

ANALISIS EFISIENSI KETEL UAP KAPASITAS 35 TON/JAM DI PT PERKEBUNAN LEMBAH BHAKTI, ASTRA AGRO LESTARI, TBK

Chitra Aginta Br Surbakti¹, Elsa Hestina Br Sebayang², Abdul Razak³

Teknik Konversi Energi^{1,2,3}, Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan
chitraaginta@students.polmed.ac.id¹, elsahestina@students.polmed.ac.id²,
abdulrazak@polmed.ac.id³

ABSTRAK

Ketel uap adalah suatu bejana bertekanan untuk membangkitkan uap dengan memanaskan air menggunakan panas dari pembakaran bahan bakar. Panas yang diterima dari pembakaran bahan bakar digunakan untuk menaikkan temperatur air dalam bejana yang dipanaskan secara terus menerus sehingga menjadi fluida uap. Uap yang dihasilkan berguna untuk membangkitkan energi listrik dan juga untuk kebutuhan proses lainnya dalam pabrik kelapa sawit. Ketel uap yang digunakan PT Perkebunan Lembah Bhakti, Astra Agro Lestari, Tbk adalah ketel uap pipa air indomarine WR-1100 FM *type* kapasitas 35 ton/jam dengan menggunakan bahan bakar cangkang dan serabut dengan perbandingan 1:3. Jumlah konsumsi bahan bakar untuk memproduksi uap adalah 7.328 kg/jam dengan nilai kalor pembakaran rendah (LHV) sebesar 12.097,6729. Besar efisiensi ketel uap yang diperoleh dengan menggunakan metode langsung adalah sebesar 64,90%.

Kata Kunci : Ketel Uap, Bahan Bakar, Efisiensi

PENDAHULUAN

Pada bidang industri pertanian khususnya dalam produksi kelapa sawit berkembang pesat. Dalam proses pengolahan kelapa sawit menjadi minyak Mentah atau CPO (*Crude Palm Oil*) dan juga Palm Kernel Oil diperlukan energi listrik. Oleh karena itu pada Pabrik Kelapa Sawit biasanya memiliki pembangkit sendiri untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dalam proses pengolahan yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).

Ketel uap (*boiler*) merupakan sebuah bejana bertekanan untuk membangkitkan uap dengan memanaskan air menggunakan panas dari pembakaran bahan bakar. Ketel uap mempunyai komponen utama yaitu ruang pembakaran, pipa ketel, drum ketel, alat pemisah uap, alat pemanas lanjut (*superheater*), penyuplai udara, cerobong asap, alat penampung debu, *feed water tank*, *de-aerator*, dan perlengkapan penunjang ketel uap. Uap yang dihasilkan berguna untuk membangkitkan energi listrik (turbin uap) dan untuk kebutuhan proses lainnya.

PT Perkebunan Lembah Bhakti, Astra Agro Lestari, Tbk merupakan perusahaan yang bergerak dibidang pengolahan kelapa sawit, pada perusahaan ini juga memiliki pembangkit listrik sendiri untuk membantu proses produksi pengolahan kelapa sawit. Ketel uap merupakan salah satu komponen pembangkit listrik tenaga uap yang digunakan. Ketel uap yang digunakan oleh PT Perkebunan Lembah Bhakti, Astra Agro Lestari, Tbk yaitu ketel uap pipa air merek indomarine model WR-1100 FM.

Dari latar belakang diatas, maka penulis tertarik untuk membahas dan ingin mengetahui lebih banyak lagi mengenai prinsip kerja dari ketel uap, bagian-bagian, nilai kalor bahan bakar dan perhitungan efisiensi ketel uap.

TINJAUAN PUSTAKA

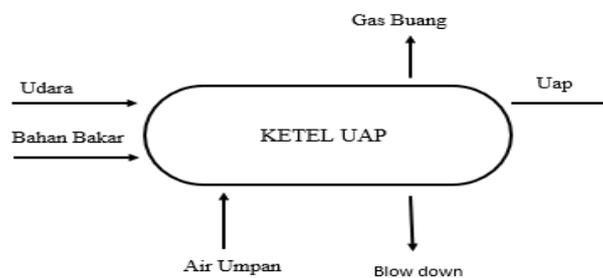
Prinsip Kerja Ketel Uap

Ketel uap merupakan suatu alat untuk membangkitkan atau menghasilkan uap dengan cara memanaskan air yang ada di dalam ketel uap dengan menggunakan panas hasil dari pembakaran bahan bakar. Pembakaran bahan bakar dilakukan secara kontinyu di dalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar. Air tersebut kemudian menyerap kalor dari pembakaran

sehingga suhunya meningkat secara terus menerus sehingga menghasilkan uap basah. Uap basah tadi kemudian menuju ke pemanas lanjutan (*superheater*). *Superheater* ini berfungsi untuk memanaskan uap basah hingga menjadi uap kering.

