

ANALISA VARIASI JUMLAH UAP TERHADAP EFISIENSI KETEL UAP DI PT. BUKIT BARISAN INDAH PRIMA (BBIP) GRUP KABUPATEN MUARO JAMBI, JAMBI

Aneka Firdaus⁽¹⁾, Gunawan⁽¹⁾, M.A. Ade Saputra^(1*) dan Rifki Abror⁽²⁾

⁽¹⁾Jurusan Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya, Palembang-Sumatera Selatan

⁽²⁾PT.Bukit Barisan Indah Prima (BBIP)

^(*)E-mail *Corresponding Author* :*m.a.adesaputra@ft.unsri.ac.id*

Abstrak

Pembangkit listrik tenaga uap yang ada di Pabrik Kelapa Sawit PT. Bukit Barisan Indah Prima (BBIP) Grup hanya menggunakan 1 unit ketel uap dengan type Takuma N-750 SA *water tube boiler*. Pada penelitian ini dilakukan analisa variasi jumlah uap terhadap efisiensi ketel uap di PT. Bukit Barisan Indah Prima (BBIP) grup Kabupaten Muaro Jambi, Jambi. Dalam penelitian ini digunakan metode langsung untuk mengetahui besarnya efisiensi ketel uap pada berbagai variasi jumlah uap. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini efisiensi terendah didapat pada jumlah uap 14 ton/jam dengan jumlah bahan bakar yang digunakan sebesar 2.730 kg/jam maka efisiensi ketel uap sebesar 83,87% dan efisiensi tertinggi didapat pada jumlah uap 18 ton/jam dengan jumlah bahan bakar yang digunakan sebesar 3.510 kg/jam maka efisiensi ketel uap sebesar 85,14%.

Kata Kunci: Ketel uap, Metode langsung, Efisiensi

Abstract

Power plant steam that is in palm oil factory PT. Bukit Barisan Indah Prima (BBIP) Group only use 1 unit of a steam boiler with type Takuma N-750 SA water tube boiler. On their work this final analysis variations in the quantity of steam against efficiency boiler PT. Bukit Barisan Indah Prima (BBIP) grup Muaro Jambi District, Jambi. In this research used method of direct to know the efficiency boiler on various variations in the quantity of steam. The results from the study efficiency lowest acquired at the number of steam 14 ton/hour and the amount of fuel used of 2.730 kg/hour then efficiency boiler of 83,87 % and efficiency highest acquired at the number of steam 18 tons/hour and the amount of fuel used of 3.510 kg/hour then efficiency boiler of 85,14 %.

Keywords: Boiler, Direct Method, Efficiency.

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan faktor penunjang yang sangat penting untuk kegiatan industri serta kebutuhan listrik rumah tangga. Peningkatan konsumsi listrik yang besar terjadi pada bidang industri.

Sementara itu, krisis energi listrik yang melanda dunia pada umumnya dan Indonesia pada khususnya menyebabkan naiknya harga tarif dasar listrik. Hal ini berdampak pada peningkatan biaya produksi perusahaan. Pemadaman listrik secara tiba-tiba oleh PLN menyebabkan terganggunya proses produksi yang dapat mengganggu produktifitas perusahaan. Untuk itu perlu dibangun suatu sistem pembangkit energi listrik yang mampu memenuhi kebutuhan energi listrik perusahaan secara berkesinambungan[1].

Ketel uap dan turbin uap merupakan sistem pembangkit energi listrik yang paling banyak digunakan. Ketel uap adalah salah satu alat yang

digunakan untuk mengkonversikan air menjadi uap dengan cara pemanasan, yang dimana sumber panasnya dihasilkan dari hasil pembakaran didalam ruang bakar. Dimana ketel uap banyak digunakan pada industri pengolahan kayu, pembangkit tenaga listrik, pengolahan kelapa sawit, dan lain-lain.

Pabrik Kelapa Sawit (PKS) PT. Bukit Barisan Indah Prima (BBIP) Grup, menggunakan ketel uap untuk mendukung proses pengolahan buah kelapa sawit yang mana limbah pada proses pengolahan buah kelapa sawit tersebut yaitu berupa cangkang sawit dan serabut sawit dapat digunakan sebagai bahan bakar ketel uap.

