

OPTIMASI BAHAN BAKAR UNTUK MENGETAHUI KINERJA BOILER

Nazaruddin

Dosen Jurusan Teknik Mesin Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru

Corresponding author : nazaruddin_sai@yahoo.com

Abstrak

Optimasi bahan bakar *boiler* adalah suatu proses untuk mencapai hasil yang baik/ideal. Penelitian ini bertujuan menganalisa kinerja di Pabrik Minyak Kelapa Sawit (PMKS). Analisa dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui optimasi bahan bakar *boiler* sesuai kondisi *setting* dan mengetahui kinerja *boiler*. Metode yang digunakan adalah observasi langsung terhadap produksi *shell* dan *fibre* serta unit *boiler*.

Boiler dioperasikan untuk memproduksi uap hingga 18 ton/jam, produksi yang dihasilkan oleh bahan bakar *shell* 950,40 kg/hr dan produksi *fibre* 2.604,60 kg/hr. Kebutuhan bahan-bakar *boiler* adalah 5.888,05 kg/hr, dimana 83 % kebutuhan *fibre* untuk bahan bakar *boiler* 4887,09 kg/hr dan 17 % kebutuhan *shell* untuk bahan bakar *boiler* 1.000,96 kg/hr. Kekurangan *fibre* untuk bahan bakar *boiler* adalah 2.282,48 kg/hr. Untuk mengantisipasi kekurangan tersebut digunakan bahan bakar *shell* sebesar 1.426,57 kg/hr. Nilai panas campuran bahan bakar *fibre* dan *shell* adalah 11513,698 kJ/kg dan *energy* yang dibutuhkan untuk menghasilkan *steam* 67.793.209,05 kJ/hr. Efisiensi yang dapat dicapai *boiler* 67,59%. Efisiensi yang dihasilkan masih dibawah standar (untuk *boiler Fraser* rata – rata 75 –80 %). Hal tersebut bisa disebabkan oleh kandungan air dalam *shell* dan *fibre* yang tidak konstan setiap harinya dan sistem pengadukkan dan pengorekan bahan bakar serta kontrol *feeding* bahan bakar dalam dapur *boiler* yang masih perlu diperbaiki lagi.

kata kunci : *optimasi, efisiensi boiler, fibre, shell*

PENDAHULUAN

Boiler dalam Pabrik Minyak Kelapa Sawit (PMKS) ibaratnya adalah jantung dalam manusia, sehingga memegang peranan sangat vital dalam PMKS. Evaluasi dilakukan untuk meningkatkan kinerja *boiler*. Salah satu hal yang dilakukan dengan cara mengoptimasi bahan bakar *boiler*. Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem (Widiatmini, 2006). Optimasi bahan bakar *boiler* adalah suatu proses untuk mencapai hasil yang baik/ideal. Optimasi terhadap *boiler* dapat dilakukan dengan beberapa alternatif misalnya mengubah komposisi *shell* dan *fibre*, mengubah temperatur *superheater*, mengubah tekanan kerja *boiler* dan dengan mengubah perbandingan *feeding* bahan bakar ke *boiler*. Bernard (2002), telah melakukan penelitian terhadap dua unit *boiler* untuk melihat perbandingan efisiensi dan optimasi bahan bakar *boiler*. Perbedaan kinerja disebabkan karena salah satu boiler dalam kondisi kotor dan *Access air* dari *FDF (forced draft fan)* tidak berfungsi dengan baik.

