

Analisis Penggunaan Bahan Bakar Padat Terhadap Kebutuhan Udara Pembakaran di Dalam *Furnace* pada Boiler dengan Kapasitas 200 Ton/Jam

Rini Swandi Sitorus^a, Angga Bahri Pratama^{a*}, Jandri Fan HT Saragi^b, Sahat^b, Eka Putra Dairi Boangmanalu^c

^a 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

^b Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

^c Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima 28 November 2025

Diterima setelah direvisi 4 Desember 2025

Disetujui 5 Desember 2025

Kata kunci:

Boiler

Moisture

Furnace

Abstract-The boiler functions to heat water using heat from fuel combustion. Three fuel variables were tested, namely shells, palm caul, and eucalyptus bark. The testing procedure was divided into three stages: fuel calorific value testing, fuel moisture testing, and air requirements in the furnace (combustion chamber). This analysis used the observation method. The test results showed that the calorific value of eucalyptus bark fuel was 10,960.25 kCal/kg, the calorific value of shell fuel was 16,747.50 kCal/kg, and the calorific value of palm caul fuel was 7,978.49 kCal/kg. The results of the moisture and air requirement tests in the eucalyptus bark fuel furnace were 10.71% and 270,455.77 kg/hour, shell fuel had a value of 16.53% and 393,423.92 kg/hour, and palm caul fuel had a value of 36.43% and 210,401.56 kg/hour. Of the three fuel variables tested, the test results showed that shell fuel had a good fuel calorific value and moisture (water content) for combustion compared to the other two fuels.

Intisari-Boiler berfungsi untuk memanaskan air dengan menggunakan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Variabel bahan bakar yang diuji ada tiga yaitu cangkang, *palm caul* dan kulit kayu *eucalyptus*. Prosedur pengujian dibagi menjadi tiga tahap, yaitu pengujian nilai kalor bahan bakar, uji *moisture* bahan bakar, dan kebutuhan udara didalam *furnance* (ruang bakar). Analisis ini menggunakan metode observasi, Hasil pengujian nilai kalor bahan bakar kulit kayu *eucalyptus* adalah 10.960,25 kKkal/kg, nilai kalor bahan bakar cangkang diperoleh nilai sebesar 16.747,50 kKkal/kg, dan nilai kalor bahan bakar palm caul sebesar 7.978,49 kKkal/kg. Hasil pengujian *moisture* dan kebutuhan udara didalam *furnance* bahan bakar kulit kayu *eucalyptus* adalah 10,71% dan 270.455,77 kg/jam, bahan bakar cangkang memiliki nilai sebesar 16,53% dan 393.423,92 kg/jam, serta bahan bakar *palm caul* memiliki nilai sebesar 36,43 % dan 210.401,56 kg/jam. Dari ketiga variabel bahan bakar yang diuji didapatkan hasil pengujian pada bahan bakar cangkang yang memiliki nilai kalor bahan bakar dan *moisture* (kadar air) yang baik untuk pembakaran dibandingkan dengan kedua bahan bakar lainnya.

1. Pendahuluan

Boiler adalah suatu bejana tertutup bertekanan yang berfungsi untuk memanaskan air dengan menggunakan panas dari hasil pembakaran bahan bakar, sehingga air menjadi uap yang mempunyai temperatur dan tekanan tinggi [1]. Mengingat semakin banyaknya penggunaan bahan bakar, mahalnya harga bahan bakar dan ketersediaan bahan bakar yang semakin menipis, banyak pabrik atau perusahaan yang mencoba menerapkan penggunaan bahan bakar alternatif untuk bahan bakar boiler, salah satu contohnya PT. ABC yang menggunakan bahan bakar padat yaitu serabut (*palm caul*), cangkang (*palm shell*) dan kulit kayu (*bark*).

Cangkang, *palm caul* dan kulit kayu *eucalyptus* merupakan limbah padat yang di hasilkan oleh pabrik kelapa sawit yang dapat di dimanfaatkan sebagai biomassa untuk memenuhi kebutuhan energi dalam pengolahan pulp melalui pembakaran langsung dari cangkang, palm caul dan kulit kayu eucalyptus [2]. Energi yang di hasilkan bahan bakar padat yang di teliti ialah energi panas yang akan di konversikan menjadi steam panas yang bertekanan. Steam yang dihasilkan oleh energi panas akan ditransfer ke alat turbin untuk menghasilkan energi listrik melalui generator [3].