Uap yang dihasilkan ketel uap tersebut selain untuk proses pengolahan buah kelapa sawit dapat juga digunakan untuk penggerak turbin uap yang dihubungkan dengan generator listrik sebagai penghasil listrik untuk keperluan listrik perusahaan dan perumahan karyawan.

Oleh karena itu, setiap komponen ketel uap harus dalam kondisi yang baik. Untuk itu evaluasi terhadap

prestasi kerja ketel uap perlu dilakukan, maka dalam penelitian ini akan mengetahui efisiensi dari ketel uap terhadap variasi jumlah uap yang dihasilkan.

2. ANALISIS TEORI

2.1. Ketel Uap

Ketel Uap merupakan salah satu peralatan yang sangat penting didalam suatu sistem pembangkit tenaga uap. Alat ini merupakan alat penukar panas, dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk uap panas atau steam. Uap yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi inilah yang nantinya digunakan sebagai media penggerak utama turbin uap.

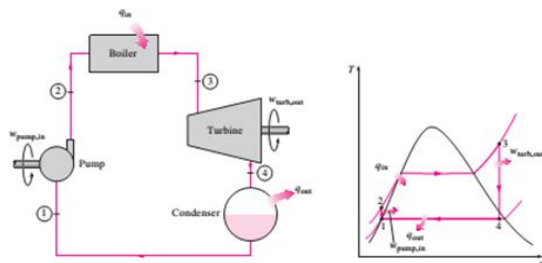
2.2. Komponen-komponen Utama Ketel Uap

1. Ruang Bakar
2. Drum Atas
3. Pemanas Lanjut
4. Drum Bawah
5. Deaerator
6. Cerobong

2.3. Siklus Pembangkit Tenaga Uap

Siklus Rankine

Siklus rankine merupakan siklus ideal untuk instalasi pembangkit tenaga uap sederhana dan diperkenalkan pertama kalinya oleh Prof. William John Macquorn Rankine pada tahun 1820-1876 [2].

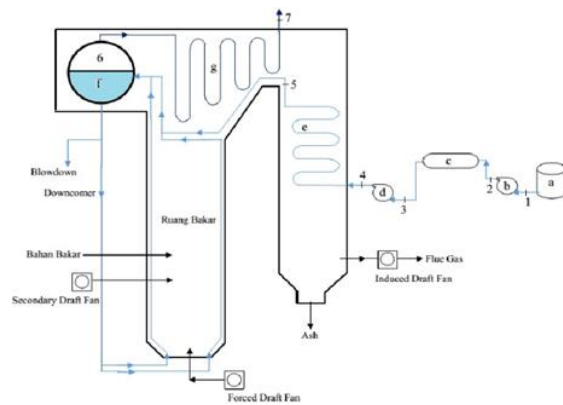


Gambar 1. Siklus Rankine Ideal dan Diagram T-s [3]

Siklus ini adalah suatu siklus uap dan cairan yang terdiri dari 4 proses, yaitu:

1. Proses 1-2, yaitu proses adiabatik isentropik, proses yang terjadi didalam pompa.
2. Proses 2-3, yaitu proses penambahan panas dengan tekanan konstan yang terjadi di ketel uap.
3. Proses 3-4, yaitu proses ekspansi isentropik didalam turbin.
4. Proses 4-1, yaitu proses pembuangan panas dengan tekanan konstan yang terjadi didalam kondensor.

Siklus Ketel Uap PT. BBIP

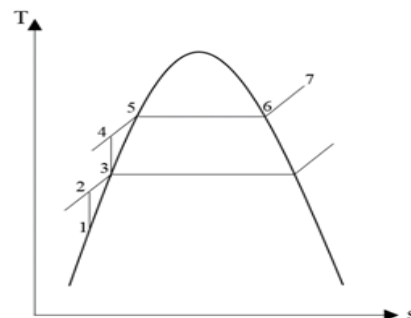


Gambar 2. Skematik Sederhana Ketel Uap PT. BBIP

Keterangan

- Uap
- Air

- a. Feed Water Tank
- b. Feed Water Pump
- c. Deaerator
- d. Deaerator pump
- e. Economizer
- f. Steam Drum.
- g. Superheater