Tujuan Penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Mengetahui optimasi bahan bakar *boiler* sesuai kondisi *setting* (*steam flowrate* 18 ton/jam, *steam pressure* 20 bar absolute, dan *steam temperature* 265 °C)
- Mengetahui kinerja *boiler*

Jenis Boiler

Berbagai jenis *boiler* yang digunakan dalam industri adalah: *Fire tube boiler*, *Water tube boiler*, *Paket boiler*, *Fluidized bed combustion boiler*, *Atmospheric fluidized bed combustion boiler*, *Pressurized fluidized bed combustion boiler*, *Circulating fluidized bed combustion boiler*, *Stoker fired boiler*, *Pulverized fuel boiler*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui kinerja *Boiler*. Pengambilan data dilakukan disalah satu anak perusahaan PT. Astra Agro Lestari Tbk, yaitu Pabrik 1 PT. SLS (PT. Sari Lembah Subur), Ukui, Riau. Metode yang digunakan adalah observasi langsung terhadap unit *boiler*, sekaligus observasi produksi *shell* dan *fibre* untuk optimasi bahan bakar *boiler*. Proses

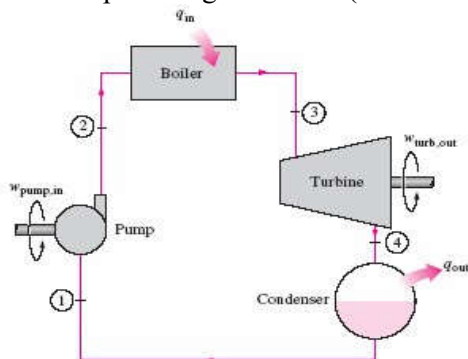
pengambilan data dilakukan pada tanggal 28 Maret sampai 2 April 2017. Studi *literature* menggunakan beberapa teori dan formula yang berhubungan dengan penelitian.

1. Water Tube Boiler

Pada *water tube boiler*, air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakar membentuk *steam* pada daerah uap dalam drum. Boiler ini dipilih jika kebutuhan *steam* dan tekanan steam sangat tinggi seperti pada kasus boiler untuk pembangkit tenaga.

2. Siklus Ideal

Siklus ideal dari suatu sistem instalasi uap sederhana adalah siklus Rankine. Siklus ini dapat digambarkan pada diagram T vs s (Gambar.1).



Gambar 1. Skematik Diagram Siklus Proses Uap (Basyirun,2008).

3. Spesifikasi Boiler

Data spesifikasi Ketel uap (*Specification Boiler*).

Merk : Fraser Boiler
Model : 40.000 pph.
No.seri : WTSE 24
HYD.TP : 31 kg/cm²
Capacity : 18 ton/hr
Work Press. : 20 barg

4. Pengumpulan Data

a.Data komposisi bahan bakar

Tabel.1 Komposisi bahan bakar untuk boiler :

FIBER		SHELL	
H	3.80%	H	5.60%
C	31.40%	C	46.70%
S	0.12%	S	0.07%
O	21.50%	O	31.20%
N	1.06%	N	0.67%
Ash	4.02%	Ash	3.36%
H ₂ O	38.10%	H ₂ O	12.40%
Jumlah	100.00%		100.00%

Sumber : Laboratorium PT SLS - 1

b. Data Perbandingan Bahan Bakar Boiler

Untuk mengetahui nilai kalor bahan bakar yang masuk ke boiler yang terdiri dari *fibre* dan *shell*, maka diambil *sample* bahan bakar untuk mengetahui komposisi dari bahan bakar. *Sample* diambil secara acak dari *distributing fuel conveyor* antara jam 11.00 – 16.00 (operasi boiler stabil), diaduk kemudian diambil *sample* 2 x 500 gram, diperoleh hasil presentase: *shell* = 17,00 % dan *fibre* = 83,00 % (Laboratorium PT SLS).

c. Data Konsumsi Bahan Bakar

Untuk mengambil sampel guna mengetahui konsumsi bahan bakar boiler, diambil sampel dari *distributing conveyor sliding*. Pembukaan *sliding* sampel disesuaikan dengan rata – rata pembukaan *sliding* pada masing – masing *chute feeding boiler*. Sampel diambil selama 15 detik berulang sebanyak 15 kali. Hasil rata – rata dikalikan dengan 240 sebagai konversi ke satuan kg/jam. Dari hasil pengamatan diperoleh data (kg/15 detik)

Tabel 2. Hasil pengamatan diperoleh data (kg/15 detik) .

