{C}$ dicari dengan menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh:
 $h_1 = 588,733 \text{ kJ/kg}$



Gambar 5 Nilai entalpi air umpan pada $T = 139,9 \text{ }^\circ\text{C}$ menggunakan *steamtab*

Maka Efisiensi Boiler berdasarkan data 2 :

$$= \frac{130600(3350,98 - 588,733)}{36129 \times 17444,51586}$$

$$= \frac{630252913,50594}{360749458,2}$$

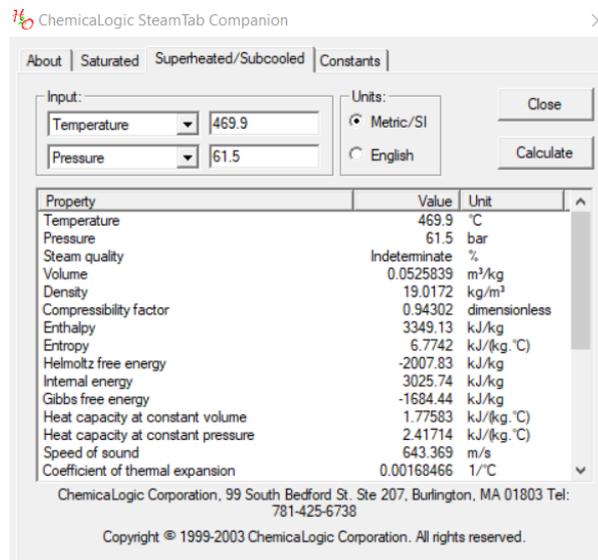
$$= 0,5723$$

$$= 57,23 \%$$

Analisa berdasarkan data 3

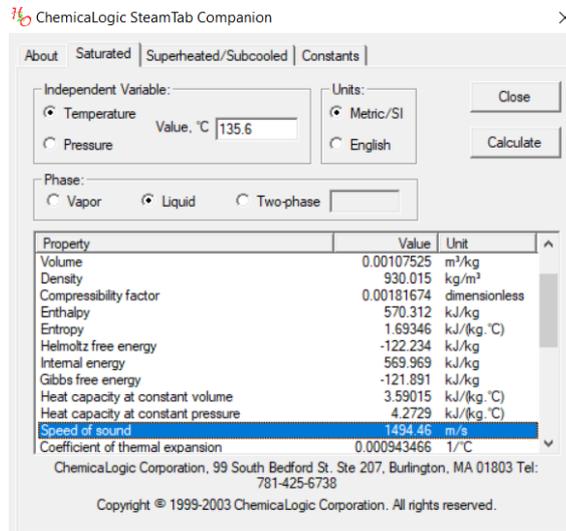
Diketahui: $W_s = 130600 \text{ kg/jam}$
 $P_3 = 61,5 \text{ kg/cm}^2$
 $T_3 = 469,9 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_1 = 135,6 \text{ }^\circ\text{C}$
 $W_f = 36240 \text{ kg/jam}$
 $LHV = 17444,51586 \text{ KJ/kg}$

Untuk mencari Nilai Enthalpy uap pada $P = 61,5$ dan $T = 469,9 \text{ }^\circ\text{C}$, dicari menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh:
 $h_3 = 3349,13 \text{ kJ/kg}$



Gambar 6 Nilai entalpi uap pada $T = 469,9 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $P = 61,5$ menggunakan *steamtab*

Untuk mencari Nilai Enthalpy air umpan pada $T = 135,6 \text{ }^\circ\text{C}$ dicari dengan menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh:
 $h_1 = 570,312 \text{ kJ/kg}$



Gambar 7 Nilai entalpi air umpan pada $T = 135,6 \text{ }^\circ\text{C}$ menggunakan *steamtab*

Maka Efisiensi Boiler berdasarkan data 3 :

$$= \frac{130600(3349,13 - 570,312)}{36240 \times 17444,51586}$$

$$= \frac{362913630,8}{632189254,7664}$$

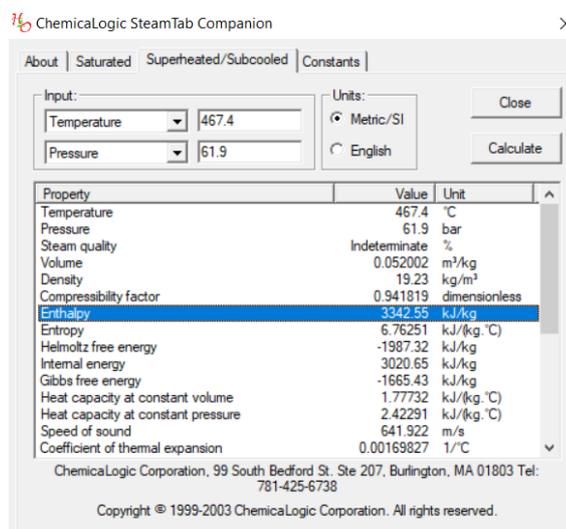
$$= 0,5740$$

$$= 57,40 \%$$

Analisa berdasarkan data 4

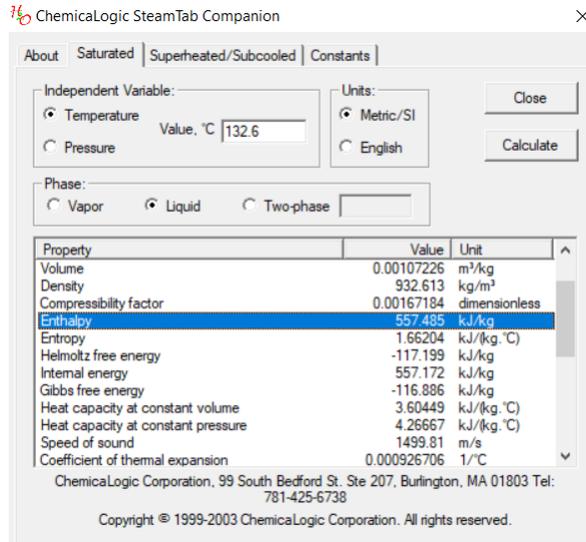
Diketahui: $W_s = 130600 \text{ kg/jam}$
 $P_3 = 61,9 \text{ kg/cm}^2$
 $T_3 = 467,4 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_1 = 132,6 \text{ }^\circ\text{C}$
 $W_f = 36196 \text{ kg/jam}$
 $LHV = 17444,51586 \text{ KJ/kg}$