Uap yang dihasilkan dari ketel uap ialah uap panas lanjut (*superheated steam*) dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada luas pemindah panas, laju aliran, dan panas pembakaran yang diberikan. Uap dengan temperatur dan tekanan tinggi yang dapat digunakan untuk menggerakkan sudu-sudu turbin yang terhubung dengan generator untuk dapat menghasilkan listrik.

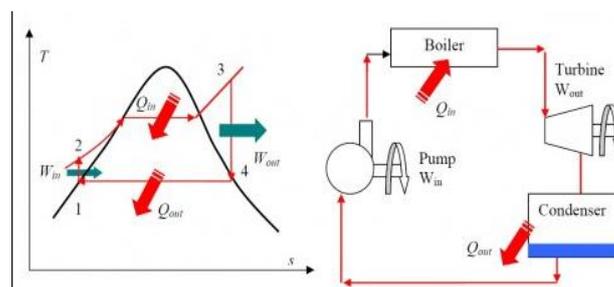
Pada saat proses pemanasan air menjadi uap, padatan-padatan yang terkandung dalam air umpan *boiler* akan tertinggal di air *boiler*. Padatan-padatan tersebut dapat menimbulkan terbentuknya kerak atau deposit dalam *boiler*. Untuk mencegah terbentuknya kerak di dalam air *boiler* maka air harus diganti. Proses ini dikenal sebagai *blowdown* yang berkelanjutan. Selain air yang mengalir menjadi uap, bahan bakar yang telah dilakukan proses pembakaran memiliki gas buang yang disalurkan melalui *chimney*. Kotoran yang menempel bagian pipa luar akan dilakukan pembersihan dengan proses *shoot blower*.



Gambar 1. Prinsip Kerja Ketel Uap

Proses Pembentukan Uap

Penguapan adalah proses terjadinya perubahan fasa dari cairan menjadi uap. Apabila panas diberikan pada air, maka suhu air akan naik. Naiknya suhu air akan meningkatkan kecepatan gerak molekul air. Jika panas terus bertambah secara perlahan-lahan, maka kecepatan gerak air akan semakin meningkat pula, hingga sampai pada suatu titik dimana molekul-molekul air akan mampu melepaskan diri dari lingkungannya pada temperatur 100°C dan tekanan 1 atm, maka air akan berangsur-angsur menjadi uap (Kunarto, 2019).



Gambar 2. Siklus Rankine

Sumber: (<https://www.insinyoer.com/prinsip-kerja-siklus-rankine/2/>)

Proses 1-2 : Pompa air umpan *boiler* meningkatkan tekanan air, sementara suhunya juga meningkat secara adiabatik. Pemanasan awal air umpan terjadi di *de-aerator*, air dipanaskan hingga mencapai temperatur $95^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$.

Proses 2-3 : Air dipanaskan dalam ketel uap sehingga temperatur meningkat pada tekanan konstan. Temperatur naik sampai mencapai temperatur saturasi. Saat air mulai mendidih tekanan dan suhu akan konstan, sementara fraksi kekeringannya naik mencapai kurva batas atas sehingga uap jenuh (*saturated steam*) menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*).

Proses 3-4 : Uap masuk ke dalam turbin, dimana uap mengalami ekspansi secara isentropik dan menghasilkan kerja untuk memutar poros yang terhubung pada generator.

Nilai Kalor Bahan Bakar (*Calorific Value*)

Nilai panas (kalor) didefinisikan sebagai energi panas yang dilepaskan pada waktu terjadi oksidasi unsur-unsur kimia yang terdapat dalam bahan bakar (Muin, Syamsir A. 2016). Berdasarkan asumsi ikut tidaknya panas laten pengembunan uap air dihitung sebagai bagian dari nilai kalor suatu bahan bakar.

