



# PEMANFAATAN *EMPTY FRUIT BUNCH* PRESS SEBAGAI BAHAN BAKAR PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

Henny Ernita Pardosi<sup>a\*</sup>, Ilham Saufi<sup>a</sup>, Yunus Daeli<sup>b</sup>, Husin Ibrahim<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Teknik Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

<sup>b</sup>PLTU Growth Asia Jl. K.L. Yos Sudarso Km 10,5. Kawasan Industri Medan, Sumatera Utara, Medan, Indonesia

<sup>c</sup>Pusat Energi Baru Terbarukan, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia Medan, Indonesia

E-mail: [hennyernita@students.polmed.ac.id](mailto:hennyernita@students.polmed.ac.id) (H. E. Pardosi) Tel.: + 62 821-6276-9722

## INFO ARTIKEL

### Riwayat artikel:

Diajukan pada 29 Oktober 2022

Direvisi pada 26 November 2022

Disetujui pada 8 Desember 2022

Tersedia daring pada 25 Februari 2022

### Kata kunci:

Bahan Bakar, biomassa, *boiler*, efisiensi

### Keywords:

*Fuel, biomass, boiler, efficiency*

## ABSTRAK

*Empty Fruit Bunch* (EFB) merupakan salah satu bahan bakar biomassa yang potensial untuk menghasilkan bahan bakar bio karena ketersediaannya yang melimpah. Studi ini fokus membahas tentang analisis penggunaan EFB sebagai bahan bakar Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Metode pengambilan data pada penelitian ini dengan cara metode pengkajian efisiensi ketel uap dan perhitungan efisiensi ketel uap dengan metoda langsung. Komposisi dari berbagai macam bahan bakar dan nilai kalor dari bahan bakar juga dibahas pada penelitian ini. Ketel uap berasal dari kata “*boil*” yang memiliki arti mendidih atau menguap sehingga pengertian ketel uap adalah salah satu mesin konversi energi dengan bejana tertutup dan bertekanan yang berfungsi untuk memanaskan air dengan menggunakan panas hasil pembakaran bahan bakar. Panas hasil pembakaran dialirkan ke air sehingga menghasilkan steam dan memiliki tekanan tinggi yang dimanfaatkan untuk memutar turbin. Energi kimia yang tersimpan dalam bahan bakar akan dikonversi menjadi energi panas yang ditransfer ke fluida kerja. Salah satu ketel uap yang digunakan di PLTU Growth Asia adalah ketel uap pipa air dengan bahan bakar *efb press* 10,6%, *fiber* 28,21% kayu giling 57,05%, tongkol jagung 3,12% dan sekam padi 1,02%. Ketel uap tersebut bekerja pada tekanan 35 bar dengan produksi uap 66,245 Ton uap/jam dan suhu 373°C. Jumlah panas yang dibutuhkan untuk memproduksi uap adalah 284379849,3645 kJ/jam. Performansi ketel uap memiliki efisiensi thermal 63,26%.

## ABSTRACT

*Empty Fruit Bunch* (EFB) is one of the potential biomass fuels to produce biofuels because of its abundant availability. This study focuses on discussing the analysis of the use of EFB as fuel for Steam Power Plants. The method of data collection in this study was the method of assessing the efficiency of the boiler and calculating the efficiency of the boiler using the direct method. The composition of various fuels and the calorific value of the fuel is also discussed in this study. The steam boiler comes from the word “*boil*” which means to boil or evaporate so that the definition of a steam boiler is an energy conversion machine with a closed and pressurized vessel that functions to heat water using the heat from the combustion of fuel. The heat from the combustion is flowed into the water to produce steam and has a right pressure which is used to turn the turbine. Chemical energy stored in the fuel will be converted into heat energy which is transferred to the working fluid. One of the steam boilers used at PLTU Growth Asian is a water tube boiler with fuel *EFB press* 10,6%, *fiber* 28,21%, milled wood 57,05%, *corn cobs* 3,12% and *rice husk* 1,02%. The steam boiler works at a pressure of 35 bar with a steam production 66,245 tons or steam/hour and a temperature of 373°C. the amount of heat needed to produce steam is 284379849,3645 kJ/hour. The performance of the steam boiler has thermal efficiency of 63,26%.



## 1. PENGANTAR

Energi merupakan bagian penting dalam kehidupan manusia, karena hampir semua aktivitas manusia membutuhkan energi. Kebutuhan energi juga diiringi dengan peningkatan kesejahteraan masyarakat Pembangkit tenaga listrik merupakan salah satu penyedia kebutuhan listrik yang paling banyak di Indonesia dan kebutuhan ini telah menjadi kebutuhan pokok (*primer*). Salah satu pusat pembangkit tenaga yang menghasilkan energi listrik adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik yang berasal dari uap (*steam*) untuk menghasilkan energi listrik. Generator merupakan bentuk utama dari pembangkit listrik tenaga uap. yang dimana generator yang dihubungkan ke turbin, diperlukan adanya energi kinetik dari uap kering untuk memutar turbin. Proses konversi energi pada PLTU berlangsung melalui 3 tahapan yaitu energi kimia dalam bahan bakar akan diubah menjadi energi panas dalam bentuk uap yang bertekanan dan temperatur tinggi, ini merupakan tahap pertama. Energi panas dalam bentuk uap tersebut akan diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran oleh turbin yang merupakan tahap kedua. Lalu energi mekanik akan diubah menjadi energi listrik oleh generator dan merupakan tahap terakhir. *Boiler* atau ketel uap adalah suatu alat atau bejana tertutup yang bertekanan dan dirancang sedemikian rupa untuk menghasilkan uap (*steam*) yang kemudian dibuat menjadi uap super panas dan dengan sifat dan kondisi tertentu untuk menggerakkan turbin agar menghasilkan listrik (Syamsir, 2010). *Boiler* berfungsi sebagai tempat terjadinya pemanasan air sebagai bahan baku utama untuk pembentukan uap. Pada proses konversi energi ketel uap berfungsi mengkonversikan energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar dan diubah menjadi energi panas yang ter transfer ke fluida kerja. Produksi uap dalam *boiler* dihasilkan dari pemanasan air hingga menjadi uap, sehingga pada akhirnya akan bertekanan dan ber temperatur tinggi. Disamping tekanan dan panasnya, sifat uap juga mempunyai kecepatan yang sangat tinggi dengan menggunakan prinsip beda tekanan dari tekanan tinggi ke tekanan yang rendah (Syamsir, 2010,).