Gambar 3. Diagram T-s Skematik Sederhana Ketel Uap PT. BBIP

2.4. Bahan Bakar

Dalam hal ini bahan bakar yang digunakan adalah cangkang dan serabut sawit. Adapun alasan mengapa digunakan cangkang dan serabut sawit sebagai bahan bakar adalah [4]:

1. Bahan bakar cangkang dan serabut sawit cukup tersedia dan mudah diperoleh dipabrik.
2. Cangkang dan serabut sawit merupakan limbah dari pabrik kelapa sawit apabila tidak digunakan.
3. Nilai kalor bahan bakar cangkang dan serabut sawit memenuhi persyaratan untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan.
4. Sisa pembakaran bahan bakar dapat digunakan sebagai pupuk untuk tanaman kelapa sawit.
5. Harga lebih ekonomis.

Bahan bakar limbah kelapa sawit merupakan bahan bakar utama pada saat perebusan kelapa sawit, limbah kelapa sawit merupakan bahan bakar padat yang digunakan untuk pemanas air dan uap air pada ketel uap yang menghasilkan uap yang selanjutnya digunakan untuk berbagai macam proses pengolahan biji kelapa sawit atau perebusan buah (*sterilizer*) dan untuk penggerak turbin uap.

Cangkang sawit adalah sejenis bahan bakar padat yang berwarna hitam berbentuk seperti batok kelapa dan agak bulat, terdapat pada bagian dalam pada buah kelapa sawit yang diselubungi oleh serabut.

Serabut sawit adalah bahan bakar padat yang berbentuk seperti rambut, apabila telah mengalami proses pengolahan berwarna cokelat muda, serabut ini terdapat dibagian kedua dari buah kelapa sawit setelah kulit buah kelapa sawit.

2.5. Analisa Bahan Bakar

Nilai Kalor Bahan Bakar

Nilai kalor adalah energi kalor yang dilepaskan pada saat pembakaran sempurna suatu bahan bakar, satuan umumnya adalah kJ/kg.

1. Nilai Pembakaran Atas (HHV)

Bila uap air suatu pembakaran terkondensasi sehingga memperhitungkan panas laten dari uap tersebut. Nilai pembakaran atas (HHV) dapat dicari dengan menggunakan rumus, yaitu [5]:

$$\text{HHV} = 33.950 C + 144.200 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9.400 S \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1)$$

Dimana:

HHV = Nilai pembakaran atas (Higher Heating Value)

C = % karbon dalam bahan bakar

H = % hidrogen dalam bahan bakar

O = % oksigen dalam bahan bakar

S = % sulfur dalam bahan bakar

2. Nilai Pembakaran Terendah (LHV)

Bila uap dalam suatu pembakaran tidak terkondensasi dan muncul seluruhnya dalam bentuk gas sehingga tidak memperhitungkan panas laten penguapan dari uap tersebut. Nilai pembakaran bawah (LHV) dapat dicari dengan menggunakan rumus, yaitu [5]:

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2.400 (M + 9 H_2) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2)$$

Dimana:

LHV = Nilai pembakaran terendah (Lower Heating Value)

HHV = Nilai Pembakaran Atas

M = Kadar uap air yang terkandung didalam udara

H = % hidrogen dalam bahan bakar

Jumlah Pemakaian Bahan Bakar

Untuk 1 ton kelapa sawit akan mampu menghasilkan limbah berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebanyak 23% atau 230 kg, limbah cangkang (*shell*) sebanyak 6,5% atau 65 kg, *wet decanter soil* (lumpur sawit) sebanyak 4% atau 4 kg, serabut (*fiber*) sebanyak 13% atau 130 kg serta limbah cair sebanyak 50% [6].

Sehingga untuk mencari jumlah pemakaian bahan bakar yang digunakan dalam per jam, menggunakan persamaan sebagai berikut [7]:

$$\text{Cangkang} : \frac{6,5}{100} \cdot \text{jumlah uap}$$

$$\text{Serabut} : \frac{13}{100} \cdot \text{jumlah uap}$$

Jadi, jumlah pemakaian bahan bakar (W_f) adalah jumlah pemakaian cangkang + jumlah pemakaian serabut.