Maka nilai kalor bahan bakar dibedakan menjadi dua yaitu :

a. Nilai kalor atas (*High heating value*)

Nilai kalor atas merupakan nilai kalor yang diperoleh secara eksperimen dengan menggunakan *calorimeter* dimana hasil pembakaran bahan bakar didinginkan sampai suhu kamar sehingga sebagian besar uap air yang terbentuk dari pembakaran *hydrogen* mengembun dan melepaskan panas latennya. Secara teoritis, besarnya nilai kalor atas (HHV) dapat dihitung bila diketahui komposisi bahan bakar dengan menggunakan persamaan *Dulong dan Petit* (Muin, Syamsir A. 2016) :

$$\text{HHV} = 33950C + 144200\left(\text{H}_2 - \frac{\text{O}_2}{8}\right) + 9400S \quad (1)$$

Dimana :

- HHV = *High Heating Value* (kJ/kg)
 C = Persentase karbon dalam bahan bakar
 H₂ = Persentase hidrogen dalam bahan bakar
 O = Persentase oksigen dalam bahan bakar
 S = Persentase sulfur dalam bahan bakar

b. Nilai kalor bawah (*Low heating value*)

Nilai kalor bawah (*Low heating value*) merupakan nilai kalor bahan bakar tanpa panas laten yang berasal dari pengembunan uap air (Muin, Syamsir A. 2016).

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2411(M + 9\text{H}_2) \quad (2)$$

Dimana :

- LHV = *Low Heating Value* (kJ/kg)
 HHV = *High Heating Value* (kJ/kg)
 M = Persentase air (H₂O) dalam bahan bakar
 H₂ = Persentase hidrogen dalam bahan bakar

Efisiensi Ketel Uap

Efisiensi *boiler* adalah prestasi kerja atau tingkat unjuk kerja *boiler* atau ketel uap yang di dapatkan dari perbandingan antara energi yang diserap (keluaran) dengan energi yang dihasilkan (masuk) oleh ketel uap.

Metode langsung dikenal juga sebagai metode "*input-output*" karena metode ini memerlukan keluaran (*output*) yaitu *steam* dan panas masuk (*input*) yaitu bahan bakar untuk evaluasi efisiensi (Harry, 2013).

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta) = \frac{\text{Panas keluar}}{\text{Panas masuk}} \times 100\%$$

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta) = \frac{\dot{m}_u (h_u - h_a)}{\text{mbb. LHV}} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana :

- \dot{m}_u = Laju aliran uap (kg/jam)
 h_u = Entalpi spesifik uap (*superheated*) (kJ/kg)

h_a = Entalpi spesifik air umpan (kJ/kg)

m_{bb} = Konsumsi bahan bakar (kg/jam)

LHV = *Low Heating Value* (kJ/kg)

METODE PENELITIAN

Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data aktual yang diperoleh dari *logsheet boiler* pada tanggal 9 Maret 2021. Adapun data-data yang diperoleh sebagai berikut :

Tabel 1. Data Operasional Ketel Uap

Data Operasional	
Kapasitas ketel uap	35.000 kg/jam
<i>Steam outlet (steam flow)</i>	22.300 kg/jam
Tekanan uap	28,67 kg/cm ²
Temperatur uap	300°C
Temperatur air umpan	99,76°C

Sumber: PT PLB, 2021

Tabel 2. Data Spesifikasi Ketel Uap

Spesifikasi Ketel Uap	
Kapasitas ketel uap	35.000 kg/jam
Tekanan uap	30 kg/cm ²
Temperatur uap	320°C
Temperatur air umpan	100°C

Sumber: PT PLB, 2021

Tabel 3. Data Komposisi Bahan Bakar (PT PLB, 2021)

Nama Unsur	Cangkang	Serabut
Carbon (C)	46,70%	31,40%
Hidrogen (H ₂)	5,60%	3,80%
Oksigen (O ₂)	31,20%	21,50%
Nitrogen (N ₂)	0,67%	1,06%
Sulfur (S)	0,07%	0,12%
<i>Moisture (H₂O)</i>	12,40%	38,18%
<i>Ash</i>	3,36%	4,02%

Metode Pengolahan Data

Setelah mendapatkan data-data yang dibutuhkan, kemudian melakukan analisis dari data yang diperoleh sesuai dengan studi literatur yang sudah dilakukan sebelumnya. Dari data-data yang diperoleh dari *logsheet boiler*, *manual book*, kemudian dianalisis besar efisiensi ketel uap. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode langsung.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Komposisi Bahan Bakar Cangkang dan Serabut