No.	Konsumsi b.b (kg/15 detik)
(1)	(2)
1	6,756
2	7,802
3	6,327
4	7,897
5	6,327
6	6,816
7	7,782
8	6,503
9	5,207

(1)	(2)
10	6,037
11	7,885
12	7,921
13	7,745
14	7,092
15	7,772
Rata-rata : 7,111 kg/15 detik	

sehingga : konsumsi boiler = 3 chute x 1,15 x 240 x 7,111 kg = 5888,05 kg/hr.
Recycling bahan-bakar boiler = 5888,05 kg/hr, terdiri dari : 83 % *fibre* = 4887,08 kg/hr dan 17 % *shell* = 1.000,97 kg/hr
 Produksi *fibre* dan *shell*, hasil pengamatan bahwa, produksi mengandung komposisi, sebagai berikut:
 ➤ produksi *fibre* 8,17 % = 4598,08 kg/hr
 ➤ produksi *shell* 9,52 % = 5357,86 kg/hr

5. Analisa Data

Setelah dilakukan pengolahan data penelitian, selanjutnya data tersebut dianalisis. Beberapa data yang akan dianalisis antara lain:

- Nilai panas bahan bakar *shell*
- Nilai panas bahan bakar *fibre*
- Energi yang dibutuhkan bahan bakar boiler.

Dalam perhitungan ini diambil asumsi:

- Jumlah aliran uap air sama dengan jumlah aliran air ke boiler
- Tekanan air masuk boiler sama dengan tekanan kerja boiler.
- Data – data boiler yang diambil untuk perhitungan meliputi *water flowrate*, *superheated steam pressure*, *drum superheated steam temperature* dan diambil nilai rata-ratanya, dengan range pengambilan data setiap 15 menit untuk memonitor fluktuasi.
- Hasil pengamatan (laboratorium) boiler dapat dilihat pada tabel 1.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Nilai Pembakaran

Nilai pembakaran bahan bakar *fibre* dan *shell* ditentukan dari rumus (Syamsir A. Muin, 1988) :

- a. Nilai kalor atas (*HCV*) bahan bakar *fibre*

$$HCV = 33915 C + 144033 [H_2 - O_2/8] + 10468 S \text{ (kJ/kg)}$$

Dimana :

$$C = 31,40, H_2 = 3,80, O_2 = 21,50, N_2 = 1,06, Abu = 4,02, H_2O = 38,10$$

Maka :

$$HCV = 33915 (0,314) + 144033 [0,038 - 0,215/8] + 10468 \cdot 0 = 12012,70 \text{ kJ/kg}$$

- b. Nilai kalor bawah (*LHV*) bahan bakar *fiber* :

$$LHV = 33915 C + 121423 [H_2 - O_2/8] + 10468 S - 2512 (W + 9 \cdot O/8) = 33915(0,314) + 121423[0,038 - 0,215/8] + 10468 \cdot 0 - 2512(0,381 + 9 \cdot 0,215/8) = 10448,04 \text{ kJ/kg}$$

- c. Nilai kalor atas (*HCV*) bahan bakar *shell* :

$$HCV = 33915 C + 144033 [H_2 - O_2/8] + 10468 S \text{ (kJ/kg)}$$

Dimana :

$$C = 46,70, H_2 = 5,60, O_2 = 31,20, N_2 = 0,67, Abu = 3,36, H_2O = 12,40$$

Maka :

$$HCV = 33915 (0,467) + 144033 [0,056 - 0,315/8] + 10468 \cdot 0 = 17909,82 \text{ kJ/kg}$$