Untuk mencari Nilai Enthalpy uap pada $P = 61,9$ dan $T = 467,4 \text{ }^\circ\text{C}$, dicari menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh:
 $h_3 = 3342,55 \text{ kJ/kg}$



Gambar 8 Nilai entalpi uap pada $T = 468,1 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $P = 61,4$ menggunakan *steamtab*

Untuk mencari Nilai Enthalpy air umpan pada $T = 132,6 \text{ }^\circ\text{C}$ dicari dengan menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh:
 $h_1 = 557,485 \text{ kJ/kg}$



Gambar 9 Nilai entalpi air umpan pada $T = 132,2 \text{ }^\circ\text{C}$ menggunakan *steamtab*

Maka Efisiensi Boiler berdasarkan data 4 :

$$= \frac{130600(3342,55 - 557,485)}{36196 \times 17444,51586}$$

$$= \frac{631.421.696,06856}{363729489}$$

$$= 0,5760$$

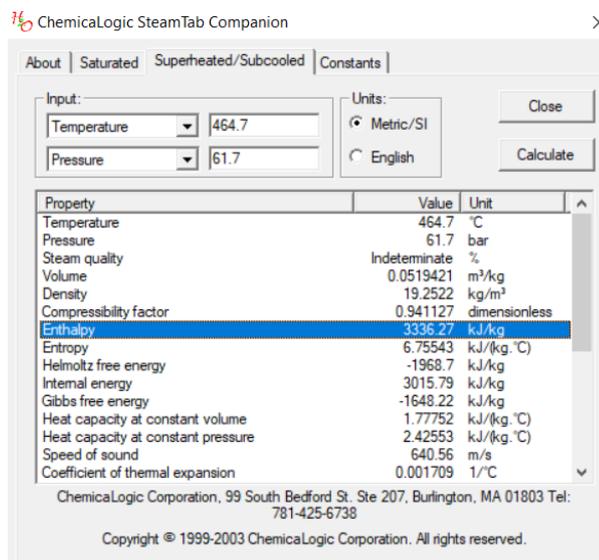
$$= 57,60 \%$$

Analisa berdasarkan data 5

Diketahui: $W_s = 130600 \text{ kg/jam}$
 $P_3 = 61,7 \text{ kg/cm}^2$
 $T_3 = 464,7 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_1 = 130,5 \text{ }^\circ\text{C}$
 $W_f = 35739 \text{ kg/jam}$
 $LHV = 17444,51586 \text{ KJ/kg}$

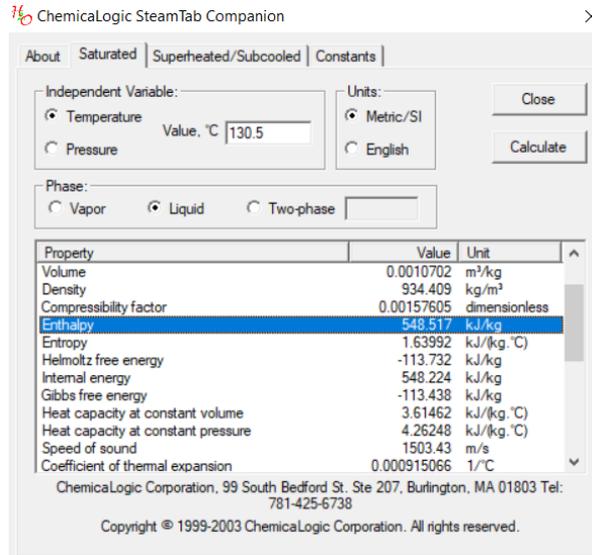
Untuk mencari Nilai Enthalpy uap pada $P = 61,7$ dan $T = 464,7 \text{ }^\circ\text{C}$, dicari menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh:

$h_3 = 3336,27 \text{ kJ/kg}$



Gambar 10 Nilai entalpi uap pada $T = 468,1 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $P = 61,4$ menggunakan *steamtab*

Untuk mencari Nilai Enthalpy air umpan pada $T = 130,5 \text{ }^\circ\text{C}$ dicari dengan menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh:
 $h_1 = 548,517 \text{ kJ/kg}$



Gambar 11 Nilai entalpi air umpan pada $T = 130,5 \text{ }^\circ\text{C}$ menggunakan *steamtab*

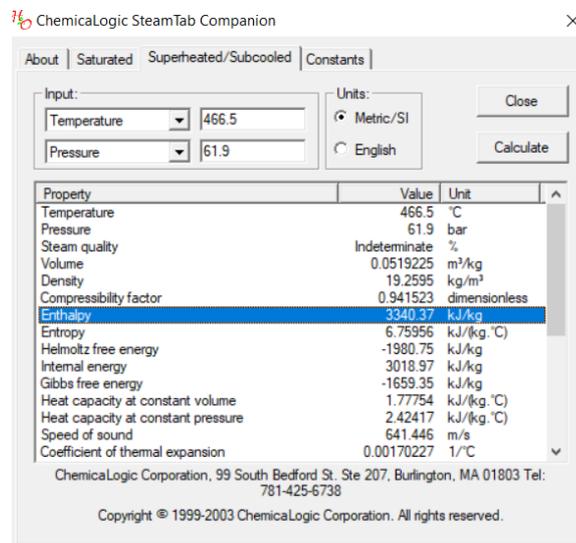
Maka Efisiensi Boiler berdasarkan data 5 :

$$\frac{130600(3336,27 - 548,517)}{364080541,8} = \frac{35739 \times 17444,51586}{623449552,32054} = 0,5839 = 58,39 \%$$