### 1.1. Empty Fruit Bunch (EFB)

Salah satu sumber energi terbarukan adalah energi biomassa yang berasal dari limbah padat hasil Pengolahan Kelapa Sawit (PKS). Salah satu contoh limbah padat tersebut adalah Tandan Kosong Sawit/ *Empty Fruit Bunch* (EFB) (Sitorus, 2013). Potensi dan kekayaan sawit Indonesia, bisa dimanfaatkan untuk menjadi sumber energi terbarukan yang murah dan mudah didapatkan. Khususnya sumber energi yang berhubungan dengan pembangkitan listrik. Hal ini mengingat potensi yang dimiliki oleh kelapa sawit sebagai bahan bakar pembangkit listrik, baik yang berasal dari produk utama maupun hasil samping, dengan cara pembakaran biomassa menjadi uap, maupun minyak kelapa sawit sebagai bahan bakar mesin diesel (Zulfikar dkk., 2018).

### 1.2. Ketel Uap

Ketel uap sendiri atau *Boiler* berasal dari kata “*boil*” yang memiliki arti mendidih dan menguap, dari mula kata inilah ketel uap atau *boiler* dapat dikatakan sebagai suatu alat untuk mengkonversikan energi, karena dapat mengubah energi panas hasil pembakaran bahan bakar menjadi energi potensial uap. Syamsir (2010) menyatakan bahwa *boiler* atau ketel uap merupakan salah satu mesin konversi energi dengan wadah tertutup yang berfungsi untuk menghasilkan uap, yang energi kinetik nya dimanfaatkan untuk memutar turbin. Sistem pada *boiler* terbagi menjadi beberapa bagian yaitu sistem air umpan, sistem *steam*, dan sistem bahan bakar (Syamsir, 2010). Sistem umpan air menyediakan air kepada *boiler* dan mengaturnya secara otomatis untuk memenuhi kebutuhan uap air. Sistem uap air yaitu mengumpulkan dan mengendalikan produksi uap air di dalam *boiler*. Pada keseluruhan sistem, tekanan uap air diatur menggunakan katup dan diukur dengan alat pengukur tekanan uap air. Sedangkan sistem bahan bakar meliputi semua peralatan yang digunakan untuk menyuplai bahan bakar guna menghasilkan panas yang diperlukan. Peralatan yang digunakan dalam sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Air umpan (*feed water*) adalah air yang dialirkan ke dalam *boiler* yang akan diubah menjadi uap air . Dua sumber pada air umpan adalah uap air yang di kondensasi kan kembali dari proses (kondensat) dan air baku yang diolah (*make up water*) yang harus didatangkan dari luar ruang boiler dan bagian proses (Syamsir, 2010; Djokosetyardjo, 2016). Pada peningkatan efisiensi *boiler* digunakan *economizer* sebagai tempat pemanasan awal air.

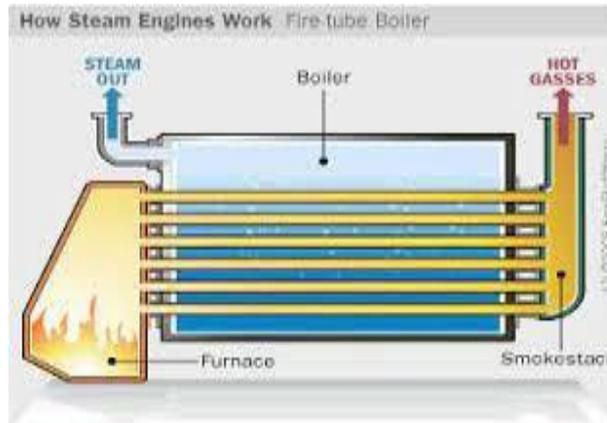
### 1.3. Prinsip Kerja Ketel Uap

Prinsip kerja ketel uap (*boiler*) sebenarnya cukup sederhana sama seperti pada saat kita sedang mendidihkan air menggunakan panci. Proses pendidihan air tersebut akan selalu diiringi proses pemindahan panas yang melibatkan bahan bakar, udara, material wadah air, serta air itu sendiri. Proses perpindahan panas ini mencakup tiga jenis perpindahan panas yang sudah sangat kita kenal yakni konduksi, konveksi dan radiasi. pada boiler proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berada di dalam pipa-pipa dengan memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Energi panas akan terpancar secara radiasi ke pipa - pipa *evaporator* sehingga dapat memanaskan pipa tersebut. Pembakaran dilakukan secara kontinu di dalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar . Panas yang terserap oleh permukaan pipa akan secara konduksi berpindah ke sisi permukaan dalam pipa. Di dalam pipa mengalir air yang terus menerus menyerap panas tersebut. Proses penyebaran panas antar molekul air di dalam aliran ini terjadi secara konveksi. Uap yang dihasilkan boiler adalah uap panas lanjut (*superheat*) dengan tekanan dan temperatur tinggi. Secara bertahap air akan berubah fase menjadi uap basah (*saturated steam*) dan dapat berlanjut hingga menjadi uap kering (*superheated steam*). Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindahan panas, laju aliran dan panas pembakaran yang diberikan (Djokosetyardjo, 2016; El-Wakil, M.M, 2016).