Cangkang dan serabut (*palm caul*) memiliki beberapa kandungan unsur yaitu karbon (C), hidrogen, oksigen (O₂), nitrogen (N₂), abu (A), sedangkan kulit kayu *eucalyptus* memiliki kandungan yaitu *lignin*,

* Corresponding Author:

E-mail: anggabahri@polmed.ac.id (Angga Bahri Pratama)

karbon, dan selulosa. Pada bahan bakar cangkang, *palm caul* dan kulit kayu *eucalyptus* memiliki nilai kalor dan kandungan *moisture* yang berbeda-beda di mana nilai kalor cangkang ialah 4500-5000 kkal/kg dengan *moisture* 22%, kulit kayu ialah 3000-3500 kkal/kg dengan *moisture* 62% dan *palm caul* ialah 3500-4500 kkal/kg dengan *moisture* 40%, dengan jumlah kalor yang berbeda maka *steam* yang dihasilkan setiap bahan bakar akan berbeda, di mana nilai kalor tertinggi akan menghasilkan energi panas yang besar, begitu juga dengan kandungan *moisture* bahan bakar yang dapat mempengaruhi *steam*, jika *moisture* pada bahan rendah maka *steam* yang di hasilkan tinggi dan sebaliknya jika *moisture* pada bahan bakar tinggi maka *steam* yang dihasilkan rendah [2].

1.1 Pengertian Bahan Bakar

Bahan bakar adalah material yang digunakan untuk menghasilkan energi panas melalui proses pembakaran, yang kemudian digunakan untuk memanaskan air atau cairan lain hingga menjadi uap. Uap ini kemudian digunakan untuk memanaskan air atau cairan lain hingga menjadi uap. Uap ini kemudian di gunakan untuk berbagai keperluan industri, seperti pembangkit listrik, pemanasan, dan proses manufaktur. Bahan bakar yang di gunakan pada ruang bakar boiler pada umumnya di klasifikasikan sebagai berikut; (1) bahan bakar kulit kayu, (2) bahan bakar serabut, (3) bahan bakar cangkang [1].

Bahan bakar hanya dapat terbakar bila sudah cukup panas. Proses pembakaran merupakan proses kimia antara bahan bakar, udara dan panas. Pengetahuan mengenai sifat bahan bakar membantu dalam memilih bahan bakar yang benar untuk keperluan yang benar dan untuk penggunaan bahan bakar yang efisien. Uji laboratorium biasanya digunakan untuk mengkaji sifat dan kualitas bahan bakar [3].

1.2 Klasifikasi Bahan Bakar

Serabut (*Palm Caul*) dan Cangkang Sawit (*Palm Shell*)

Cangkang dan *palm caul* merupakan limbah padat yang dihasilkan oleh pabrik kelapa sawit yang dapat dimanfaatkan sebagai biomassa untuk memenuhi kebutuhan energy dalam pengolahan minyak kelapa sawit melalui pembakaran langsung cangkang dan *palm caul*. *Palm caul* adalah bahan bakar padat yang terbentuk seperti rambut, serabut ini terdapat dibagian kedua buah kelapa sawit setelah kulit buah kelapa sawit, didalam serabut dan daging buah sawitlah minyak *crud palm oil (CPO)* terkandung. Sedangkan cangkang 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. Cangkang dan *palm caul* tersebut memiliki kandungan nilai kalor yang cukup yaitu 4500-5000 kkal/kg dan 3500-4500 kkal/kg. Adapun alasan mengapa digunakan cangkang dan *palm caul* sebagai bahan bakar adalah; (1) Bahan bakar cangkang dan *palm caul* tersedia dan mudah diperoleh dipabrik, (2) Cangkang dan *palm caul* merupakan limbah dari pabrik kelapa sawit apabila tidak digunakan, (3) Nilai kalaor bahan bakar memenuhi persyaratan untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan, (4) Harga lebih ekonomis [2].

Kulit Kayu *Eucalyptus*

Kulit kayu *eucalyptus*, memiliki manfaat yang dapat menguntungkan suatu pabrik, karena kulit kayu ini dapat digunakan sebagai kompos dan bahan bakar untuk

memproduksi uap pada proses pengolahan suatu pabrik [4]. Kulit kayu *eucalyptus* memiliki kandungan karbon yang sanggup untuk memenuhi kebutuhan enrgi panas yang diperlukan untuk memproduksi *steam* [4]. Biomassa (bahan bakar hayati/nabati) merupakan produk fotosintesis, yaitu butir-butir hijau daun yang di hasilkan klorofil yang bekerja sebagai semacam sel-sel surya, menyerap energi matahari dan mengkonversi karbon dioksida menjadi suatu senyawa karbon, hydrogen, dan oksigen [5]. Senyawa ini dapat di pandang sebagai suatu penyerapan energi yang dapat dikonversi menjadi suatu produk lain, misalnya arang/karbon. Kulit kayu *eucalyptus* memiliki jumlah kalor sebanyak 3000-3500 kkal/kg, akan tetapi kandungan air kulit kayu ini lebih besar dibandingkan dengan *palm caul* dan cangkang sawit [6]. Perlu di teliti kecukupan ketersediaan bahan baku kulit kayu *eucalyptus*, cangkang sawit, *sludge* dan *palm caul* sebagai bahan bakar boiler dan efisiensinya untuk menjaga kinerja boiler tersebut.