- d. Nilai kalor bawah (*LCV*) bahan bakar *shell* :

$$LCV = 33915 C + 121423 [H_2 - O_2/8] + 10468 S - 2512 (W + 9 \cdot O/8) = 33915(0,467) + 121423[0,056 - 0,312/8] + 10468 \cdot 0 - 2512(0,124 + 9 \cdot 0,312/8) = 16716,62 \text{ kJ/kg}$$

- Produksi *shell* = 5,28 % = 950,40 kg/hr (hasil kalibrasi)
- Produksi *fibre* = 14,47 % = 2.604,60 kg/hr

Power yang dapat dibangkitkan dengan bahan bakar *fibre+shell* yang tersedia untuk *troughput* 56,28 ton ffb/hr disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Nilai panas bahan bakar *fibre & shell*

<i>Fuel</i>	% <i>Weight</i>	<i>Fuel, kg/hr</i>	<i>HCV</i>	<i>LCV</i>
<i>fibre</i>	8,17	4.598,08	12.012,70 kJ/kg	10.448,04 kJ/kg
<i>Shell</i>	9,52	5.357,86	17.909,82 kJ/kg	16.716,62 kJ/kg
Jumlah bahan bakar		9.955,93		

Kalor bahan bakar yang masuk ke *boiler* yang terdiri dari *fibre* dan *shell*. *Sample* bahan bakar yang diambil secara acak dari *distributing fuel conveyor* menghasilkan persentase komposisi bahan bakar campuran cangkang dan sabut adalah *fibre* 83 % dan *shell* 17 %.

Nilai kalor bahan bakar = nilai kalor *fibre* + nilai kalor *shell*.

- Nilai *HCV* bahan bakar *fibre* : 12012,70 kJ/kg x 83% = 9970,541 kJ/kg
- Nilai *HCV* bahan bakar *shell* : 17909,82 kJ/kg x 17% = 3044,669 kJ/kg

Total *HCV* kalor bahan bakar campuran = 13015,21 kJ/kg

- Nilai *LHV* bahan bakar *fibre* : 10448,04 kJ/kg x 83% = 8671,873 kJ/kg
 - Nilai *LHV* bahan bakar *shell* : 16716,62 kJ/kg x 17% = 2841,825 kJ/kg
- Total *LHV* kalor bahan bakar campuran = 11513,698 kJ/kg

Hasil perhitungan nilai panas bahan bakar disajikan pada tabel 4.

Tabel 4. Nilai panas bahan bakar campuran *fibre & shell*

<i>Fuel</i>	% <i>Weight</i>	<i>Fuel, kg/hr</i>	<i>HCV</i>	<i>LCV</i>
<i>Fibre</i>	8,17	4.598,08	12.012,70 kJ/kg	10.448,04 kJ/kg
<i>Shell</i>	9,52	5.357,86	17.909,82 kJ/kg	16.716,62 kJ/kg
Jumlah bahan bakar		9.955,93		
<i>Fibre Mix</i>	83%		13.015,21 kJ/kg	11.513,70 kJ/kg
<i>Shell Mix</i>	17%			

Untuk perhitungan selanjutnya nilai kalor yang digunakan adalah *LHV* (Low Heating Value) atau *LCV* (Low Consumption Value).

2. Efisiensi Boiler

Efisiensi *boiler* adalah perbandingan antara energi *output* dengan energi *input* dan dapat ditentukan dengan menggunakan rumus (Basyirun, 2008) :

$$\eta_b = \frac{m_s \cdot (h_s - h_w)}{mf \cdot LHV} \cdot 100\%$$

dengan:

η_b = Efisiensi thermal boiler (%)

m_s = Jumlah *steam* yang dihasilkan

(*Steam mass flowrate* = *water mass flowrate*)