#### 1.4. Klasifikasi Ketel Uap

##### 1.1.1 Ketel pipa api (*Fire tube boiler*)

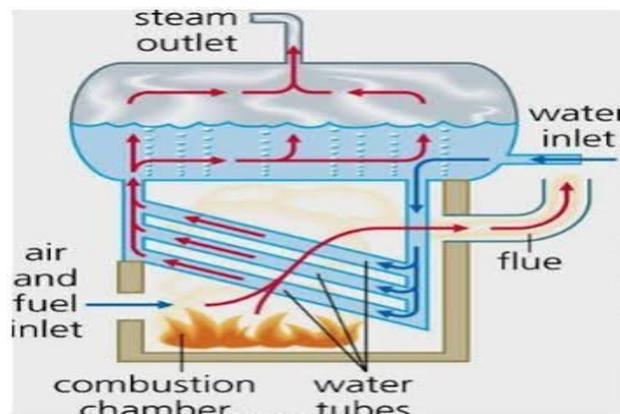
Pada ketel uap pipa api terjadi proses dimana gas panas hasil pembakaran dilewatkan pada *tube*, sementara itu air berada dalam sisi *shell*, sehingga terjadi perpindahan panas yang mengakibatkan air berubah menjadi uap. Karakteristik dari ketel uap pipa adalah menghasilkan kapasitas dan tekanan uap yang rendah. Ketel pipa api dapat menggunakan bahan bakar minyak bakar, gas atau bahan bakar padat dalam operasinya (Doli Permana, 2013). Cara kerja dari ketel uap pipa api adalah proses kerja terjadi dalam pipa, kemudian panas yang dihasilkan langsung dihantarkan ke dalam *boiler* yang berisi air. Kapasitas dan tekanan yang dihasilkan oleh ketel uap akan mempengaruhi besar dan konstruksi ketel uap. Ketel uap pipa api dapat dilihat pada Gambar 1 berikut (Anky Puspawan dkk, 2016):



Gambar 1: Ketel pipa api (*fire tube boiler*)

##### 1.1.2 Ketel pipa air (*Water tube boiler*)

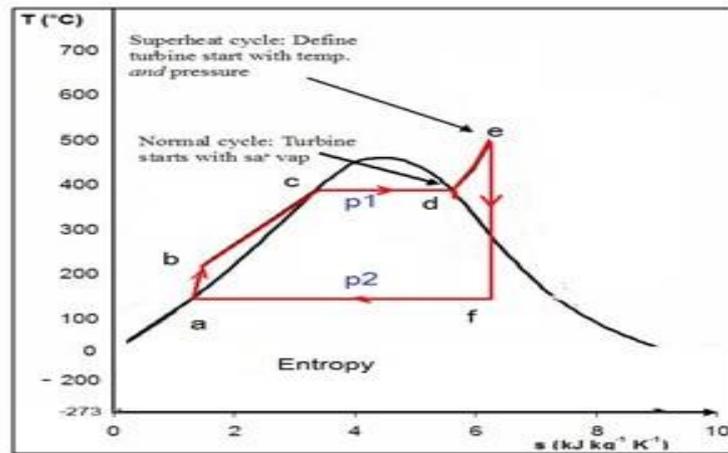
Ketel uap pipa air pada prosesnya berbanding terbalik dengan *fire tube boiler*, dimana air yang dialirkan di dalam tube, sedangkan proses pembakaran berada di luar tube (*shell*). Karakteristik dari ketel uap pipa air adalah menghasilkan kapasitas dan tekanan steam yang tinggi. *Boiler* ini dipilih jika kebutuhan steam dan tekanan *steam* sangat tinggi seperti pada kasus boiler pembangkit tenaga (Syamsir, 2010). Cara kerja dari ketel uap pipa air ini adalah air yang mengalir di dalam pipa – pipa terjadi proses pengapian, yang dimana pemanasan air dilakukan oleh gas – gas asap yang beredar di sekitar pipa itu. Ketel uap pipa air dapat dilihat pada gambar 2 dibawah ini (Anky Puspawan dkk., 2016):



Gambar 2: Ketel pipa air (*water tube boiler*)

#### 1.5. Proses Pembentukan Uap

Proses terbentuknya uap terjadi melalui perubahan energi panas pada proses pembakaran bahan bakar menjadi energi panas dalam bentuk uap. Panas hasil pembakaran tersebut digunakan untuk menaikkan entalpi air sampai terbentuk uap air yang mengandung energi dalam yang disimpan dalam bentuk panas dan tekanan. Pembentukan uap pada ketel uap, bahan bakar dan udara dimasukkan ke dalam ruang dapur dan terjadi proses pembakaran. Gas – gas dari hasil pembakaran akan melewati evaporator, *superheater*, dan akhirnya akan dibuang ke atmosfer melalui cerobong asap, sedangkan pada air pengisi, setelah mengalami pemanasan pada *deaerator*, lalu dimasukkan ke dalam evaporator selanjutnya uap jenuh dipanaskan lanjut pada alat yang disebut *superheater*, akhirnya diperoleh uap panas lanjut atau superheated steam (El-Wakil, M.M, 2016). Pada gambar 3 di bawah ini merupakan proses perubahan fasa dari air menjadi uap yang digambarkan dalam bentuk diagram T-S (Dwi kusuma anton, 2011).



Gambar 3: Diagram T-S

## 2. METODE

### 2.1. Metode pengkajian efisiensi ketel uap

Untuk menghitung efektivitas efisiensi pada ketel uap (*boiler*) didapat dari perbandingan antara energi yang dipindahkan atau diserap oleh fluida kerja di dalam ketel dengan memasukan energi kimia dari bahan bakar (Djokosetyardjo, 2016).