Perbandingan bahan bakar cangkang dan serabut adalah 1:3, maka komposisi 1 kg bahan bakar campuran cangkang dan serabut adalah :

$$C = \frac{1}{4}(46,70\%) + \frac{3}{4}(31,40\%) = 35,225\% = 0,35225 \text{ kg}$$

$$H_2 = \frac{1}{4}(5,60\%) + \frac{3}{4}(3,80\%) = 4,25\% = 0,0425 \text{ kg}$$

$$O_2 = \frac{1}{4}(31,20\%) + \frac{3}{4}(21,50\%) = 23,925\% = 0,23925 \text{ kg}$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(0,67\%) + \frac{3}{4}(1,06\%) = 0,9625\% = 0,009625 \text{ kg}$$

$$S = \frac{1}{4}(0,07\%) + \frac{3}{4}(0,12\%) = 0,1075\% = 0,001075 \text{ kg}$$

$$H_2O = \frac{1}{4}(12,40\%) + \frac{3}{4}(38,18\%) = 31,735\% = 0,31735 \text{ kg}$$

$$Ash = \frac{1}{4}(3,36\%) + \frac{3}{4}(4,02\%) = 3,855\% = 0,03855 \text{ kg}$$

Nilai Kalor Bahan Bakar

a. Nilai kalor atas (HHV)

Untuk mencari nilai kalor atas (HHV) maka digunakan rumus “Dulong dan Petit” dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} HHV &= 33950 C + 144200 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9400 S \\ &= 33950 (0,35225) + 144200 \left(0,0425 - \frac{0,23925}{8} \right) + 9400 (0,001075) \\ &= 11.958,8875 + 1.816,01875 + 10,105 \\ &= 13.785,01125 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

b. Nilai kalor bawah (LHV)

Untuk mencari nilai kalor bawah (LHV) maka digunakan rumus dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} LHV &= HHV - 2411 (M + 9H_2) \\ &= 13.785,01125 \text{ kJ/kg} - 2411 (0,31735 \text{ kg} + (9 \times 0,0425 \text{ kg})) \\ &= 13.785,01125 \text{ kJ/kg} - 1687,338835 \text{ kg} \\ &= 12.097,6729 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Tabel 2. Konsumsi Bahan Bakar

Pemakaian Bahan Bakar	
Cangkang	Serabut
1198 kg/jam	6130 kg/jam
Total Pemakaian Bahan Bakar = 7328 kg/jam	

Sumber: PT PLB, 2021

Analisis Data Operasional Ketel Uap

a. Menghitung Entalpi Air Umpan

Pada $T_a = 99,76^\circ\text{C}$ pada tabel uap diperoleh entalpi dengan melakukan interpolasi sebagai berikut :

$$T_{95} = 95^\circ\text{C} \quad h_{95} = 398,09 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{99,76} = 99,76 \text{ } ^\circ\text{C} \quad h_{99,76} = \dots\dots\dots ?$$

$$T_{100} = 100 \text{ } ^\circ\text{C} \quad h_{100} = 419,17 \text{ kJ/kg}$$

Sehingga diperoleh h_a sebagai berikut:

$$\frac{T_{100}-T_{99,76}}{T_{100}-T_{95}} = \frac{h_{100}-h_{99,76}}{h_{100}-h_{95}}$$

$$\frac{100-99,76}{100-95} = \frac{419,17-h_{99,76}}{419,17-398,09}$$

$$\frac{0,24}{5} = \frac{419,17-h_{99,76}}{21,08}$$

$$1,011 = 419,17-h_{99,76}$$

$$h_{99,76} = 418,159 \text{ kJ/kg}$$

b. Menghitung Entalpi Uap

Pada $T_u = 300^\circ\text{C}$ dan $P_u = 28,67 \text{ kg/cm}^2$ pada tabel uap diperoleh nilai entalpi dengan melakukan interpolasi sebagai berikut :

$$P = 30 \text{ kg/cm}^2 \quad T = 300^\circ\text{C} \quad h_{30} = 2994,3 \text{ kJ/kg}$$

$$P = 28,67 \text{ kg/cm}^2 \quad T = 300^\circ\text{C} \quad h_{28,67} = \dots\dots\dots ?$$

$$P = 25 \text{ kg/cm}^2 \quad T = 300^\circ\text{C} \quad h_{25} = 3009,6 \text{ kJ/kg}$$