1.3 Penentuan Moisture Pada Bahan Bakar

Moisture dalam bahan bakar adalah kadar air yang terkandung di dalamnya. Kehadiran *moisture* dalam bahan bakar bisa dari beberapa sumber, seperti udara yang terperangkap di dalam tanki penyimpanan atau dari proses pengangkutan dan penyimpanan yang tidak tertutup dengan baik. Setiap bahan bakar memiliki nilai *moisture* yang berbeda-beda yaitu: bahan bakar cangkang: 22%, *palm caul*: 40% dan kulit kayu *eucalyptus*: 62%. Kadar *moisture* dalam ketiga bahan bakar tersebut minimal 25-30% [7]. Kadar *moisture* yang tinggi dalam bahan bakar dapat menyebabkan beberapa masalah, antara lain korosi, penurunan kualitas bahan bakar, dan terjadinya pengendapan dalam sistem bahan bakar.

1.4 Proses Pembakaran

Pembakaran merupakan oksidasi cepat bahan bakar disertai dengan produksi panas. pembakaran sempurna bahan bakar terjadinya jika ada pasokan oksigen yang cukup. Dalam setiap bahan bakar, unsur yang mudah terbakar adalah karbon, hydrogen dan sulfur. Dalam proses suatu pembakaran jika tidak ada cukup oksigen, maka karbon tidak akan terbakar seluruhnya, contohnya sebagai berikut: $C + O_2 \rightarrow CO_2$ (carbon terbakar sempurna) $2C + O_2 \rightarrow 2CO_2$ (carbon tidak terbakar sempurna). Tujuan dari pembakaran yang baik adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar [8].

1.5 Proses Pengolahan Bahan Bakar Padat

Bark Pile merupakan tempat penyimpanan bahan bakar yang bersifat sementara, kemudian akan masuk ke *bark strocker* sebagai tempat penyimpanan sementara sebelum ditransfer ke *conveyor*, kemudian bahan bakar ditransfer menggunakan *conveyor* dan akan melewati *magnetic seperator* yang berfungsi untuk memisahkan besi-besi yang tercampur pada bahan bakar, kemudian bahan bakar akan masuk ke *screen* untuk pemisahan benda padat yang berukuran besar, kemudian akan ditransfer menggunakan *conveyor*, kemudian bahan bakar akan dimasukkan ke *bark silo 1* dan *bark silo 2* sebagai tempat penyimpanan sebelum terjadinya pembakaran, dan kemudian akan dijatuhkan ke ruang dapur pembakaran (*furnace*).

2. Metodologi

2.1 Alat dan Bahan

a) Multi Fuel Boiler

Multi Fuel Boiler jenis Water Tube yang ada pada PT. ABC, didesain untuk menghasilkan uap 200 ton/jam pada tekanan 84 bar, dan temperatur 490°C. Secara operasional *Multi Fuel Boiler* beroperasi pada kapasitas uap 140 ton/jam pada tekanan 62 – 65 bar dan temperatur 450°C. Adapun spesifikasi dari *Multi Fuel Boiler* bisa dilihat pada tabel 1 di bawah ini;

Tabel 1. Spesifikasi *Multi Fuel Boiler*

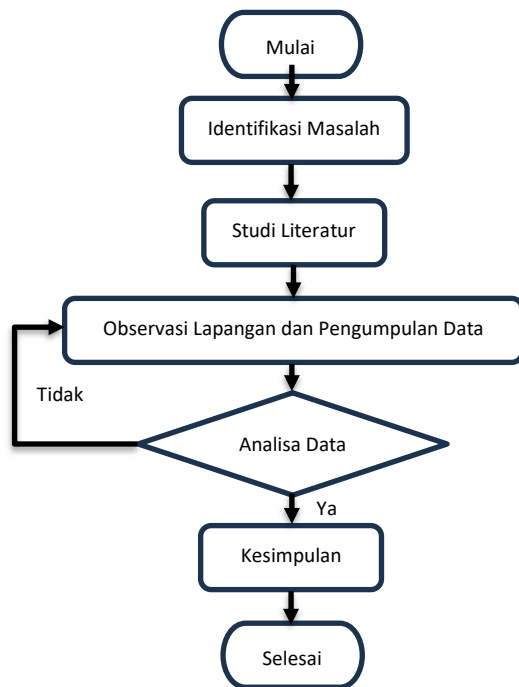
1.	Supplier	Outokumpu
2.	Capacity	200 Ton/Jam Steam
3.	Steam Pressure	84 bars
	Design Current	60 bars
4.	Steam Temperature	460-480°C
	Design Current	460°C
5.	Temperature keluar steam	490°C
6.	Temperature air masuk	135°C
7.	Bahan Bakar	Cangkang Palm Caul Kulit Kayu <i>Eucalyptus</i>

Sumber: PT. ABC

b) Bahan

Adapun bahan yang digunakan selama penelitian ini adalah serabut (*palm caul*), cangkang, kulit kayu *eucalyptus*, dan data *loogsheet*.