2.6 Analisa Energi Panas

Penyerapan Energi Panas Pada Ketel Uap

Energi panas yang dihasilkan oleh proses pembakaran pada dapur ketel akan diserap oleh fluida kerja (uap) oleh masing-masing bagian penghantar panas pada ketel uap. Bagian penghantar panas pada sebuah ketel uap terdiri dari sebagai berikut:

1. Deaerator

Untuk menghitung panas yang dibutuhkan pada deaerator dapat menggunakan persamaan sebagai berikut [9]:

$$Q_d = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Dimana:

Q_d = panas yang dibutuhkan oleh air pengisian ketel

uap (kJ/jam)

\dot{m} = massa aliran air pengisi ketel uap, yaitu sama

dengan jumlah massa aliran uap (kg/jam)

C_p = panas jenis air (kJ/kg.K)

ΔT = selisih kenaikan temperatur air (°C)

2. Economizer

Panas yang diserap oleh air didalam *economizer* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [10]:

$$Q_{eco} = W_s \cdot (h_5 - h_4)$$

Dimana:

Q_{eco} = energi yang diserap didalam *economizer* (kJ/jam)

h_5 = enthalpy air keluar *economizer* (kJ/kg)

h_4 = enthalpy air masuk *economizer* (kJ/kg)

3. Steam Drum

Besarnya penyerapan panas untuk proses pembentukan uap saturasi dapat dihitung dengan persamaan berikut [8]:

$$Q_{sd} = W_s \cdot (h_6 - h_5)$$

Dimana:

Q_{sd} = energi yang diserap didalam *steam drum* (kJ/jam)

H_6 = enthalpy uap saturasi (kJ/kg)

h_4 = enthalpy air keluar *economizer* (kJ/kg)

4. Superheater

Maka besarnya panas yang diserap pada pemanas lanjut dapat dihitung dengan persamaan berikut [8]:

$$Q_{sup} = W_s \cdot (h_7 - h_6)$$

Dimana:

Q_{sup} = energi yang diserap didalam *superheater* (kJ/jam)

h_7 = enthalpy uap panas lanjut (kJ/kg)

h_6 = enthalpy uap saturasi (kJ/kg)

Sehingga jumlah penyerapan energi panas pada ketel uap dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Q_{use} = Q_d + Q_{eco} + Q_{sd} + Q_{sup}$$

Panas Yang di Hasilkan Oleh Ketel Uap

Panas yang dihasilkan oleh ketel uap dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Q_{in} = W_f \cdot LHV$$

Kerugian Panas Pada Ketel Uap

Kerugian panas yang dihasilkan oleh ketel uap dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Q_{losses} = Q_{in} - Q_{use}$$

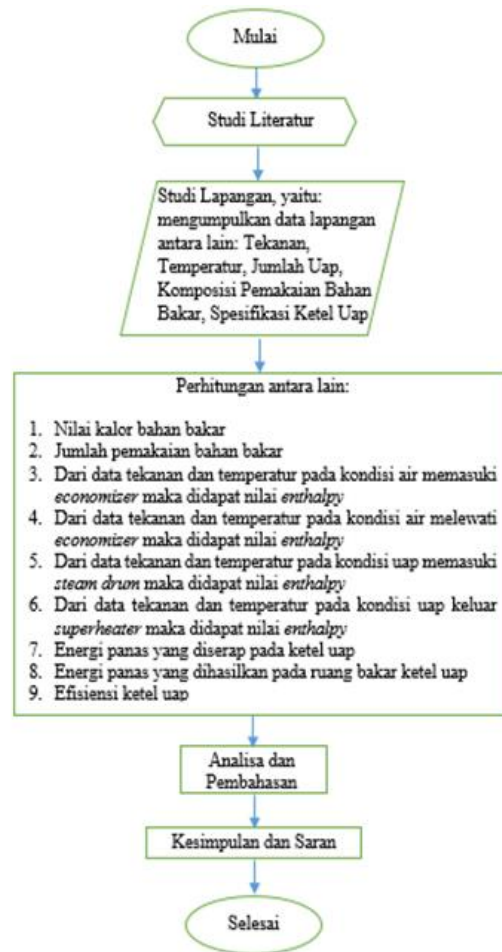
2.7 Efisiensi Ketel Uap

Efisiensi ketel uap dapat dihitung dengan p

$$\eta = \frac{Q_{use}}{Q_{in}} \times 100\%$$

3. METODOLOGI

3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

3.2. Pengambilan Data

Pengambilan data disesuaikan dengan proses produksi yang sedang berlangsung pada pabrik, agar tidak mengganggu kegiatan produksi pabrik.