Analisa berdasarkan data 6

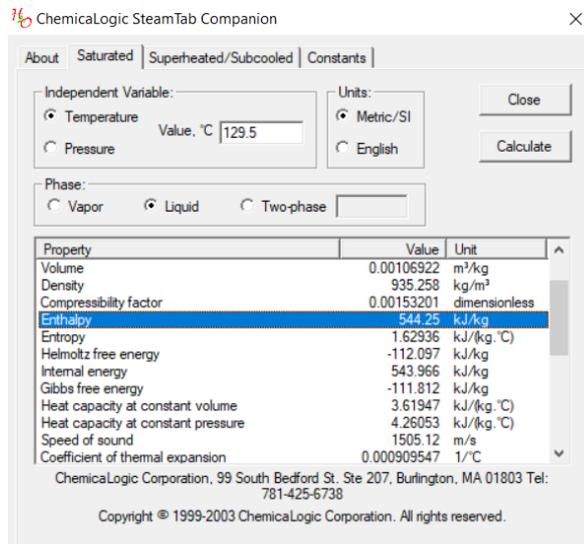
Diketahui: $W_s = 130600 \text{ kg/jam}$
 $P_3 = 61,9 \text{ kg/cm}^2$
 $T_3 = 466,5 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_1 = 129,5 \text{ }^\circ\text{C}$
 $W_f = 34498 \text{ kg/jam}$
 $LHV = 17444,51586 \text{ KJ/kg}$

Untuk mencari Nilai Enthalpy uap pada $P = 61,9$ dan $T = 466,5 \text{ }^\circ\text{C}$, dicari menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh:
 $h_3 = 3340,37 \text{ kJ/kg}$



Gambar 12 Nilai entalpi uap pada $T = 466,1 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $P = 61,4$ menggunakan *steamtab*

Untuk mencari Nilai Enthalpy air umpan pada $T = 129,5 \text{ }^\circ\text{C}$ dicari dengan menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh:
 $h_1 = 544,25 \text{ kJ/kg}$



Gambar 13 Nilai entalpi air umpan pada $T = 129,5 \text{ }^\circ\text{C}$ menggunakan *steamtab*

Maka Efisiensi Boiler berdasarkan data 6 :

$$= \frac{130600(3340,37 - 544,25)}{34498 \times 17444,51586}$$

$$= \frac{601800908,13828}{365173272}$$

$$= 0,6068$$

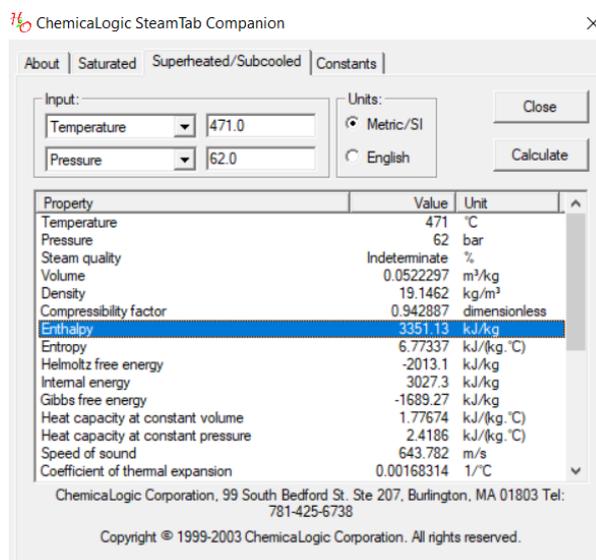
$$= 60,68 \%$$

Analisa berdasarkan data 7

Diketahui: $W_s = 130600 \text{ kg/jam}$
 $P_3 = 62,0 \text{ kg/cm}^2$
 $T_3 = 471,0 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_1 = 129,2 \text{ }^\circ\text{C}$
 $W_f = 35821 \text{ kg/jam}$
 $LHV = 17444,51586 \text{ KJ/kg}$

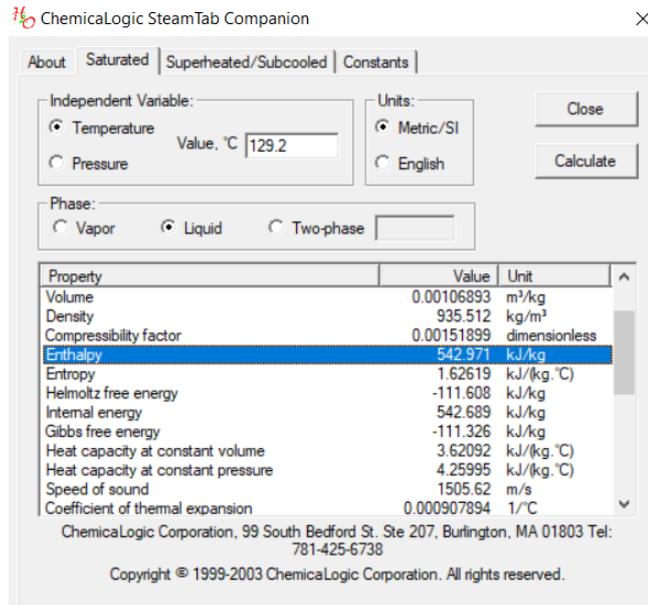
Untuk mencari Nilai Enthalpy uap pada $P = 62,0$ dan $T = 471,0 \text{ }^\circ\text{C}$, dicari menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh:

$$h_3 = 3351,13 \text{ kJ/kg}$$



Gambar 14 Nilai entalpi uap pada $T = 468,1 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $P = 61,4$ menggunakan *steamtab*

Untuk mencari Nilai Enthalpy air umpan pada $T = 129,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ dicari dengan menggunakan software *chemicallogic steamtab companion*, Maka diperoleh:
 $h_1 = 542,971\text{ kJ/kg}$