2.2 Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Identifikasi masalah merupakan langkah awal yang sangat penting dalam suatu proses penelitian. Peneliti melakukan identifikasi masalah dengan menjelaskan apa masalah yang ditemukan dan bagaimana masalah tersebut dapat diukur dan dihubungkan dengan prosedur penelitian.

Selanjutnya adalah studi literatur. Metode ini merupakan metode penelitian dengan cara membaca berbagai kepustakaan untuk mengetahui dan mendapatkan teori tentang data yang terkait dengan masalah yang akan dibahas. Setelah itu melakukan observasi lapangan. Metode ini merupakan metode penelitian yang dilakukan secara langsung pada objek penelitian guna mendapatkan data yang dibutuhkan. Pengumpulan data merupakan kegiatan mengumpulkan data dan di lapangan yang akan digunakan untuk menjawab permasalahan penelitian. Analisis data adalah proses mempelajari dan mengolah data untuk mengidentifikasi pola, hubungan dan informasi penting yang terkandung didalamnya. Tujuannya adalah untuk mendapatkan pemahaman yang lebih dalam tentang data yang dianalisis dan mengambil keputusan berdasarkan informasi yang ditemukan [9]. Langkah terakhir adalah menarik kesimpulan dan saran. Kesimpulan dan saran merupakan bagian penutup dari suatu penelitian yang dikerjakan. Pada bagian kesimpulan dijelaskan secara singkat mengenai hasil-hasil penelitian yang telah dilaksanakan.

2.3 Analisa Data

Setelah semua data yang dibutuhkan terkumpul selanjutnya menghitung perbandingan terhadap variabel sebagai berikut:

a) Menghitung kandungan moisture pada bahan bakar

$$M = \frac{W_{\text{basah}} - W_{\text{kering}}}{W_{\text{basah}}} \times 100 \quad (1)$$

b) Menghitung nilai kalor bahan bakar

$$\text{HHV} = (33.950 \times C) + 144.200 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9.400 \times S \text{ kJ/kg} \quad (2)$$

c)

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2411 (M + 9H_2) \quad (3)$$

d) Menghitung nilai kebutuhan udara furnace

$$U_{\text{act total}} = U_{\text{act}} \times W_f \quad (4)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Perhitungan Moisture Pada Bahan Bakar

Tabel 2. Moisture Dari Bahan Bakar

Bahan bakar padat	Berat basah (W_{basah})	Berat kering (W_{kering})
Palm Caul	0,7286	0,3643
Cangkang	0,6052	0,1653
Kulit Kayu <i>Eucalyptus</i>	0,5952	0,1071

Sumber: PT. ABC

Pada Bahan Bakar Palm Caul

$$M = \frac{W_{\text{basah}} - W_{\text{kering}}}{W_{\text{basah}}} \times 100$$

$$M = \frac{0,7286 - 0,3643}{0,7286} \times 100$$

$$M = 0,2286 \text{ kg}$$

Pada Bahan Bakar Cangkang

$$M = \frac{W_{\text{basah}} - W_{\text{kering}}}{W_{\text{basah}}} \times 100$$

$$M = \frac{0,6052 - 0,1653}{0,6052} \times 100$$

$$M = 0,3320 \text{ kg}$$

Pada Bahan Bakar Kulit Kayu Eucalyptus

$$M = \frac{W_{\text{basah}} - W_{\text{kering}}}{W_{\text{basah}}} \times 100$$

$$M = \frac{0,5952 - 0,1071}{0,5952} \times 100$$

$$M = 0,4152 \text{ kg}$$

3.2 Perhitungan Nilai Kalor Tinggi (HHV) Dan Rendah (LHV)

Nilai Kalor Pembakaran Tinggi (HHV) Dan Rendah (LHV) Pada Bahan Bakar Cangkang, Fiber Sawit, Kulit Kayu Eucalyptus.

Nilai Kalor Pembakaran Pada Bahan Bakar Cangkang

a) Nilai Kalor Pembakaran Tinggi (HHV) Pada Bahan Bakar Cangkang

$$\text{HHV} = (33.950 \times C) + 144.200 (H_2 - O_2/8) + 9.400 \times S \text{ kJ/kg}$$

$$\text{HHV} = (33.950 \times 43,59\%) + 144.200 (5,24\% - \frac{31,21\%}{8}) + 9.400$$