Adapun data-data yang diperlukan dalam analisa skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Analisa bahan bakar cangkang dan serabut sawit
2. Uap yang dihasilkan oleh ketel uap
3. Temperatur pada kondisi air memasuki *economizer*
4. Tekanan pada kondisi air melewati *economizer*
5. Temperatur dan tekanan pada kondisi uap didalam *steam drum*
6. Temperatur dan tekanan pada kondisi uap keluar *superheater*

3.3. Spesifikasi Ketel Uap

Pengujian ini dilakukan pada ketel uap yang ada di Pabrik Kelapa Sawit PT. Bukit Barisan Indah Prima Grup Jl. Lintas Timur Jambi - Pekanbaru KM. 46 Kabupaten Muaro Jambi, Jambi. Pada Pabrik Kelapa

Sawit PT. Bukit Barisan Indah Prima Grup hanya ada satu unit ketel uap pipa air.

Adapun spesifikasi ketel uap pipa air PT. Bukit Barisan Indah Prima Grup, yaitu:

- a. Merk : Takuma
- b. Model Ketel Uap : N-750 SA
- c. Jenis Ketel Uap : *Water Tube Boiler*
- d. Tekanan Ketel Uap : Maximum 24 bar
- e. Kapasitas Uap : Maximum 25.00 Kg/jam
- f. Temperatur Uap : 280 °C
- g. No. Seri : 1137
- h. Tahun Pembuatan : 2000
- i. Pabrik Pembuat : PT. Sumber Andalas Steel

3.4. Data Spesifikasi Bahan Bakar

Tabel 1. Komposisi dari Unsur-unsur Kimia Serabut dan Cangkang Kelapa Sawit

Unsur	Serabut (%)	Cangkang (%)
Karbon (C)	45,75	51,14
Hidrogen (H ₂)	5,86	5,10
Sulfur (S)	0,19	0,26
Nitrogen (N ₂)	4,18	0,56
Oksigen (O ₂)	31,20	34,68
Abu (Ash)	7,14	2,96
Air (H ₂ O)	5,68	5,3
Jumlah	100	100

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

1.1. Data Hasil Pengujian

Tabel 2. Data Hasil Pengujian

Jumlah Uap Ton/jam	Feed Water		Deaerator		Econimizer		Steam Drum		Superheater	
	P (bar)	P (bar)	T (°C)	T (°C)	P (bar)	P (bar)	T (°C)	P (bar)	T (°C)	
14	17	24	80	85	15	16	338	15,2	340	
15	17,5	25	82	87	16	17	348	16	350	
16	18	26	84	89	17	18	363	17,1	355	
17	20,25	28	86,5	91,5	19	20	363	18,075	365	
18	22,3	30,3	87,3	92,3	19,3	20,3	374,6	18,6	376,6	

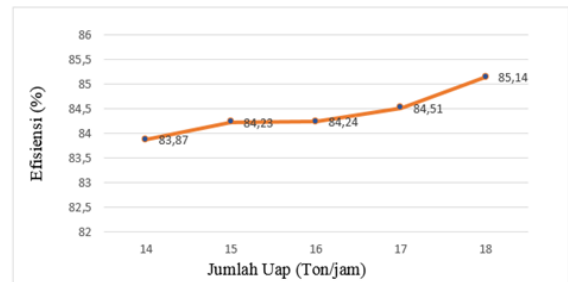
1.2. Data Hasil Perhitungan

Tabel 3. Data Hasil Perhitungan

Jumlah Uap Ton/jam	Jumlah Bahan Bakar kg/jam	Panas Yang di Serap kJ/kg	Panas Yang di Hasilkan kJ/kg	Kerugian Panas kJ/kg	Efisiensi %
14	2.730	39.034.660	46.537.537,41	7.502.877,41	83,87%
15	2.925	42.000.900	49.861.647,23	7.860.747,23	84,23%
16	3.120	44.803.856	53.185.757,04	8.381.901,04	84,24%
17	3.315	47.761.721	56.509.866,86	8.748.145,86	84,51%
18	3.510	50.947.389	59.833.976,67	8.886.587,67	85,14%