= 18 ton/hr = 18000 kg/hr

m_f = Jumlah bahan bakar yang digunakan (*Fuel mass flow rate*) = 5888,05 kg/hr

h_s = Entalpi uap *superheater* pada $p = 20$ kg/cm² dan $T = 265$ °C

= 2943,40 kJ/kg (Khurmi, 1994)

h_w = Entalpi air umpan pada temperatur 95 °C

(*Subcooled water enthalphi*) = 397,77 kJ/kg

LHV = Nilai kalor bahan bakar

$$= 11513,698 \text{ kJ/kg}$$

Maka :

$$\eta_b = \frac{18000 \text{ kg/hr} \cdot (2943,40 - 397,77) \text{ kJ/kg}}{5888,05 \text{ kg/hr} \cdot 11513,698 \text{ kJ/kg}} \cdot 100\%$$

$$= 67,59 \%$$

3. Kebutuhan Kalor

Energy yang dibutuhkan untuk menghasilkan *steam* atau kebutuhan kalor total ditentukan dengan menggunakan rumus (Basyirun, 2008) :

$$Q_t = m_s \cdot (h_s - h_w) : \eta_b$$

Dimana :

m_s = Jumlah *steam* yang dihasilkan = 18000 kg/hr

h_s = Entalpi uap *superheater* pada $p = 20$ kg/cm² dan $T = 265$ °C

= 2943,40 kJ/kg

(R.S. Khurmi, 1994)

h_w = Entalpi air umpan pada temperatur 95 °C

= 397,77 kJ/kg

η_b = Efisiensi boiler = 67,59 %

Maka :

$$Q_t = \frac{18000 \text{ kg/hr} \cdot (2943,40 - 397,77) \text{ kJ/kg}}{0,6759}$$

$$= 67.793.209,05 \text{ kJ/hr}$$

4. Optimasi bahan bakar

Kelebihan bahan bakar untuk menghasilkan steam kebutuhan proses :

1. Operasi 2 unit press = 18 ton/hr = 18000 kg/hr
Produksi *shell* = 5.357,86 kg/hr = 9,52 % (hasil kalibrasi)
Produksi *fibre* = 8,17 % = 4.598,08 kg/hr
2. Kondisi Operasi Boiler normal
Recycling bahan-bakar boiler = 5.888,05 kg/hr, terdiri dari :
 - Kebutuhan *fibre* untuk bahan bakar boiler : 83 % *fibre* = 4887,08 kg/hr
 - Kebutuhan *shell* untuk bahan bakar boiler : 17 % *shell* = 1.000,97 kg/hr
3. Kekurangan *fibre* untuk bahan bakar boiler : 4.887,08 kg/hr - 4.598,08 kg/hr = 289,00 kg/hr
4. *Shell* digunakan untuk mengatasi kekurangan *fibre* :

$$\frac{(\text{Kekurangan } fibre - LCV_{fibre}) / LCV_{shell}}{16716,62 \text{ kJ/kg}}$$

$$= 180,63 \text{ kg/hr}$$
5. Total *shell* yang digunakan :
Shell digunakan untuk mengatasi kekurangan *fibre* + kebutuhan *shell*
 180,63 kg/hr + 1.000,96 kg/hr
 = 1.181,60 kg/hr
6. Kelebihan *Shell*
 Penggunaan produksi *shell* + Total *shell*
 5.357,86 kg/hr - 1.181,60 kg/hr =
 4.176,26 kg/hr
 Kelebihan bahan bakar untuk menghasilkan steam kebutuhan proses ini disajikan pada tabel 5.

Tabel 5. Kebutuhan bahan bakar

Boiler Efisiensi	67.59%
Fibre produksi	4,598.08 kg/hr
Shell produksi	5,357.86 kg/hr
Kebutuhan Fibre	4,887.08 kg/hr
Kebutuhan Shell	1,000.97 kg/hr
Kekurangan Fibre	(289.00) kg/hr
Shell digunakan untuk mengatasi kekurangan fibre	180.63 kg/hr
Total shell yang digunakan	1,181.60 kg/hr
Kelebihan Shell	4,176.26 kg/hr

a. Rasio Penguapan

Rasio Penguapan ditentukan dengan menggunakan rumus (Basyirun,2008):