#### 2.1.1 Nilai Kalor (Heating Value)

Nilai kalor pembakaran tertinggi atau *high heating value* adalah nilai pembakaran dimana panas pengembunan air dari proses pembakaran ikut diperhitungkan sebagai panas dari proses pembakaran. Uap air yang terbentuk dari hasil pembakaran dicairkan terlebih dahulu sehingga panas pengembunannya turut dihitung sebagai panas pembakaran yang terbentuk (Syamsir, 2010). Besarnya nilai kalor pada bahan bakar tertinggi dapat dilihat sesuai pada persamaan 1 sebagai berikut:

$$\text{HHV} = 33950C + 14420(H - O_2/8) + 9400S \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1)$$

Nilai kalor pembakaran rendah atau *low heating value* juga dikenal dengan adalah nilai pembakaran dimana panas pengembunan uap air dari hasil pembakaran tidak ikut dihitung sebagai panas dari proses pembakaran. Uap air yang terbentuk dari hasil pembakaran tidak perlu dicairkan terlebih dahulu, sehingga panas pengembunannya tidak ikut dihitung dengan panas pembakaran dari bahan bakar tersebut (Syamsir, 2010). Besarnya nilai kalor pada bahan bakar terendah berdasarkan persamaan dulong dan petit dapat dilihat dari persamaan 2 berikut (Syamsir, 2010).

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400(H_2O + 9H_2) + 9400S \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2)$$

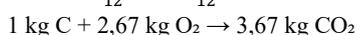
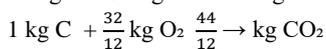
#### 2.1.2 Gas Asap

Reaksi pembakaran akan menghasilkan gas baru. Gas asap adalah senyawa-senyawa yang merupakan hasil dari reaksi pembakaran (Djokosetyardjo, 2013). Berat gas asp teoritis ( $m_{g,teo}$ ) dapat dinyatakan pada persamaan 3 sebagai berikut:

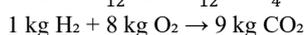
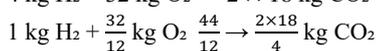
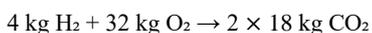
$$m_{g,teo} = m_{u,teo} + (1-A) \text{ Kg/kgBB} \quad (3)$$

Dimana, A = Kandungan abu dalam bahan bakar (*ash*)

Karbon (C) terbakar menjadi  $\text{CO}_2$  menurut persamaan 4 sebagai berikut:



Hydrogen (H) terbakar menjadi  $\text{H}_2\text{O}$  menurut persamaan 5 sebagai berikut:



Belerang (S) terbakar menjadi SO<sub>2</sub> menurut persamaan 6 sebagai berikut:



Maka untuk menghitung berat gas asap pembakaran perlu dihitung dulu masing – masing komponen gas asap tersebut:

$$\begin{aligned} \text{Berat CO}_2 &= 3,67 \text{ CO}_2 \text{ Kg/kgBB} \\ \text{Berat H}_2\text{O} &= 9 \text{ H Kg/kgBB} \\ \text{Berat SO}_2 &= 2\text{SO}_2 \text{ Kg/kgBB} \\ \text{Berat N}_2 &= (77 \% \times \mu_{\text{act}}) + \text{N}_2 \text{ Kg/kgBB} \\ \text{Berat O}_2 &= (23 \% \times \text{EA}) \mu_{\text{teo}} \text{ Kg/kgBB} \end{aligned}$$

### 2.2. Perhitungan Efisiensi Ketel Uap dengan Metode Langsung

Persamaan 7 dan 8 yang digunakan dalam menghitung efisiensi boiler dengan metode langsung (*direct*) sebagai berikut (Febianto dkk., 2019; Pravitarsari dkk., 2017)

$$\text{Efisiensi Boiler} = \frac{\text{panas pembentukan uap}}{\text{Panas uap}} \times 100 \% \quad (7)$$

atau

$$\text{Efisiensi Boiler} = \frac{W_s(h_u - h_a)}{W_{ff} \times LHV} \times 100 \% \quad (8)$$

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Baham Bakar Ketel Uap

Tabel 1 di bawah ini merupakan jumlah pemakaian bahan bakar yang digunakan pada PLTU Growth Asia. Adapun bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar padat seperti: EFB Press, Fiber, Kayu giling, Tongkol jagung, dan Sekam padi.

**Tabel 1: Jumlah Pemakaian Bahan Bakar Water Tube Boiler PLTU Growth Asia KIM 3 Medan**

Nama Bahan Bakar	Jumlah Pemakaian Bahan Bakar (KgBB)
EFB Press	46800
Fiber	124600
Kayu Giling	252000
Tongkol Jagung	13800
Sekam Padi	4500
Jumlah	441700

### 3.2. Komposisi bahan Bakar

Komposisi bahan bakar yang biasanya digunakan di PLTU Growth Asia KIM 3 Medan terdapat pada tabel 2. Unsur Nitrogen pada EFB menunjukkan yang paling tinggi dibandingkan dengan bahan bakar lainnya. Hal ini sesuai dengan penelitian (Chang, 2014; Suryadri dkk., 2021).