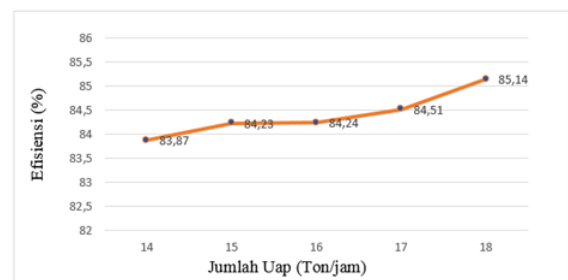
1.3. Pembahasan

Dari hasil perhitungan, dapat dilihat pengaruh jumlah uap terhadap bahan bakar dan efisiensi pada grafik dibawah ini:



Gambar 5. Grafik Jumlah Uap vs Bahan Bakar

Pada gambar 5. pengaruh jumlah uap yang dihasilkan oleh ketel uap terhadap jumlah bahan bakar yang digunakan, dapat diamati bahwa semakin besar jumlah uap yang dihasilkan oleh ketel uap maka bahan bakar yang digunakan semakin banyak. Jumlah bahan bakar terendah adalah pada jumlah uap 14 ton/jam sebesar 2.730 kg/jam bahan bakar dan jumlah bahan bakar tertinggi adalah pada jumlah uap 18 ton/jam sebesar 3.510 kg/jam bahan bakar.



Gambar 6. Jumlah Uap vs Efisiensi

Pada gambar 6 pengaruh jumlah uap yang dihasilkan ketel uap mempengaruhi efisiensi ketel uap. Dimulai pada jumlah uap 14 ton/jam didapatkan nilai efisiensi terkecil sebesar 83,87% dan pada jumlah uap 18 ton/jam didapatkan nilai efisiensi terbesar sebesar 85,14%. Pada jumlah uap 14 ton/jam didapatkan nilai efisiensi sebesar 83,87%, dan pada jumlah uap 15 ton/jam didapatkan nilai efisiensi sebesar 84,23%, dapat dilihat terjadi kenaikan efisiensi sebesar 0,36%. Pada jumlah uap 16 ton/jam didapatkan nilai efisiensi sebesar 84,24%, mengalami kenaikan efisiensi sebesar 0,01%. Pada jumlah uap 17 ton/jam didapatkan nilai efisiensi sebesar 84,51%, mengalami

kenaikan efisiensi sebesar 0,27%. Dan juga pada jumlah uap 18 ton/jam didapatkan nilai efisiensi sebesar 85,14%, mengalami kenaikan efisiensi sebesar 0,63%. Pada jumlah uap terkecil yaitu 14 ton/jam hal ini disebabkan oleh kebutuhan uap yang digunakan oleh perusahaan. Pada PT. Bukit Barisan Indah Prima Grup ini kebutuhan uap yang paling besar yaitu saat perebusan buah kelapa sawit. Jadi dalam hal ini tidak dikarenakan penurunan kualitas ketel uap, tapi karena kebutuhan dari pabrik.

Sehingga dapat diamati pada gambar 6 bahwa semakin besar jumlah uap yang dihasilkan maka efisiensi ketel uap akan semakin besar. Selisih antara efisiensi terbesar dan efisiensi terkecil pada ketel uap sebesar 1,27%. Sehingga dapat dilihat selisih antara efisiensi terbesar dan efisiensi terkecil pada ketel uap ini tidak begitu besar, jadi dapat disimpulkan bahwaketel uap ini masih memiliki performansi yang baik. Hal yang dilakukan untuk mempertahankan performansi ketel uap ini adalah sebagai berikut:

1. Air pengisi deaerator harus tetap terjaga kualitasnya yaitu dengan mengecek pH air setiap jam sehingga tetap terjaga pada pH 7-8.
2. Bahan bakar agar tetap terjaga tidak terendam air atau lembab.
3. Setiap 4 jam sekali tarik dan korek bahan bakar serta abu dari ruang dapur ketel uap.

5. KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Ketel uap yang digunakan pada Pabrik Kelapa Sawit PT. Bukit Barisan Indah Prima Grup adalah ketel uap pipa air dengan Type N-750 SA dan kapasitas uap maximum 25.00 kg/jam yang menggunakan bahan bakar serabut dan cangkang kelapa sawit dalam proses produksinya.