$$= 1.4,2 + 144.200(0,0524 - 0,0301) + 17,86$$

$$= 1.4798,2805 + 144.200(0,01339) + 17,86$$

$$= 1.4798,2805 + 1.930,838 + 17,86$$

$$= 16.747,503 \text{ KJ/Kg}$$

b) Nilai Kalor Pembakaran Rendah (LHV) Pada Bahan Bakar Cangkang

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2411 (M + 9H_2)$$

$$= 16.750,898 - 2.411 (16,53\% + 9(5,24\%))$$

$$= 16.750,898 - 2.411 (0,1653 + 9(0,0524))$$

$$= 16.750,898 - 2.411 (0,6369)$$

$$= 16.747,503 - 153,5565$$

$$= 16.593,9465 \text{ KJ/Kg}$$

Nilai Kalor Pembakaran Pada Bahan Bakar Palm Caul

a) Nilai Kalor Pembakaran Tinggi (HHV) Pada Bahan Bakar Palm Caul

$$\text{HHV} = (33.950 \times C) + 144.200 (H_2 - O_2/8) + 9.400 \times S \text{ kJ/kg}$$

$$\text{HHV} = (33.950 \times 23,1\%) + 144.200 (3,84 - \frac{30,14\%}{8}) + 9.400 (0,22\%) \text{ kJ/kg}$$

$$= 7.842,45 + 144.200 (0,0384 - 0,0376) + 20,68$$

$$= 7.842,45 + 115,36 + 20,68$$

$$= 7.978,49 \text{ KJ/Kg}$$

b) Nilai Kalor Pembakaran Rendah (LHV) Pada Bahan Bakar Palm Caul

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2411 (M + 9H_2)$$

$$= 7.978,49 - 2.411 (36,43\% + 9(3,84\%))$$

$$= 7.978,49 - 2.411 (0,7099)$$

$$= 7.978,49 - 1.711,5689$$

$$= 6.266,9211 \text{ KJ/Kg}$$

Nilai Kalor Pembakaran Pada Bahan Bakar Kulit Kayu Eucalyptus

a) Nilai Kalor Pembakaran Tinggi (HHV) Pada Bahan Bakar Kulit Kayu Eucalyptus

$$\text{HHV} = (33.950 \times C) + 144.200 (H_2 - O_2/8) + 9.400 \times S \text{ kJ/kg}$$

$$\text{HHV} = (33.950 \times 29,82\%) + 144.200 (6,10\% - \frac{44,16\%}{8}) + 9.400 (0) \text{ kJ/kg}$$

$$= 10.123,89 + 144.200 (0,0058)$$

$$= 10.123,89 + 836,36$$

$$= 10.960,25 \text{ KJ/Kg}$$

b) Nilai Kalor Pembakaran Rendah (LHV) Pada Bahan Bakar Kulit Kayu Eucalyptus

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2411 (M + 9H_2)$$

$$= 10.960,25 - 2411 (10,71\% + 9(6,10\%))$$

$$= 10.960,25 - 2411(0,6561)$$

$$= 10.960,25 - 1.581,8571$$

$$= 9.378,3929 \text{ KJ/Kg}$$

3.3 Perhitungan Nilai Panas yang Diserap Furnace

Palm Caul

$$Q_f = W_f \times \text{LHV}$$

$$= 66.197,3216 \times 6.266,9211$$

$$= 414.853.391 \text{ kJ/kg}$$

Cangkang

$$Q_f = W_f \times \text{LHV}$$

$$= 66.197,3216 \times 16.593,9465$$

$$= 1,0984 \text{ kJ/kg}$$

Kulit Kayu Eucalyptus

$$Q_f = W_f \times \text{LHV}$$

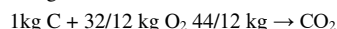
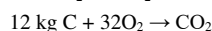
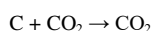
$$= 66.197,3216 \times 9.378,3929$$

$$= 620.824.491 \text{ kJ/kg}$$

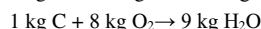
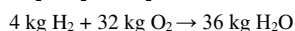
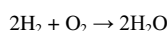
3.4 Perhitungan Kebutuhan Udara Yang Dihasilkan Ke Furnace

a) Palm Caul

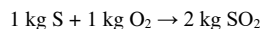
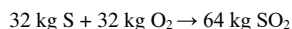
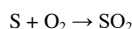
Dalam 1 kg bahan bakar palm caul mengandung unsur carbon: 0,231 kg, Hidrogen: 0,0384 kg dan Sulfur: 0,0022 kg. Komposisi kimia yang bereaksi dengan O₂ pada pembakaran sempurna yaitu C, H₂ dan S dengan reaksi sebagai berikut:



Pembakaran setiap 1kg C membutuhkan 32/12 kg O₂ atau 0,231 × 32/12, maka O₂ yang dibutuhkan = 0,614 kg/kg BB



Pembakaran setiap 1 kg H₂ membutuhkan 8 kg O₂ atau 0,0384 × 8, maka O₂ yang dibutuhkan = 0,3074 kg/kg BB



Pembakaran setiap 1 kg S membutuhkan 1 kg O₂ atau 0,0022 × 1, maka O₂ yang dibutuhkan = 0,0022 kg/kg BB