**Tabel 2: Komposisi Bahan Bakar PLTU GROWTH ASIA KIM 3 MEDAN**

Nama Unsur	EFB Press	Fiber	Kayu Giling	Tongkol Jagung	Sekam Padi
Carbon (C)	48,56%	49,50%	45,35%	43,42%	48,73%
Hydrogen (H)	4,38%	7,17%	6,12%	6,32%	5,91%
Nitrogen (N)	1,27%	1,21%	0,27%	0,67%	0,64%
Sulfur (S)	0,02%	0,38%	0,17%	0,07%	0,05%
Oksigen (O)	40,19%	38,57%	41,05%	44,69%	31,30%
Ash	5,58%	3,17%	7,04%	4,83%	13,37%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

Maka persentase komposisi bahan bakar adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} C &= \left[ \frac{10,60}{100} \times 48,56\% \right] + \left[ \frac{28,21}{100} \times 49,50\% \right] + \left[ \frac{57,05}{100} \times 45,35\% \right] + \left[ \frac{3,12}{100} \times 43,42\% \right] + \left[ \frac{1,02}{100} \times 48,73\% \right] \\ C &= 5,14736\% + 13,963\% + 25,872\% + 1,354\% + 0,497\% \\ C &= 46,883\% \\ H &= \left[ \frac{10,60}{100} \times 4,38\% \right] + \left[ \frac{28,21}{100} \times 7,17\% \right] + \left[ \frac{57,05}{100} \times 6,12\% \right] + \left[ \frac{3,12}{100} \times 6,32\% \right] + \left[ \frac{1,02}{100} \times 5,91\% \right] \\ H &= 0,464\% + 2,022\% + 3,491\% + 0,197\% + 0,060\% \\ H &= 6,234\% \\ N &= \left[ \frac{10,60}{100} \times 1,27\% \right] + \left[ \frac{28,21}{100} \times 1,21\% \right] + \left[ \frac{57,05}{100} \times 0,27\% \right] + \left[ \frac{3,12}{100} \times 0,67\% \right] + \left[ \frac{1,02}{100} \times 0,05\% \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N &= 0,134\% + 0,341\% + 0,154\% + 0,020\% + 0,006\% \\
 N &= 0,655\% \\
 S &= \left[ \frac{10,60}{100} \times 0,02\% \right] + \left[ \frac{28,21}{100} \times 0,38\% \right] + \left[ \frac{57,05}{100} \times 0,17\% \right] + \left[ \frac{3,12}{100} \times 0,07\% \right] + \left[ \frac{1,02}{100} \times 0,05\% \right] \\
 S &= 0,02\% + 0,107\% + 0,096\% + 0,002\% + 0,0005\% \\
 S &= 0,2075\% \\
 O_2 &= \left[ \frac{10,60}{100} \times 40,19\% \right] + \left[ \frac{28,21}{100} \times 38,57\% \right] + \left[ \frac{57,05}{100} \times 41,05\% \right] + \left[ \frac{3,12}{100} \times 44,69\% \right] + \left[ \frac{1,02}{100} \times 31,30\% \right] \\
 O_2 &= 4,260\% + 10,880\% + 23,419\% + 1,394\% + 0,319\% \\
 O_2 &= 40,272\% \\
 Ash &= \left[ \frac{10,60}{100} \times 5,58\% \right] + \left[ \frac{10,60}{100} \times 3,17\% \right] + \left[ \frac{10,60}{100} \times 7,04\% \right] + \left[ \frac{10,60}{100} \times 4,83\% \right] + \left[ \frac{10,60}{100} \times 13,37\% \right] \\
 Ash &= 0,511\% + 0,894\% + 4,016\% + 0,150\% + 0,136\% \\
 Ash &= 5,707\%
 \end{aligned}$$

### 3.3. Nilai Kalor Bahan Bakar

Data nilai kalor bahan bakar EFB press, fiber, kayu giling, tongkol jagung dan sekam padi yang diperoleh dari PLTU GROWTH ASIA adalah sebagai berikut:

Nilai *high heating value*

$$C = 46,883\% \text{ atau } 0,46883$$

$$H_2 = 6,234\% \text{ atau } 0,06234$$

$$O_2 = 40,272\% \text{ atau } 0,40272$$

$$S = 0,2075\% \text{ atau } 0,002075$$

Nilai *high heating value* dapat ditentukan berdasarkan persamaan 1:

$$HHV = 33950C + 14420\left(H - \frac{O_2}{8}\right) + 9400S \text{ [kJ/kg]}$$

$$HHV = 33950(0,46883) + 14420\left(0,06234 - \frac{0,40272}{8}\right) + 9400(0,002075)$$

$$HHV = 15916,7785 + 170,4 + 1950,53$$

$$HHV = 18037,7085 \text{ kJ/kg}$$

Nilai Kadar air (*moisture*) dalam bahan bakar di PLTU GROWTH ASIA dapat dilihat pada tabel 3 berikut ini:

**Tabel 2 :** Nilai *Moisture* Bahan Bakar PLTU GROWTH ASIA KIM 3 MEDAN

Nama Bahan Bakar	Nilai Moisture Bahan Bakar
EFB Press	48%
Fiber	40%
Kayu Giling	35%
Tongkol Jagung	45%
Sekam Padi	33%

Tabel 3 di atas merupakan nilai *Moisture* Bahan Bakar yang ada di PLTU Growth Asia KIM 3 Medan. Semakin tinggi nilai *Moisture* pada bahan bakar, maka nilai kalornya semakin rendah. Kualitas uap bergantung pada kualitas ruang bakar dan bahan bakarnya. Sementara kualitas bahan bakar tergantung pada nilai kalornya. Nilai kalor bahan bakar berbanding terbalik dengan *moisture content* (kelembaban) yang dikandungnya (Victory Sitorus et al., 2013).