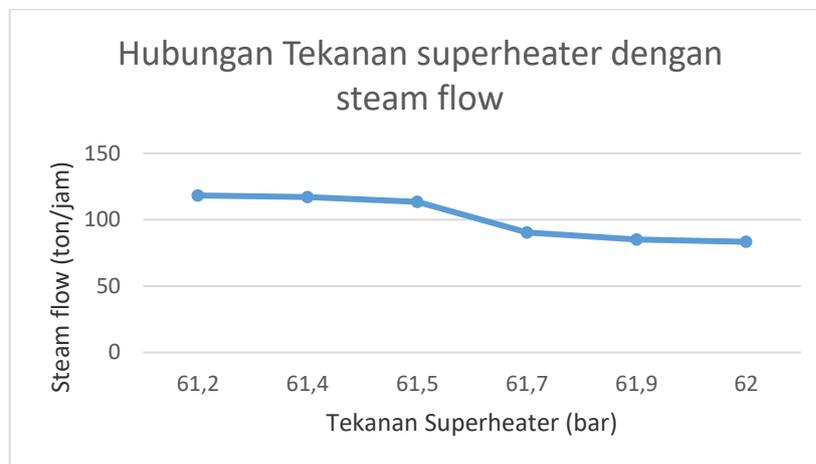
Gambar 15 Nilai entalpi air umpan pada $T = 129,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ menggunakan *steamtab*

Maka Efisiensi Boiler berdasarkan data 7:

$$\begin{aligned} & \frac{130600(3351,13 - 542,971)}{366745565,4} \\ &= \frac{35821 \times 17444,51586}{624880002,62106} \\ &= 0,5869 \\ &= 58,69\% \end{aligned}$$

Tabel 8 Hubungan tekanan superheater dengan steam flow berdasarkan pengamatan

Tekanan Superheater (bar)	Steam flow (ton/jam)
61,4	118,2
61,2	117,1
61,5	113,5
61,9	85,2
61,7	90,2
61,9	85,0
62,0	83,3

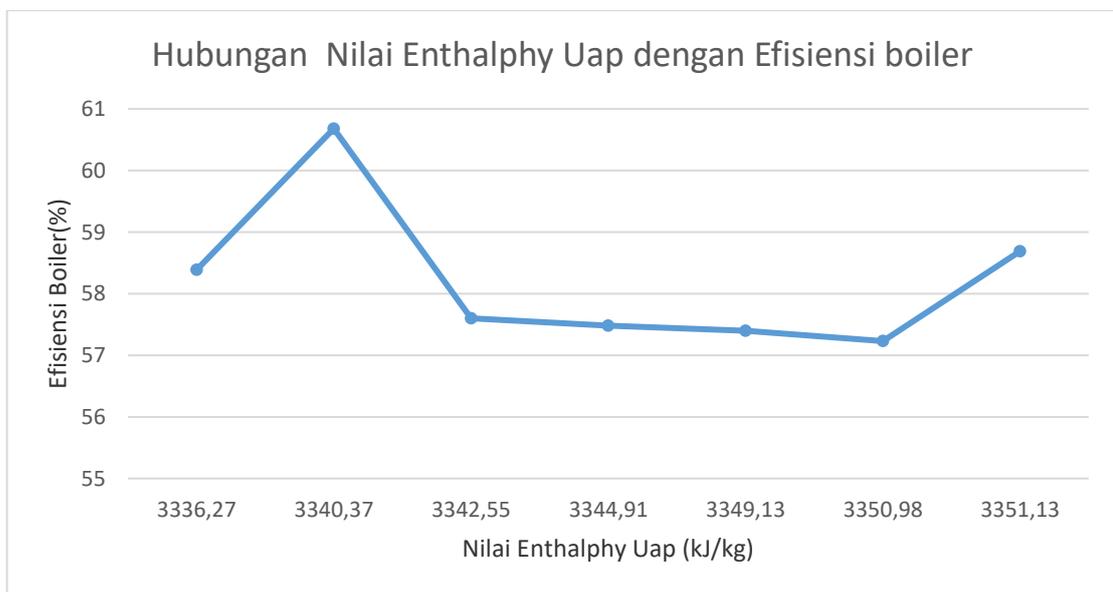


Gambar 16 Grafik Hubungan steam flow dengan tekanan superheater

Berdasarkan grafik hubungan antara steam flow dengan tekanan superheater , grafik menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan di superheater maka terjadi penurunan Steam flow yang tidak terlalu signifikan , Namun Terjadi penurunan Steam flow yang cukup signifikan dari 113,5 ton/jam ke 90,2 ton /jam pada hari persiapan menuju Preventive maintenance sehingga adanya beberapa fungsi yang tidak bisa dipaksakan untuk berjalan maksimal.

Tabel 9 Hubungan Enthalphy uap dengan efisiensi boiler

Enthalphy uap (kJ/kg)	efisiensi boiler(%)
3344,91	57,48
3350,98	57,23
3349,13	57,40
3342,55	57,60
3336,27	58,39
3340,37	60,68
3351,13	58,69