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Semakin besar jumlah uap yang dihasilkan maka panas yang diserap dan panas yang dihasilkan semakin besar pula. Panas yang diserap dan panas yang dihasilkan yang terkecil didapatkan pada jumlah uap 14 ton/jam yaitu sebesar 39.034.660 kg/jam dan 46.537.537,41 kg/jam dan terus meningkat sampai jumlah uap 18 ton/jam yaitu sebesar 50.947.389 kg/jam dan 59.833.976,67 kg/jam.
2. Semakin besar jumlah uap yang dihasilkan maka efisiensi yang dihasilkan semakin besar pula. Efisiensi terkecil ketel uap didapatkan pada jumlah uap 14 ton/jam yaitu sebesar 83,87% dan efisiensi terbesar didapatkan pada jumlah uap 18 ton/jam yaitu sebesar 85,14%.
3. Nilai pembakaran atas antara serabut dan cangkang kelapa sawit dengan perbandingan 75% serabut: 25% cangkang didapat sebesar 18.405,477. Nilai pembakaran bawah antara serabut dan cangkang kelapa sawit dengan

perbandingan 75% serabut: 25% cangkang didapat sebesar 17.046,717.

4. Semakin besar jumlah uap yang dihasilkan maka jumlah pemakaian bahan bakar semakin besar pula. Jumlah pemakaian bahan bakar terkecil didapatkan pada jumlah uap 14 ton/jam yaitu sebesar 2.730 kg/jam dan terus meningkat sampai jumlah uap 18 ton/jam sebesar 3.510 kg/jam.

5.2. Saran

1. Perawatan terhadap ketel uap harus dilakukan secara periodik dan terencana agar performansi dari ketel uap tetap baik.
2. Pengawasan terhadap bahan bakar agar tetap terjaga sehingga suplai bahan bakar dengan jumlah dan kecepatan yang cepat agar didapatkan hasil pembakaran yang stabil.
3. Perawatan tidak hanya pada ketel uap saja, tetapi alat pendukung seperti pompa harus dicek setiap hari apakah ada kebocoran dan alat ukur temperatur dan tekanan harus tetap bersih sehingga saat pembacaan tetap terlihat jelas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima Kasih kepada Dekan Fakultas Teknik Unsi yang telah memfasilitasi penelitian ini, juga kepada Direktur PT. Bukit Barisan Indah Permai Muaro Jambi, Provinsi Jambi sebagai tempat penelitian dengan semua fasilitasnya

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bangun, Virginia Herapika. 2014. "Analisa Performansi Boiler Water Tube 35 Ton/Jam /20 Bar PT. PP London Sumatra Indonesia, Tbk Bolok Pom-Limapuluh". Medan: Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan.
- [2] Yulizar. 2007. "Analisa Efisiensi Ketel Uap Pipa Air Dengan Bahan Bakar Serabut Dan Cangkang Kelapa Sawit Pada Pabrik Kelapa Sawit PT. Gunung Sawit Bina Lestari". Indralaya: Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya.
- [3] Cengel, Yunus A. and Michael A. Boles. 1989. "Thermodynamics An Engineering Approach 5th Edition". New York: McGraw-Hill Book
- [4]. Batubara, Pesulima. 2014. "Analisa Efisiensi Water Tube Boiler Berbahan Bakar Fiber Dan Cangkang Di Palm Oil Mill Dengan Kapasitas 45 Ton TBS/Jam". Medan: Fakultas Teknik, Teknik Mesin, Universitas Sumatera Utara.
- [5] Sunarwan, Bambang dan Riyadi Juhana. 2013. "Pemanfaatan Limbah Sawit Untuk Bahan Bakar Energi Baru Dan Terbarukan (EBT)". Jurnal Tekno Insentif Kopwil4. Volume 7, No. 2, Hal. 1 s.d. 14.
- [6] Ganapathy, V. 1904. "Steam Plant Calculation Manual". Marcel Deckker Inc.

- [7] <http://tengbot.com/model-3d-boiler-mackenzie.html>. Diakses 27 Desember 2015.
- [8] Muin, A. Syamsir. 1988. "Pesawat-Pesawat konversi Energi I (Ketel Uap)". Jakarta: Rajawali Pers.