Rasio penguapan =

$$\frac{\text{Panas yang digunakan untuk pembangkitan steam}}{\text{Panas yang ditambahkan ke steam}}$$

$$= \frac{GCV_{\text{bahan bakar}} \cdot \eta_{\text{Boiler}}}{h_g - h_f}$$

Dimana :

$$GCV = \text{Gross Consumption Value} = 11.513,698 \text{ kJ/kg}$$

$$\mu_b = \text{Efisiensi boiler} = 67,59 \%$$

$$h_s = \text{Entalpi uap superheater pada } p = 20 \text{ kg/cm}^2 \text{ dan } T = 265^\circ \text{C} = 2.943,40 \text{ kJ/kg}$$

$$h_w = \text{Entalpi air umpan pada temperatur } 95^\circ \text{C} = 397,77 \text{ kJ/kg}$$

Maka :

$$\text{Rasio Penguapan} = \frac{(11513,698 \cdot 0,6759)}{(2943,4 - 397,77)} = 3,057$$

Dari rasio penguapan (evaporasi) dapat diketahui bahwa untuk 1 kg bahan bakar (*fibre* dan *shell*) dapat menghasilkan 3,057 kg uap.

b. Kemampuan Produksi

Ditinjau dari sistem pemasukan bahan bakar (*fuel feeding system*), pemasukan bahan bakar 5888,05 kg/jam dapat dikalkulasikan dengan *evaporation rate* 3,34 kg uap / kg *fibre* & *shell*.

$$W_s = EvpxW_f$$

$$= 3,057 \text{ Kg uap / Kg bb} \cdot 5888,05 \text{ kg bb/jam}$$

$$= 17.999,7689 \text{ kg/jam}$$

Jadi dari sistem pemasukan bahan bakar dapat melayani kebutuhan untuk memproduksi uap hingga 18 ton/jam.

Fraser boiler dioperasikan untuk memproduksi uap hingga 18 ton/jam, produksi yang dihasilkan oleh bahan bakar *shell* 5.357,86 kg/hr dan produksi *fibre* 4.598,08 kg/hr. Kebutuhan bahan-bakar boiler adalah 5.888,05 kg/hr, dimana 83 % kebutuhan *fibre* untuk bahan bakar boiler 4887,09 kg/hr dan 17 % kebutuhan *shell* untuk bahan bakar boiler 1.000,96 kg/hr. Kekurangan *fibre* untuk bahan bakar boiler adalah 289,00 kg/hr. Untuk mengantisipasi kekurangan tersebut digunakan bahan bakar *shell* sebesar 180,63 kg/hr. Efisiensi yang dapat dicapai boiler 67,59 % dengan nilai panas campuran bahan bakar *fibre* dan *shell* adalah 11513,698 kJ/kg dan

energy yang dibutuhkan untuk menghasilkan *steam* 67.793.209,05 kJ/hr.

Untuk memudahkan dalam mengevaluasi hasil perhitungan efisiensi *boiler*, berikut

ditampilkan kinerja *boiler* selama pengamatan pada tabel 6.:

Tabel 6. Evaluasi Efisiensi *Boiler*

NO	ITEM	BOILER
1	<i>Troughput (ton ffb/hr)</i>	56,28
2	Kandungan <i>fibre</i> dalam Bahan bakar (kg/hr)	4887,09
3	Kandungan <i>shell</i> dalam bahan bakar (kg/hr)	1.000,96
4	Konsumsi bahan bakar (kg/jam)	5.888,05
5	Tekanan <i>steam</i> rata – rata (bar gauge)	20
6	Temperatur <i>steam</i> rata –rata (C)	265
7	Temperatur <i>feeding water</i> (C)	95
8	<i>Water flow rate</i> rata –rata (ton/hr)	18
9	Efisiensi <i>boiler</i> (%)	67,59