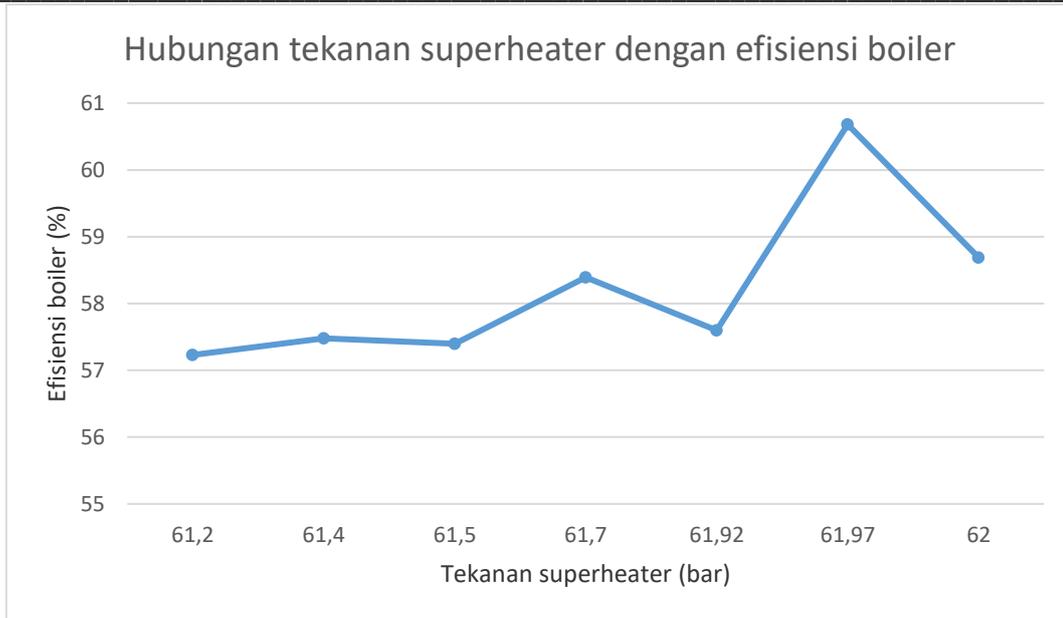


Gambar 17 Grafik Hubungan antara Nilai Enthalphy dengan Efisiensi boiler

Dari Grafik dapat disimpulkan bahwa hubungan enthalpy uap dengan efisiensi boiler tidak konstan naik dan juga tidak konstan Turun. Hal ini bisa saja terjadi disebabkan beberapa faktor yang mempengaruhi seperti, tekanan superheater yang tidak konstan tetap, dan temperature steam yang tidak stabil.

Tabel 11 Hubungan tekanan superheater dengan efisiensi boiler

Tekanan superheater (bar)	efisiensi boiler(%)
61,4	57,48
61,2	57,23
61,5	57,40
61,92	57,60
61,7	58,39
61,97	60,68
62,0	58,69

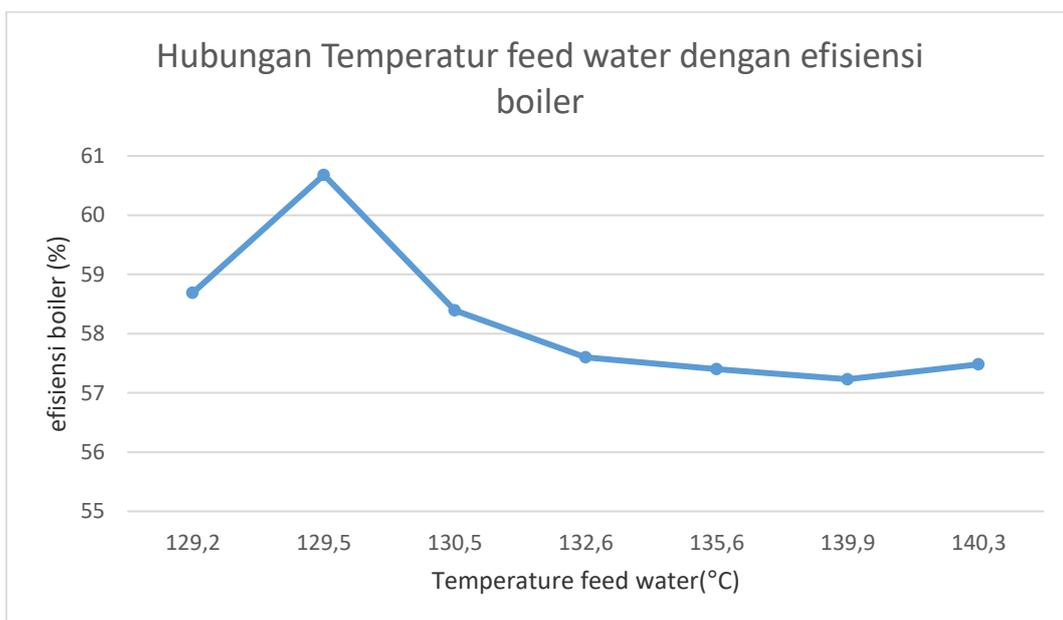


Gambar 18 Grafik hubungan antara tekanan superheater dengan efisiensi boiler

Dari grafik dapat dilihat bahwa hubungan tekanan superheater dengan efisiensi boiler sangat tidak konstan naik maupun turun . grafik seperti menunjukkan pola zigzag , dimana semakin tinggi tekanan , efisien boiler juga tidak selalu naik , melainkan mengalami penurunan juga , namun pergerakannya tidak terlalu konstan, tetapi pada tekanan 61,97 menunjukkan kenaikan efisiensi yang lumayan signifikan namun setelah itu juga mengalami penurunan.

Tabel 12 hubungan antara Temperatur feed water dengan efisiensi boiler

Temperatur feed water(°C)	efisiensi boiler(%)
140,3	57,48
139,9	57,23
135,6	57,40
132,6	57,60
130,5	58,39
129,5	60,68
129,2	58,69



Gambar 19 Grafik hubungan Temperatur Feed Water dengan efisiensi boiler

Dari Grafik hubungan Temperatur Feed Water dengan efisiensi boiler dapat dilihat bahwa pada suhu 129,5 memiliki efisiensi boiler paling tinggi yaitu 60,68% , namun semakin suhunya dinaikkan dari 129,5 , efisiensi konstan menurun namun tidak terlalu signifikan perubahan efisiensi boiler .

Berdasarkan hasil analisa water tube boiler berbahan bakar fiber, cangkang sawit, dan kulit kayu di PT. Toba Pulp Lestari, Tbk yang telah dilakukan , dapat disimpulkan bahwa:

1. Semakin tinggi tekanan superheater menimbulkan penurunan jumlah uap yang dihasilkan namun tidak terlalu signifikan
2. Hubungan enthalpy uap dengan efisiensi boiler tidak teratur melainkan naik turun
3. Hubungan tekanan superheater dengan efisiensi boiler tidak konstan naik maupun turun namun pada tekanan 61,97 bar , efisiensi boiler naik cukup signifikan , namun setelah tekananya naik , efisiensi mengalami penurunan
4. Hubungan temperatur feed water dengan efisiensi boiler , pada suhu 129,5 mencapai efisiensi paling tinggi , namun setelah suhunya semakin meningkat , efisiensi boiler turun cukup konstan , namun penurunannya tidak terlalu signifikan.
5. Hubungan variasi jumlah uap yang dihasilkan dengan efisiensi boiler relatif konstan naik , semakin besar jumlah uap yang dihasilkan , maka semakin besar efisiensi boiler .
6. Penurunan efisiensi boiler dikarenakan boiler di desain dengan kapasitas 200 ton/jam, sedangkan pemakaian sekarang kapasitas uap yang dibutuhkan adalah 130 ton/jam. Sehingga boiler tidak di paksa untuk beroperasi maksimal, namun hanya beroperasi sesuai dengan kapasitas uap yang dibutuhkan.