Nilai Kalor Pembakaran Rendah (*Low Heating Value*)

$$LHV = HHV - 2400(M + 9H_2) + 9400S \text{ [kJ/kg]}$$

$$LHV = 18037,7085 - 2400(0,48 + 0,56106)$$

$$LHV = 18037,7085 - 2498,544$$

$$LHV = 15539,1645 \text{ kJ/kg}$$

Nilai Kalor Pembakaran Rendah *Fiber*

$$HHV = 18037,7085 \text{ kJ/kg}$$

$$H_2 = 6,234\% = 0,06234$$

$$Moisture = 40\% = 0,40$$

Maka,

$$LHV = HHV - 2400(M + 9H_2) + 9400S \text{ [kJ/kg]}$$

$$LHV = 18037,7085 - 2400(0,40 + 0,56106)$$

$$LHV = 18037,7085 - 2306,544$$

$$LHV = 15731,1645 \text{ kJ/kg}$$

Nilai Kalor Pembakaran Rendah Kayu giling

$$HHV = 18037,7085 \text{ kJ/kg}$$

$$H_2 = 6,234\% = 0,06234$$

$$\text{Moisture} = 35\% = 0,35$$

Maka,

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400 (M + 9H_2) + 9400S \text{ [kJ/kg]}$$

$$\text{LHV} = 18037,7085 - 2400 (0,35 + 0,56106)$$

$$\text{LHV} = 18037,7085 - 2186,544$$

$$\text{LHV} = 15851,1645 \text{ kJ/kg}$$

Nilai Kalor Pembakaran Rendah Tongkol Jagung

$$\text{HHV} = 18038,50725 \text{ kJ/kg}$$

$$H_2 = 6,234\% = 0,06234$$

$$\text{Moisture} = 35\% = 0,45$$

Maka,

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400 (M + 9H_2) + 9400S \text{ [kJ/kg]}$$

$$\text{LHV} = 18037,7085 - 2400 (0,45 + 0,56106)$$

$$\text{LHV} = 18037,7085 - 2426,544$$

$$\text{LHV} = 15611,1645 \text{ kJ/kg}$$

Nilai Kalor Pembakaran Rendah Sekam Padi

$$\text{HHV} = 18037,7085 \text{ kJ/kg}$$

$$H_2 = 6,234\% = 0,06234$$

$$\text{Moisture} = 35\% = 0,33$$

Maka,

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400 (M + 9H_2) + 9400S \text{ [kJ/kg]}$$

$$\text{LHV} = 18037,7085 - 2400 (0,33 + 0,56106)$$

$$\text{LHV} = 18037,7085 - 2138,544$$

$$\text{LHV} = 15899,1645 \text{ kJ/kg}$$

Maka didapat:

$$\text{LHV Rata-rata} = \frac{\text{jumlah nilai}}{\text{banyaknya bahan bakar}}$$

$$\text{LHV Rata-rata} = \frac{(15539,1645 + 15731,1645 + 15851,1645 + 15611,1645 + 15899,1645) \text{ kJ/kg}}{5}$$

$$= 15726,3645 \text{ kJ/kg}$$

### 3.4. Nilai Entalpi

Untuk mengukur berapa besar nilai entalpi yang sesungguhnya harus dilakukan pengukuran entalpi secara eksperimen yang tidak mudah. Hal ini dikarenakan, pada proses pirolisis, transfer massa terjadi dari bentuk padat ke bentuk padat, cair, dan gas, sehingga harus dilakukan pengamatan/pengukuran entalpi pada masing-masing jenis produk bahan bakar hasil pirolisis. Selain pengamatan yang dilakukan pada tiap jenis bahan bakar, entalpi yang dihasilkan selama proses juga bukan merupakan variabel konstan, namun entalpi merupakan variabel yang terikat dengan temperatur (Wijayanti, 2015). Entalpi produk hasil pirolisis sebenarnya tidak bisa diasumsikan mempunyai nilai konstan, karena selama proses pirolisis, dekomposisi termal terjadi tidak hanya secara endotermik tetapi juga secara ekstoremik (Tanoue dkk., 2007).

$$W_s = 66,245 \text{ Ton/jam} = 66345 \text{ Kg/jam}$$

$$P_u = 35 \text{ bar}$$

$$T_u = 373^\circ\text{C}$$

$$T_a = 105^\circ\text{C}$$

$$W_f = 18,083 \text{ Ton/jam} = 18083 \text{ Kg/jam}$$

$$\text{LHV} = 15726,3645 \text{ kJ/kg}$$

Nilai entalpi air umpan (ha) pada temperatur  $T_a = 105^\circ\text{C}$  diperoleh:

$$T_a = 105^\circ\text{C}$$

$$\text{Maka, didapat } h_a = 440,17 \text{ kJ/kg}$$

Nilai entalpi (hu) pada temperatur  $T_u = 373^\circ\text{C}$  dan tekanan  $P_u = 35 \text{ bar}$  untuk tekanan  $P = 30 \text{ bar}$  dan temperatur  $T = 373^\circ\text{C}$ , maka:

$$T = 300^\circ\text{C} \quad h_{300^\circ\text{C}} = 2993,5 \text{ kJ/kg}$$

$$T_u = 373^\circ\text{C} \quad h_{373^\circ\text{C}} = \dots\dots\dots \text{ kJ/kg}$$

$$T = 400^\circ\text{C} \quad h_{400^\circ\text{C}} = 3230,9 \text{ kJ/kg}$$

Maka digunakan interpolasi untuk mencari nilai entalpi hu30

$$\frac{T_u - T_{300^\circ\text{C}}}{T_{400^\circ\text{C}} - T_{300^\circ\text{C}}} = \frac{h_{u30} - h_{300^\circ\text{C}}}{h_{400^\circ\text{C}} - h_{300^\circ\text{C}}}$$

$$\frac{373^\circ\text{C} - 300^\circ\text{C}}{400^\circ\text{C} - 300^\circ\text{C}} = \frac{h_{u30} - 2993,5}{h_{400^\circ\text{C}} - 2993,5}$$

$$\frac{73^\circ\text{C}}{100^\circ\text{C}} = \frac{h_{u30} - 2993,5}{237,4}$$

$$h_{u30} = 2993,5 + 173,302$$

$$h_{u30} = 3166,802 \text{ kJ/kg}$$

Untuk tekanan P = 40 bar dan temperatur T = 373 °C diperoleh:

$$\begin{aligned} T &= 300^{\circ}\text{C} \quad h_{300^{\circ}\text{C}} = 2960,7 \text{ kJ/kg} \\ T_u &= 373^{\circ}\text{C} \quad h_{373^{\circ}\text{C}} = \dots\dots\dots \text{kJ/kg} \\ T &= 400^{\circ}\text{C} \quad h_{400^{\circ}\text{C}} = 3213,6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Maka digunakan interpolasi untuk mencari nilai entalpi hu40

$$\begin{aligned} \frac{T_u - T_{300^{\circ}\text{C}}}{T_{400^{\circ}\text{C}} - T_{300^{\circ}\text{C}}} &= \frac{h_{u40} - h_{300^{\circ}\text{C}}}{h_{400^{\circ}\text{C}} - h_{300^{\circ}\text{C}}} \\ \frac{373^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}}{400^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}} &= \frac{h_{u40} - 2960,7}{3213,6 - 2960,7} \\ \frac{73^{\circ}\text{C}}{100^{\circ}\text{C}} &= \frac{h_{u40} - 2960,7}{252,9} \end{aligned}$$

$$h_{u30} = 2960,7 + 184,617$$

$$h_{u30} = 3145,317 \text{ kJ/kg}$$

Maka, nilai untuk entalpi uap (hu) pada temperatur Tu = 373°C dan tekanan PU = 35 bar adalah:

$$\begin{aligned} \frac{P_u - P_{30}}{P_{40} - P_{30}} &= \frac{h_u - h_{30}}{h_{40} - h_{30}} \\ \frac{35 - 30}{40 - 30} &= \frac{h_u - 3166,802}{3145,317 - 3166,802} \\ \frac{5}{10} &= \frac{h_u - 3166,802}{-21,485} \end{aligned}$$

$$h_u = 3166,802 - 10,74$$

$$h_u = 3156,062 \text{ kJ/kg}$$

$$h_u = 3156,062 \text{ kJ/kg}$$

Jumlah energi panas yang masuk dan penguapan (Qin dan Qout)

Jumlah energi panas yang masuk (Qin) dapat dihitung berdasarkan persamaan 10 berikut:

$$Q_{in} = W_f \times (\text{LHV}) \text{ kJ/ jam} \tag{10}$$

$$Q_{in} = 18083 \times (15726,3645) \text{ kJ/ jam}$$

$$Q_{in} = 284379849,254 \text{ kJ/ jam}$$

Atau berdasarkan persamaan 11 sebagai berikut:

$$Q_{in} = (\text{LHV}) \text{ kJ/ kgBB} \tag{11}$$

$$Q_{in} = 284379849,254 \text{ kJ/ jam}$$

Jumlah energi panas penguapan/ evaporasi (Qout) dapat dihitung berdasarkan persamaan 12 berikut:

$$Q_{out} = W_s (h_u - h_a) \text{ kJ/ jam} \tag{12}$$

$$Q_{out} = 66245 (3156,062 - 440,17) \text{ kJ/ jam}$$

$$Q_{out} = 66245 \quad 2715,892 \text{ kJ/ jam}$$

$$Q_{out} = 179914265,54 \text{ kJ/ jam}$$

Atau berdasarkan persamaan 13 berikut:

$$Q_{out} = W_e (h_u - h_a) \text{ kJ/ kgBB} \tag{13}$$

$$Q_{out} = \frac{W_s}{W_f} (h_u - h_a) \text{ kJ/ kgBB}$$

$$Q_{out} = \frac{66245}{18083} (3156,062 - 440,17) \text{ kJ/ kgBB}$$

### 3.5. Efisiensi thermal boiler (ηboiler)

Efisiensi pada boiler adalah prestasi kerja atau tingkat unjuk kerja boiler atau ketel uap yang didapatkan dari perbandingan antara energi yang dipindahkan ke atau diserap oleh fluida kerja didalam ketel dengan masukan energi kimia dari bahan bakar. Untuk tingkat efisiensi pada boiler atau ketel uap tingkat efisiensinya berkisar antara 70% hingga 90% (Febianto dkk., 2019).

$$\text{Efisiensi boiler } (\eta_{boiler}) = \frac{\text{Panas pembentukan uap}}{\text{Panas uap}} \times 100\%$$

$$\text{Efisiensi boiler } (\eta_{boiler}) = \frac{W_s \times (h_u - h_a)}{W_f \times \text{LHV}} \times 100\%$$

$$\text{Efisiensi boiler } (\eta_{boiler}) = \frac{66245 \times (3156,062 - 440,17)}{18083 \times 15726,3645} \times 100\%$$

$$\text{Efisiensi boiler } (\eta_{boiler}) = \frac{179914265,54}{284379849,254} \times 100\%$$

$$\text{Efisiensi boiler } (\eta_{boiler}) = 63,26 \%$$

### 3.6. Pembahasan

Berdasarkan tabel 1, jumlah pemakaian bahan bakar (KgBB) yang paling banyak di PLTU Growth Asia KIM 3 Medan adalah Kayu Giling sebanyak 252000, sedangkan sekam padi terhitung pemakaian bahan bakar yang paling sedikit, yaitu sekam padi. Jumlah pemakaian bahan bakar pada EFB berkisar pada 46800 KgBB. Komposisi bahan bakar untuk masing-masing bahan bakar yang digunakan pada PLTU Growth Asia KIM 3 Medan, Fiber menghasilkan unsur Carbon yang paling besar. Hal ini mengakibatkan temperatur nyala api semakin tinggi sehingga panas yang dihasilkan juga tinggi dan mengakibatkan efisiensi pembakaran menjadi lebih tinggi juga (Ariffin dkk., 2017;