Pembahasan

Untuk pengoperasian PMKS sebenarnya *boiler* di *setting* untuk mensuplai uap air panas lanjut sebanyak 18 ton/jam. Efisiensi *boiler* 67,59% sebenarnya masih dibawah standar (rata – rata 75 –80 %). Hal tersebut bisa disebabkan oleh:

- Kandungan air dalam *shell* dan *fibre* yang tidak konstan setiap harinya. Air tidak akan memberi sumbangan kalor untuk pembakaran tetapi akan menyerap panas pembakaran, sehingga jumlah bahan bakar yang dikonsumsi meningkat.
- Sistem pengadukkan dan pengorekan bahan bakar serta kontrol *feeding* bahan bakar dalam dapur *boiler* yang masih perlu diperbaiki lagi, sehingga bahan bakar tidak perlu menumpuk tinggi dalam dapur. Penumpukan bahan bakar yang tinggi hanya mempersempit ruang bakar terutama untuk udara dan membuka peluang bahan bakar tidak terbakar secara sempurna.
- Penurunan nilai efisiensi disebabkan banyak panas yang hilang, hal ini mempengaruhi jumlah panas yang dapat digunakan dalam proses selanjutnya (Hendaryati, 2012).

KESIMPULAN

Optimasi bahan bakar *boiler* sesuai kondisi *setting* adalah produksi *fibre* 4.598,08 kg/hr, produksi *shell* 5.357,86 kg/hr, kebutuhan *fibre* untuk bahan bakar *boiler* 4887,09 kg/hr, kebutuhan *shell* untuk bahan bakar 1.000,96 kg/hr, kebutuhan untuk bahan bakar *boiler* 5.888,05 kg/hr, kekurangan *fibre* untuk bahan bakar *boiler* 289,00 kg/hr, *shell* digunakan untuk mengatasi

kekurangan *fibre* 180,63 kg/hr dan total *shell* yang digunakan 1.181,60 kg/hr. Kinerja *boiler* adalah sebagai berikut, nilai panas pembakaran bahan bakar campuran sabut dan cangkang berdasarkan komposisi kimianya adalah sebesar 11513,698 kJ/kg, efesiensi *boiler* adalah sebesar 67,59 %, *energy* yang dibutuhkan untuk menghasilkan *steam* adalah sebesar 67.793.209,05 kJ/hr, besarnya rasio penguapan adalah 3,057 dari evaporasi dapat diketahui bahwa untuk 1 kg bahan bakar (sabut dan cangkang) dapat menghasilkan 3,057 kg uap. Faktor-faktor penyebab turunnya prestasi ketel uap adalah penggunaan sabut dan cangkang masih di bawah standar yang disyaratkan oleh pabrik pembuat, kualitas air umpan yang masih rendah dan *boiler* belum mendapatkan perawatan sesuai yang dipersyaratkan pabrik pembuat.

DAFTAR PUSTAKA

- Basyirun, 2008. *Mesin Konversi Energi*, PKUPT UNNES/ Pusat Penjamin Mutu, Semarang.
- Bernard, 2002. *Efisiensi dan Optimasi Bahan Bakar Boiler*, PT. Sari Lembah Subur Ukui.
- Hendaryati, H. 2012, Analisis Efisiensi Termal pada Ketel Uap di Pabrik Gula Kebun Agung Malang, *JURNAL GAMMA*, Volume 8, Nomor 1, September 2012: 148 - 153.
- Khurmi, R. S. 1994, *Steam Tables with Mollier Diagram* S. New Delhi: Chand & Company Ltd., Ram Nagar.

Muin, S. A. 1988. *Pesawat-pesawat Konversi Energi I*, Cetakan Pertama, Februari 1988, Penerbit Rajawali, Jakarta.

Winanti, W. S. dan Prayudi, T. 2006, Perhitungan Efisiensi Boiler pada Industri Tepung Tiregu. *Jurnal Teknik Lingkungan. Edisi Khusus, ISSN 141-138X, Jakarta, Juli 2006.*