3.3 Upaya Peningkatan Efisiensi Boiler

Setelah melakukan perhitungan dan analisa mengenai efisiensi boiler dimana didapatkan nilai efisiensi 57,23 % - 60,68 % . Dari nilai tersebut dapat dilihat nilai efisiensi boiler masih tergolong rendah, Dalam Hal ini beberapa Hal yang bisa dilakukan dalam Upaya Peningkatan Efisiensi Boiler.

3.3.1 Economizer sebagai Instrument Pembantu dalam feed water treatment pada Boiler

Dengan meningkatnya temperatur keluar dari Economizer maka temperatur air pada Boiler drum juga akan tinggi. Jika air dalam Boiler drum sudah tinggi maka akan diperlukan kalor yang lebih sedikit untuk merubah air menjadi uap sesuai dengan jumlah yang telah direncanakan. Kebutuhan kalori yang lebih sedikit tentu akan berdampak dengan berkurangnya penggunaan bahan bakar. Dengan 14 Meningkatnya Efisiensi pada suatu Boiler, maka akan membuat biaya pengeluaran perusahaan juga akan menjadi lebih ekonomis dalam hal mengurangi pembelian bahan bakar Boiler.

Berikut adalah Cara Kerja Ekonomiser:

1. Aliran Air Pada Ekonomiser Aliran air pengisi pada boiler berasal dari boiler feed pump dan melewati ekonomiser sebelum menuju boiler drum / boiler steam drum. Di ekonomiser temperatur air pengisi boiler pada sisi keluar akan lebih tinggi dari pada temperatur air masuk pada sisi masuk. Hal ini terjadi karena temperatur antara air pengisi boiler yang terdapat dalam pipa – pipa ekonomiser lebih rendah dari tyemperatur gas buang boiler yang berada di bagian luar pipa – pipa ekonomiser, sehingga akan terjadi perpindahan panas dari gas buang pembakaran ke air pengisi boiler. Temperatur gas buanag akan turun setelah melewati ekonomiser dan sebaliknya temperatur air pengisi boiler drum akan meningkat setelah melewati ekonomiser. Temperatur air yang masuk ke ekonomiser bergantung dari temperatur air dari deaeratoe tank dan HPH (high pressure heater). Jika temperatur air prngisi boiler dari deaerator tinggi dan HPH juga di operasikan maka temperatur air masuk ke ekonomiser juga akan tinggi. Biasanya pada saat beban turbin generator tinggi dan uap ekstraktion turbin melimpah maka temperatur deaerator dan outlet HPH juga akan tinggi dan tentu saja temperatur pengisi boiler yang akan memasuki ekonomiser juga akan tinggi.
2. Aliran Gas Buang Pada Ekonomiser. Gas buang pembakaran boiler akan melewati ekonomiser pada bagian luar pipa ekonomiser. Pembakaran di dalam boiler di samping menghasilkan panas juga akan menghasilkan gas buang yang akan di buang ke atmosfer. Aliran gas buang pembakaran di ruang bakar akan melewati komponen boiler seperti superheater, ekonomiser, air heater, ESP, FGD, Cerobong baru ke atmosfer.

Dengan demikian , beberapa keuntungan yang diperoleh dalam penggunaan Economizer :

1. Air yang telah keadaan panas pada saat masuk kedalam drum ketel membawa keuntungan karena ditempat air masuk kedalam drum dinding ketel tidak mengerut sehingga drum ketel lebih awet dengan demikian biaya perawatan atau biaya maintenance-nya menjadi lebih murah. Lain halnya bila air dalam keadaan dingin masuk kedalam drum tersebut, dinding drum tersebut akan mengerut dan mudah pecah atau bocor, sehingga biaya perawatan akan mahal.
2. Dengan memanfaatkan gas asap yang masih mempunyai temperatur yang tinggi tersebut untuk memanasi air sebelum masuk kedalam drum ketel berarti akan memperbesar efisiensi dari ketel uap, karena dapat memperkecil kerugian panas yang diderita oleh ketel uap.
3. Dengan air yang telah keadaan panas masuk kedalam drum ketel tersebut, untuk menguapkannya didalam tungku hanya sedikit saja dibutuhkan panas, sehingga dengan demikian untuk menguapkan air didalam tungku hanya sedikit dibutuhkan bahan bakar, sehingga pemakaian bahan bakarnya lebih hemat, atau dengan kata lain biaya operasinya lebih ekonomis.

Dengan demikian kinerja economizer sangat penting dalam menunjang kerja boiler dalam meningkatkan efisiensi boiler. Kondisi economizer yang baik akan meningkatkan efisiensi boiler, karena semakin tinggi temperatur feed water yang nanti nya masuk kedalam boiler maka akan semakin tinggi juga temperatur uap yang dihasilkan boiler, sehingga efisiensi thermal boiler akan meningkat karena perbedaan suhu yang lebih tinggi memungkinkan transfer panas yang lebih efisien dari gas pembakaran ke air dalam boiler. Selain itu dalam menjaga efisiensi boiler diperlukan maintenance terhadap ekonomizer, ada beberapa bagian bagian penting yang perlu di perhatikan di dalam ekonomizer agar menjaga efisiensi boiler dalam meningkatkan temperature feed water :

1. Melakukan inspeksi visual pada ekonomizer untuk melihat tanda tanda kerusakan seperti, korosi, retak ataupun kebocoran serta memastikan tidak ada endapan yang dapat menghambat transfer panas.
2. Membersihkan permukaan heat transfer seperti karbon, abu, ataupun kerak yang dapat juga menghalangi transfer panas
3. Pemeriksaan kebocoran Pipa dan sambungan pada ekonomizer yang dapat menyebabkan kebocoran gas

3.3.2 Penggunaan Air Heater

merupakan salah satu alat penukar kalor yang meningkatkan efisiensi ketel uap. Karena memanfaatkan kalor yang terkandung pada gas buang hasil pembakaran untuk memanaskan udara. Udara yang telah mengalami proses pemanasan di air preheater selanjutnya dialirkan melewati Air heater untuk dipanaskan kembali. Proses transfer panas yang terjadi di Air heater adalah secara konveksi. Temperatur udara setelah dipanaskan di Air heater diharapkan 230 C agar memudahkan proses pembakaran. Temperatur flue gas melewati Air heater cukup tinggi sekitar 290 C maka elemen – elemen Air heater harus tahan panas. Temperatur flue gas setelah Air heater dijaga diatas 135 C, tujuannya adalah untuk mencegah pengendapan sulfur pada sisi dingin Air heater. Karena sulfur dapat menyebabkan korosi pada elemen – elemen Air heater. Namun temperatur flue gas keluar Air heater juga dijaga dibawah 160 C.