Surya Pradana dkk., 2014; Suryadri dkk., 2021). Pada Tabel 3, EFB menunjukkan nilai *Moisture* yang paling besar. Semakin tinggi nilai *moisture* pada suatu bahan bakar, maka nilai kalornya semakin rendah. Selain itu, *moisture* yang tinggi juga membutuhkan biaya bahan bakar yang lebih besar setiap jamnya (Chang, 2014; Victory Sitorus dkk., 2013). Terlepas dari efek negatif yang tidak menguntungkan akibat dari *moisture* dan oksigen yang tinggi pada EFB press, akan tetapi ada beberapa kelebihan yang didapatkan, seperti meningkatkan karakteristik aliran oli, berkontribusi pada profil temperatur yang lebih seragam di dalam silinder dan meningkatkan karakteristik pembakaran, dalam hal ini mengurangi emisi CO<sub>2</sub>. Selain itu, semakin rendah tingkat sulfur pada bahan bakar, maka manfaat kesehatan dan lingkungan juga bertambah (Chang, 2014).

#### 4. KESIMPULAN

Jumlah kebutuhan bahan bakar yang dibutuhkan oleh *water tube boiler* pada PLTU Growth Asia Kim 3 Medan adalah 10,6% EFB press, 28,21% fiber 57,05% kayu giling, 3,12% tongkol jagung dan 1,02% sekam padi. Jumlah energi panas yang masuk ke ketel uap dari hasil pembakaran bahan bakar (*Q<sub>in</sub>*) adalah 284379849,3645 kJ/jam atau 15726,3645 kJ/kgBB dengan nilai kalor pembakaran tinggi (HHV) sebesar 18037,7085 kJ/kg. Sedangkan jumlah energi yang diserap air umpan sampai terbentuknya uap dalam ketel uap/ penguapan (*Q<sub>out</sub>*) adalah 179914265,54 kJ/jam atau 9949,35937289 kJ/kgBB. Jumlah panas ini dipengaruhi oleh konsumsi bahan bakar ketel uap dan nilai kalor pembakaran rendah pada saat pembentukan uap. Nilai efisiensi thermal dari *water tube boiler* atau ketel uap pipa air adalah 63,26%. Nilai efisiensi ketel uap dipengaruhi oleh nilai kalor yang terdapat pada bahan bakar dan kandungan air pada bahan bakar beserta udara yang berlebih. Sehingga untuk memperoleh pembakaran yang sempurna diperlukan jumlah bahan bakar dan udara yang seimbang,

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan rasa syukur karena berkat dan rahmat yang maha kuasa penulis dapat menyelesaikan artikel ini, serta terima kasih yang sedalamnya karena dukungan Jurusan Teknik Mesin POLMED dalam menyelesaikan penelitian dibidang energi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ariffin, M. A., Wan Mahmood, W. M. F., Harun, Z., & Mohamed, R. (2017). Medium-scale gasification of oil palm empty fruit bunch for power generation. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 19, 1244–1252.
- Chang, S. H. (2014). An overview of empty fruit bunch from oil palm as feedstock for bio-oil production. *Biomass and Bioenergy* 62, 174–181.
- Djokosetyardjo, M J., (2016). Ketel Uap. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- EL. Wakil, M.M. (2011). Powerplant Technology. India: Wakil.
- Febianto, I., Arsyad, M. I., Lubis, G. S., Program, Mesin, S. T., & Mesin, J. T. (2019). Studi Efisiensi Termal *Boiler* Menggunakan Direct Method Pada Pltu Sungai Ringin Di Kabupaten Sintang.
- Pravitasari, Y., Malino, M. B., Mara, N., Fisika, J., Matematika, F., Ilmu, D., Alam, P., Tanjungpura, U., Prof, J., Nawawi, H., Matematika, J., & Pengetahuan, I. (2017). Analisis Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Langsung. *Prisma Fisika* 5, 9–12.
- Surya Pradana, Y., Kurniawan, A., & Budiman, A. (2014). *Bio-oil Derived from Indonesian Oil Palm Empty Fruit Bunch (EFB) using Middle-scale Slow Pyrolysis*. *Conference: International Oil Palm Conference 201* diakses pada Agustus 2022 dari <https://www.researchgate.net/publication/315483102>
- Suryadri, H., Sumantri, S. P., Nazarudin, D., Studi, P., Kimia, T., Sains, F., Teknologi, D., & Jambi, U. (2021). Potensi Tkks Sebagai Bahan Baku Bioetanol Dan Dimetil Eter Melalui Proses Gasifikasi. *Perspektif, Rev.Pen. Tan. Industri* 20, 106–120.
- Syamsir, M. (2010). Pesawat-Pesawat Konversi I (Ketel Uap). Jakarta: CV Rajawali.
- Tanoue, K. I., Hinauchi, T., Oo, T., Nishimura, T., Taniguchi, M., & Sasauchi, K. I. (2007). Modeling of heterogeneous chemical reactions caused in pyrolysis of biomass particles. *Advanced Powder Technology* 18, 825–840.
- Victory Sitorus, Y., Natsir Amin, I. M., & Surya Tarmizi Kasim, I. (2013). Pengaruh Moisture Content EFB Terhadap Kurva Input Output PLTBs. *Jurnal Singuda Ensikom* 3, 88-93.
- Wijayanti, W. (2014). Pengidentifikasian Entalpi Bahan Bakar Padat (*Char*) dan Cair (*Tar*) Hasil Proses Pirolisis Biomasa. *Rotor* 7, 1-6.
- Zulfikar, M., Prayoga, E., & Dalimi, R. (2018). Disain Dan Analisa Pembangkitan Listrik Berbahan Bakar Tandan Kosong Kelapa Sawit Seminar Nasional Sains dan Teknologi 1, 1-9.