Sehingga diperoleh h_u sebagai berikut:

$$\frac{P_{28,67}-P_{25}}{P_{30}-P_{25}} = \frac{h_u-h_{25}}{h_{30}-h_{25}}$$

$$\frac{28,67-25}{30-25} = \frac{h_u-3009,6}{2994,3-3009,6}$$

$$\frac{3,67}{5} = \frac{h_u-3009,6}{-15,3}$$

$$-11,23 = h_u - 3009,6$$

$$h_u = 2.998,369 \text{ kJ/kg}$$

Efisiensi Ketel Uap

Menghitung efisiensi ketel uap dalam analisa ini menggunakan metode langsung yang dimana melakukan perbandingan antara energi yang diserap (keluaran) dengan energi yang dihasilkan (masuk) oleh ketel uap. Hasil perhitungan efisiensi ketel uap sebagai berikut :

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta_b) = \frac{\text{Panas keluar}}{\text{Panas masuk}} \times 100\%$$

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta_b) = \frac{\dot{m}_u (h_u - h_a)}{m_{bb} \cdot \text{LHV}} \times 100\%$$

$$\eta_b = \frac{22300 \text{ kg/jam} (2.998,369 - 418,159) \text{ kJ/kg}}{7328 \text{ kg/jam} (12.097,673 \text{ kJ/kg})} \times 100\%$$

$$\eta_b = 64,90 \%$$

Dimana :

$$\dot{m}_u = \text{Laju aliran uap} \quad (22.300 \text{ kg/jam})$$

$$h_u = \text{Entalpi spesifik uap (superheated)} \quad (2.998,369 \text{ kJ/kg})$$

$$h_a = \text{Entalpi spesifik air umpan} \quad (418,159 \text{ kJ/kg})$$

$$m_{bb} = \text{Konsumsi bahan bakar} \quad (7328 \text{ kg/jam})$$

$$\text{LHV} = \text{Low Heating Value} \quad (12.097,673 \text{ kJ/kg})$$

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis efisiensi ketel uap kapasitas 35 Ton/Jam di PT Perkebunan Lembah Bhakti, Astra Agro Lestari, Tbk., maka dapat disimpulkan: Ketel uap (*boiler*) adalah suatu bejana bertekanan untuk membangkitkan uap dengan memanaskan air menggunakan panas dari pembakaran bahan bakar. Komponen-komponen utama ketel uap yaitu ruang pembakaran (*furnance*), pipa ketel, drum ketel, alat pemisah uap (*steam separator*), alat pemanas lanjut (*superheater*), penyuplai udara (*fan*), cerobong asap (*chimney*), alat penampung debu (*dust collector*), *feed water tank*, *deaerator*, dan perlengkapan penunjang ketel uap. Nilai kalor atas (*High Heating Value*) pada bahan bakar campuran yaitu cangkang dan serabut diperoleh berdasarkan perhitungan rumus “*Dulong dan Petit*” adalah sebesar 13.785,01125 kJ/kg. Nilai kalor bawah (*Low Heating Value*) yang diperoleh sebesar 12.097,6729 kJ/kg. Bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan uap sebanyak 22.300 kg/jam adalah bahan bakar cangkang sebesar 1.198 kg/jam dan serabut adalah sebesar 6.130 kg/jam dan total keseluruhan bahan bakar campuran ialah sebesar 7.328 kg/jam. Maka dari itu diperoleh efisiensi ketel uap adalah sebesar 64,90%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dengan rasa syukur menyampaikan terimakasih kepada seluruh pihak Politeknik Negeri Medan terkhususnya kepada lembaga DIPA Polmed sebagai sumber pemberian dana dalam pengerjaan karya ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

Muin, Syamsir.A., 2018, *Pesawat- pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)*, Edisi pertama, Cetakan 4, Rajawali, Jakarta.

PT Astra Agro Lestari, Tbk., 2007, *Modul 1 Boiler Palm Oil Mill*.

PT Astra Agro Lestari, Tbk., 2021, *Boiler Materi Training Brevet 2B*.

Hasibuan, Christian H., 2013, *Analisa Pemakaian Bahan Bakar Dengan Melakukan Pengujian Nilai Kalor Terhadap Performansi KeteL Uap Type Water Tube Dengan Kapasitas 60 Ton/Jam*, Skripsi, Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara, Medan.