Prinsip kerja air heater pada boiler adalah dengan memanfaatkan panas yang ada dalam gas buang (flue gas) untuk memanaskan air pengisi sebelum masuk ke dalam boiler. Berikut adalah prinsip kerja air heater secara umum:

1. Posisi Air Heater: Air heater biasanya ditempatkan di jalur gas buang setelah proses pembakaran di dalam boiler. Gas buang yang panas mengalir melalui pipa atau saluran di sekitar air heater.
2. Penukar Panas: Air heater terdiri dari penukar panas yang terdiri dari pipa-pipa atau elemen pemanas yang terletak di dalam kotak atau ruang yang terisolasi. Penukar panas ini dirancang agar gas buang dapat berinteraksi langsung dengan air yang akan dipanaskan.
3. Transfer Panas: Ketika gas buang yang panas mengalir melalui penukar panas, panas yang terkandung dalam gas buang ditransfer ke air yang mengalir di sekitar penukar panas. Proses ini mengakibatkan peningkatan suhu air pengisi.
4. Pemisahan Gas dan Air: Pada air heater, gas buang dan air pengisi dipisahkan secara fisik agar tidak terjadi kontak langsung antara gas buang dan air. Biasanya, gas buang mengalir di sekitar penukar panas eksternal sedangkan air mengalir di dalam pipa-pipa internal penukar panas. Namun, perhatikan bahwa desain dan konfigurasi air heater dapat bervariasi tergantung pada tipe boiler dan aplikasi tertentu.
5. Sirkulasi Air: Air yang dipanaskan dalam air heater akan dialirkan menuju boiler untuk digunakan dalam proses pemanasan atau produksi uap. Air dingin pengisi dimasukkan ke dalam air heater, dan air yang sudah dipanaskan dikeluarkan dari air heater untuk digunakan dalam boiler.

Dengan menggunakan air heater, panas yang sebelumnya terbuang dalam gas buang dapat dimanfaatkan untuk memanaskan air pengisi. Ini membantu meningkatkan efisiensi boiler dengan mengurangi jumlah energi yang diperlukan untuk memanaskan air dalam boiler dan mengurangi kerugian energi dalam gas buang. Penggunaan air heater juga dapat membantu mengurangi emisi gas buang dan meningkatkan keberlanjutan operasi boiler.

Beberapa Manfaat Penggunaan Air Heater:

1. Pemanasan Awal Air Pengisi (Feedwater): Air heater digunakan untuk memanaskan air pengisi (feedwater) sebelum masuk ke dalam boiler. Air pengisi umumnya memiliki suhu yang rendah, dan dengan memanaskannya menggunakan air heater, suhu air dapat ditingkatkan sebelum memasuki boiler. Dengan demikian, air yang masuk ke boiler sudah memiliki suhu yang lebih tinggi, mengurangi jumlah energi yang diperlukan untuk memanaskannya dalam boiler. Ini mengurangi konsumsi bahan bakar dan meningkatkan efisiensi
2. Pengurangan Kerugian Panas Buang (Flue Gas Heat Loss): Air heater dapat memanfaatkan panas yang terdapat dalam gas buang (flue gas) dari proses pembakaran di boiler. Air heater dapat ditempatkan di jalur gas buang sehingga panas yang seharusnya hilang ke atmosfer dapat ditransfer ke air pengisi melalui penukar panas. Dengan cara ini, panas buang yang sebelumnya terbuang dapat dimanfaatkan untuk memanaskan air pengisi, meningkatkan efisiensi boiler.
3. Pengurangan Kondensasi Gas Buang: Dalam boiler yang menggunakan bahan bakar dengan kadar uap air tinggi, seperti gas alam, kondensasi gas buang dapat terjadi. Kondensasi ini menghasilkan kehilangan energi yang signifikan. Dengan menggunakan air heater, suhu air pengisi ditingkatkan sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya kondensasi pada permukaan penukar panas dalam boiler. Hal ini membantu menjaga efisiensi dan mengurangi kehilangan energi akibat kondensasi.

4. Penghematan Bahan Bakar: Dengan menggunakan air heater, suhu air pengisi ditingkatkan sebelum memasuki boiler. Ini mengurangi energi yang diperlukan untuk memanaskan air dalam boiler, yang pada akhirnya mengurangi konsumsi bahan bakar. Penghematan bahan bakar ini dapat membantu mengurangi biaya operasional dan dampak lingkungan dari penggunaan boiler.
5. Penting untuk dicatat bahwa desain, ukuran, dan pengaturan air heater harus sesuai dengan spesifikasi dan persyaratan boiler yang digunakan. Perhatikan juga perawatan rutin dan pembersihan air heater untuk menjaga kinerjanya yang optimal. Konsultasikan dengan teknisi atau ahli boiler untuk memastikan penggunaan dan instalasi air heater yang tepat.