Jumlah O₂ yang terkandung dalam bahan bakar palm caul yaitu 0,3014, sehingga jumlah oksigen yang di butuhkan pada proses pembakaran yaitu:

$$M_{O_2} = 0,614 + 0,3074 - 0,3014$$

$$= 0,62 \text{ kg/kg BB}$$

Kebutuhan udara teoritis untuk 1 kg bahan bakar palm caul, yaitu;

$$U_{\text{teo}} = 100/23,1 \times M_{O_2}$$

$$U_{\text{teo}} = 100/23,1 \times 0,62 \text{ kg}$$

$$= 2,6784 \text{ kg/kg BB}$$

Supaya terjadi pembakaran sempurna maka di tambah EA (Excess Air) 50% maka udara aktual yaitu:

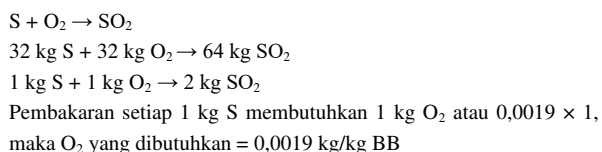
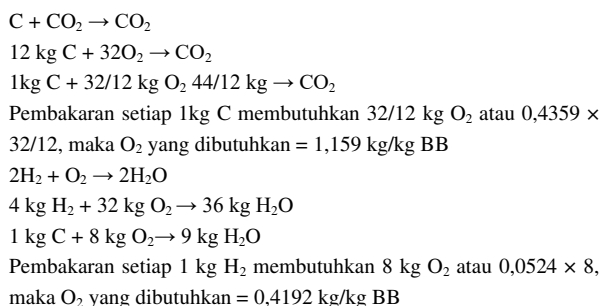
$$\begin{aligned}U_{act} &= U_{teo} \times 1 + EA \\&= 2,6784 \times 1 + 0,5 \\&= 3,1784 \text{ kg/kg BB}\end{aligned}$$

Maka jumlah kebutuhan udara yang dimasukkan ke furnace, yaitu:

$$\begin{aligned}U_{acttotal} &= U_{act} \times W_f \\&= 3,1784 \times 66.197,3216 \\&= 210.401,56 \text{ kg/jam}\end{aligned}$$

b) Cangkang

Dalam 1 kg bahan bakar cangkang mengandung unsur carbon: 0,4359 kg, Hidrogen: 0,0524 kg dan Sulfur: 0,0019 kg. Komposisi kimia yang bereaksi dengan O₂ pada pembakaran sempurna yaitu C, H₂ dan S dengan reaksi sebagai berikut:



Jumlah O₂ yang terkandung dalam bahan bakar cangkang yaitu 0,3121, sehingga jumlah oksigen yang di butuhkan pada proses pembakaran yaitu:

$$\begin{aligned}M_{O_2} &= 1,159 + 0,4192 - 0,3121 \\&= 1,26 \text{ kg/kg BB}\end{aligned}$$

Kebutuhan udara teoritis untuk 1 kg bahan bakar cangkang, yaitu:

$$\begin{aligned}U_{teo} &= 100/23,1 \times M_{O_2} \\U_{teo} &= 100 \text{ } 23,1 \times 1,26 \text{ kg} \\&= 5,4432 \text{ kg/kg BB}\end{aligned}$$

Supaya terjadi pembakaran sempurna maka di tambah EA (Excess Air) 50% maka udara aktual yaitu:

$$\begin{aligned}U_{act} &= U_{teo} \times 1 + EA \\&= 5,4432 \times 1 + 0,5 \\&= 5,9432 \text{ kg/kg BB}\end{aligned}$$

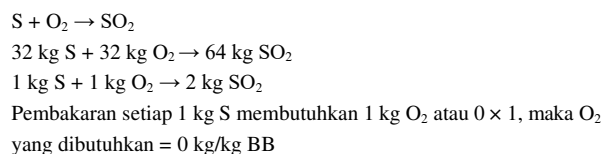
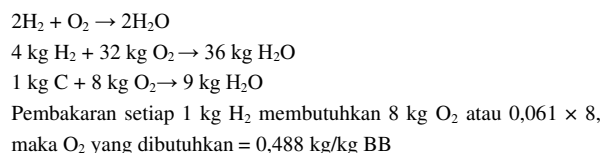
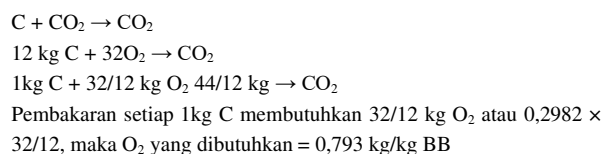
Maka jumlah kebutuhan udara yang dimasukkan ke furnace, yaitu:

$$\begin{aligned}U_{acttotal} &= U_{act} \times W_f \\&= 5,9432 \times 66.197,3216 \\&= 393.423,92 \text{ kg/jam}\end{aligned}$$

c) Kulit Kayu Eucalyptus

Dalam 1 kg bahan bakar kulit kayu eucalyptus mengandung unsur carbon: 0,2982 kg, Hidrogen: 0,061 kg dan Sulfur: 0 kg. Komposisi

kimia yang bereaksi dengan O₂ pada pembakaran sempurna yaitu C, H₂ dan S dengan reaksi sebagai berikut:



Jumlah O₂ yang terkandung dalam bahan bakar kulit kayu eucalyptus yaitu 0,4416, sehingga jumlah oksigen yang di butuhkan pada proses pembakaran yaitu:

$$\begin{aligned}M_{O_2} &= 0,793 + 0,488 - 0,4416 \\&= 0,83 \text{ kg/kg BB}\end{aligned}$$

Kebutuhan udara teoritis untuk 1 kg bahan bakar kulit kayu eucalyptus, yaitu:

$$\begin{aligned}U_{teo} &= 100/23,1 \times M_{O_2} \\U_{teo} &= 100 \text{ } 23,1 \times 0,83 \text{ kg} \\&= 3,5856 \text{ kg/kg BB}\end{aligned}$$

Supaya terjadi pembakaran sempurna maka di tambah EA (Excess Air) 50% maka udara aktual yaitu:

$$\begin{aligned}U_{act} &= U_{teo} \times 1 + EA \\&= 3,5856 \times 1 + 0,5 \\&= 4,0856 \text{ kg/kg BB}\end{aligned}$$

Maka jumlah kebutuhan udara yang di masukkan ke furnace, yaitu:

$$\begin{aligned}U_{acttotal} &= U_{act} \times W_f \\&= 4,0856 \times 66.197,3216 \\&= 270.455,77 \text{ kg/jam}\end{aligned}$$

Tabel 3. Hasil Analisa Data

Jenis Bahan Bakar	Moisture Pada Saat Kering (%)	HHV (kKal /kg)	LHV (kKal /kg)	Panas Yang Diserap Furnace (kJ/kg)	Kebutuhan Udara Furnace (kg/jam)
<i>Palm Caul</i>	36,43	7.978,49	6.266,92	414.853.391	210.401,56
Cangkang	16,53	16.747,50	16.593,94	1.0987	393.423,92
Kulit Kayu <i>Eucalyptus</i>	10,71	10.960,25	9.378,39	620.824.491	270.455,77

Bahan bakar padat yang digunakan yaitu cangkang, palm caul dan kulit kayu eucalyptus merupakan limbah hasil pengolahan kelapa sawit dan pulp yang dapat bermanfaat sebagai bahan bakar pada unit boiler [10]. Pada setiap bahan bakar ini memiliki masing-masing nilai kalor, jumlah kandungan kadar air dan jumlah kebutuhan udara dalam furnace seperti pada tabel 3 Dari hasil nilai kalor HHV dan LHV pada ke tiga bahan bakar ini, cangkang sawit merupakan limbah yang memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dan diikuti pada limbah kulit kayu eucalyptus dan palm caul. Cangkang sawit memiliki jumlah kalor yang tinggi karna limbah ini memiliki unsur karbon yang tinggi diantara limbah kulit kayu eucalyptus dan palm caul. Cangkang memiliki jumlah karbon yang lebih tinggi, sehingga menghasilkan panas yang tinggi dan efisien sebagai bahan bakar diantara ketiga bahan bakar ini [11].

Pada presentase komposisi bahan bakar yang dimixing berdasarkan SOP hanya memakai bahan bakar cangkang dan palm caul saja sedangkan kulit kayu eucalyptus memiliki kadar air yang rendah, nilai kalor yang tinggi dan kebutuhan udara yang rendah dibandingkan bahan bakar palm caul, karena palm caul lebih mudah didapat dan biayanya lebih murah dibandingkan kulit kayu eucalyptus [10]. Penggunaan bahan bakar yang lebih mudah didapat dan lebih murah bisa mengurangi biaya operasional dan ketersediaan kulit kayu tidak tersedia dalam jumlah yang cukup atau konsisten untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar boiler [10]. Jika pasokan kulit kayu tidak stabil, ini bisa mempengaruhi operasi boiler [7]. Pada proses pemixingan bahan bakar presentase palm caul lebih banyak dibandingkan cangkang karena palm caul memiliki karakteristik pembakaran yang baik ketika dicampur dengan bahan bakar cangkang. Pencampuran ini bisa membantu menyeimbangkan efisiensi pembakaran keseluruhan [8].

4. Simpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Jumlah kandungan nilai kalor tertinggi (HHV) bahan bakar cangkang sebesar 16.747,50 kKal/kg dan nilai kalor tertinggi (HHV) dari palm caul sebesar 7.978,49 kKal/kg. Jadi sebaiknya untuk pembakaran digunakan bahan bakar cangkang karena memiliki nilai kalori sebesar 16.747,50 kKal/kg.
- Nilai kandungan *moisture* saat kondisi kering tertinggi terdapat pada bahan bakar *palm caul* yaitu 36,43% dan kandungan *moisture* terendah pada bahan bakar kulit kayu *eucalyptus* sebesar 10,71 %, untuk terjadinya pembakaran dibutuhkan nilai kadar air yang rendah dan nilai kalor yang tinggi, kadar air terendah terdapat pada bahan bakar kulit kayu, sedangkan bahan bakar cangkang memiliki nilai *moisture* 16,53% dan memiliki nilai kalor tertinggi 16.747,50 kKal/kg, jadi bahan bakar cangkang lebih bagus digunakan untuk pembakaran yang lebih baik.
- Kebutuhan udara pada bahan bakar tertinggi adalah cangkang sebesar 393.423,92 kg/jam, kemudian kulit kayu *eucalyptus* sebesar 270.455,77 kg/jam, dan kebutuhan udara untuk bahan bakar *palm caul* sebesar 210.401,56 kg/jam.

Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terimakasih banyak kepada rekan-rekan peneliti yang sudah terlibat dalam penelitian ini.

Referensi

- [1] T. Ginanjar, Junaidi, G. S. Lubis, and Y. M. Simanjuntak, "Analisa Kebutuhan Bahan Bakar Boiler dengan Melakukan Uji Kalori pada Pabrik Kelapa Sawit PT. Sentosa Prima Agro," *J. Teknol. Rekayasa Tek. Mesin*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2019.
- [2] O. Hikmawan, M. Naufa, and L. H. Simarmata, "Pemanfaatan Cangkang Dan Serat Kelapa Sawit Sebagai Bahan Bakar Boiler," *J. Tek. dan Teknol.*, pp. 18–26, 2020.
- [3] Ika Yuliyani, Maridjo, Muhammad Abdul M, "Analisis sistem ruang bakar boiler jenis fluidized bed combustion untuk PLTU kapasitas 8 MW," *J. Tek. Energi*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2019, doi: 10.35313/energi.v9i1.1638.
- [4] H. M. R. Awaliyan and E. Rosamah, "KARAKTERISTIK TANIN DARI EKSTRAK KULIT KAYU LEDA (*Eucalyptus deglupta* Blume.)," vol. 1, no. 1, pp. 16–28, 2017.
- [5] J. Malik and I. Iskandar, "EFEKTIVITAS BEBERAPA PERLAUKUAN TERHADAP KAYU KERUING BERMINYAK SEBAGAI BAHAN KAYU LAMINA," vol. 2, no. 1998, pp. 9–14, 2009.
- [6] S. Mutiar, A. Kasim, E. Emriadi, and A. Asben, "Studi awal tanin dari kulit kayu *Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth. dari hutan tanaman industri untuk bahan penyamak kulit," *Maj. Kulit, Karet, dan Plast.*, vol. 34, no. 2, p. 41, 2019, doi: 10.20543/mktp.v34i2.3967.
- [7] M. S. Akbar, F. Suryadi, and D. D. Prastyo, "Kinerja Economizer Pada Boiler," *J. Tek. Ind.*, vol. 11, no. 1, pp. 72–81, 2009, doi: 10.9744/jti.11.1.72-81.
- [8] S. Harnowo and Y. Yunaidi, "Kinerja Boiler dengan Sistem Pembakaran Sekam Padi," *Semesta Tek.*, vol. 24, no. 2, pp. 102–110, 2021.
- [9] A. B. Pratama, S. M. Benu, E. P. D. Boangmanalu, S. Siahaan, and H. Ibrahim, "Laju Korosi Baja Karbon Ringan Pada Biopelumas Dari Limbah Minyak Goreng," *SINERGI Polmed J. Ilm. Tek. MESIN*, vol. 06, no. 01, pp. 07–18, 2025.
- [10] A. G. Artonang, U. S. Hardjanto, and A. Soemarmi, "PENGELOLAAN LIMBAH DI PERUSAHAAN PULP PT. TOBA PULP LESTARI, TBK KABUPATEN TOBA SAMOSIR SUMATERA UTARA MENURUT UNDANG-UNDANG NOMOR 32 TAHUN 2009 TENTANG PERLINDUNGAN DAN PENGELOLAAN LINGKUNGAN HIDUP," *Diponegoro Law J.*, vol. 5, no. 32, pp. 1–19, 2016, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/dlr/article/view/12224>
- [11] M. A. A. Siregar, "ANALISA PEMBAKARAN PADA RUANG BAKAR BOILER UNTUK KEBUTUHAN 30 TON / JAM TEKANAN 20 BAR DENGAN BAHAN BAKAR CANGKANG DAN FIBER," *Skripsi*, no. 58, p. 25, 2017, [Online]. Available: <https://repository.uma.ac.id/jspui/bitstream/123456789/8258/1/138510005.pdf>