3.3.3 Pemeliharaan Pipa-Pipa Superheater

Pemeliharaan pipa-pipa superheater dalam boiler sangat penting untuk menjaga kinerjanya yang optimal. Berikut adalah beberapa langkah yang perlu diperhatikan dalam pemeliharaan pipa-pipa superheater:

1. Inspeksi Visual: Lakukan inspeksi visual secara rutin untuk memeriksa kondisi pipa-pipa superheater. Periksa adanya tanda-tanda korosi, erosi, retak, atau keausan pada permukaan pipa. Juga, periksa sambungan dan pengikat pipa untuk memastikan kekokohan dan kekencangan.
2. Pembersihan Permukaan: Endapan seperti abu, kerak, atau endapan lainnya dapat terbentuk pada permukaan pipa superheater seiring waktu. Membersihkan permukaan pipa secara teratur sangat penting untuk menjaga transfer panas yang optimal. Gunakan metode pembersihan yang sesuai, seperti sikat, air tekanan tinggi, atau bahan kimia pembersih yang direkomendasikan.
3. Penggantian Pipa Rusak: Jika ada pipa superheater yang rusak, retak, atau bocor, penting untuk segera menggantinya. Pipa yang rusak dapat mengurangi efisiensi dan mempengaruhi kinerja keseluruhan boiler. Pastikan menggunakan pipa pengganti yang sesuai dengan spesifikasi dan standar yang berlaku.
4. Uji Non-Destruktif: Melakukan uji non-destruktif seperti uji tekan atau uji radiografi pada pipa-pipa superheater dapat membantu mendeteksi kerusakan yang tidak terlihat secara visual. Hal ini membantu memastikan integritas dan keamanan pipa-pipa.
5. Pengendalian Korosi: Korosi adalah masalah umum yang dapat terjadi pada pipa-pipa superheater. Menggunakan bahan kimia penghambat korosi yang tepat dan menjaga kondisi air umpan (*feedwater*) dalam boiler dapat membantu mengendalikan korosi. Perhatikan juga parameter operasional seperti pH, oksigen terlarut, dan total padatan terlarut untuk mencegah korosi.
6. Pelumasan dan Perawatan Komponen Pendukung: Pastikan komponen pendukung pipa-pipa superheater, seperti dukungan, pemegang pipa, dan pengunci, berfungsi dengan baik. Lakukan pelumasan dan perawatan rutin pada komponen ini untuk memastikan pipa-pipa superheater tetap terpasang dengan aman dan stabil.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari analisa dan pembahasan data, maka dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu:

1. Nilai efisiensi water tube boiler terendah yang dihasilkan adalah 57,23 % dan nilai efisiensi water tube boiler tertinggi yang dihasilkan sebesar 60,68% .
2. Beberapa Upaya dalam meningkatkan Efisiensi Boiler :
 - a. Economizer sebagai Instrument Pembantu dalam feed water treatment pada Boiler
 - b. Penggunaan Air Heater
 - c. Pemeliharaan Pipa-Pipa Superheater

4.1 Saran

1. Untuk mengurangi penurunan efisiensi boiler lakukan pengontrolan terhadap kandungan air pada *feed water* sebelum masuk ke deaerator.
2. Lakukan pengecekan katup-katup yang ada pada boiler, harus diperhatikan bahwa semua katup dapat berfungsi dengan baik.
3. Untuk meningkatkan efisiensi boiler lakukan pengecekan secara berkala, dan pembersihan pipa-pipa boiler secara berkala.
4. Untuk meningkatkan efisiensi boiler, jumlah uap yang di hasilkan perlu ditingkatkan.
5. *Temperature feed water* supaya lebih diperhatikan.
6. Tekanan *superheater* supaya di jaga konstan dan *temperature steam* supaya lebih diperhatikan.

5. Daftar Pustaka

- [1] Area, U.M. (2019) 'Pengaruh Economizer Terhadap Peningkatan Efisiensi Bahan Bakar Boiler Pada Unit 3 PLTU PT . PLN (PERSERO) Unit Pelaksana
- [2] Pembangunan Belawan Disusun Oleh : Kasno Nunut Simbolon Jurusan Teknik Mesin Universitas Medan Area Medan'.
- [3] Dato, R. (2018) 'Perancangan Ketel Uap Pipa Api Untuk Industri Tempe Kapasitas 200 Kg/jam', pp. 4–31.
- [4] Dinamis, J. *et al.* (2013) 'Optimalisasi Efisiensi Termis Boiler Menggunakan Serabut Dan Cangkang Sawit

- Sebagai Bahan Bakar', *Jurnal Dinamis*, 0(11), pp. 22–26.
- [5] Duarte, C.A., Espejo, E. and Martinez, J.C. (2017) 'Failure analysis of the wall tubes of a water-tube boiler', *Engineering Failure Analysis*, 79(January), pp. 704–713. doi:10.1016/j.engfailanal.2017.05.032.
- [6] Haryanto, A. (2017) 'Energi Terbarukan Front Page Upload repository 2021'.
- [7] Manalu, J.R., Tarigan, E.M. and Nainggolan, R. (2021) 'Rancang Bangun Ketel Pipa Api Mini Kapasitas 8 Kg/Jam Dengan Tekanan 4 Bar', *SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 2(1), pp. 16–26. doi:10.51510/sinergipolmed.v2i1.291.
- [8] Muchtar C Pakpahan, E.G.S. (2021) 'ANALISIS EFISIENSI MULTI FUEL BOILER DAN PENGARUH AIR HEATER TERHADAP PENINGKATAN EFISIENSI MULTI FUEL BOILER PT TOBA PULP LESTARI, Tbk KAPASITAS 200 TON/JAM', Vol 2, pp. 56–61.
- [9] Pravitasari, Y., Malino, M.B. and Mara, M.N. (2017) 'Analisis Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Langsung', *Prisma Fisika*, V(01), pp. 9–12.
- [10] Rodriguez Vasquez, J.R. *et al.* (2008) 'System identification of steam pressure in a fire-tube boiler', *Computers and Chemical Engineering*, 32(12), pp. 2839–2848. doi:10.1016/j.compchemeng.2008.01.010.
- [11] Saputra, M.S. (2016) 'Pemanfaatan Energy Dingin Pada Proses Regasifikasi Lng Untuk Pembangkit Listrik', p. 70. Available at: <http://repository.its.ac.id/51152/>.
- [12] Sugiharto, A. (2020) 'Perhitungan Efisiensi Boiler Dengan Metode Secara Langsung pada Boiler Pipa Api', *Majalah Ilmiah Swara Patra*, 10(2), pp. 51–57. doi:10.37525/sp/2020-2/260.