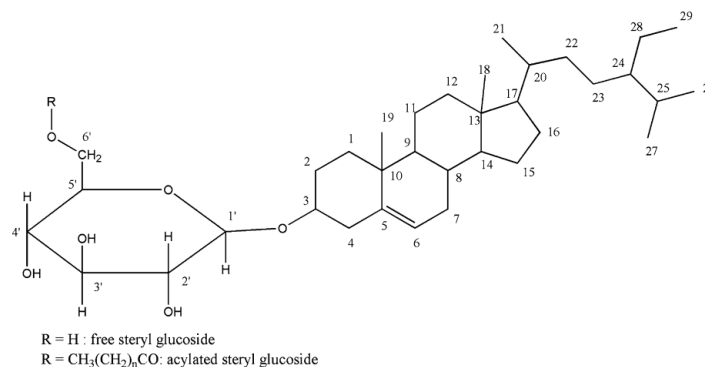


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Steryl Glucoside (SG)*

Pada produk FAME mentah terkandung beberapa zat pengotor antara lain *free fatty acids*, mono-, di-, tri-*acyl glycerols*, *free glycerol* dan lain sebagainya. Kontaminan ini berdampak buruk pada mesin kendaraan dan dapat mengakibatkan deposit, *clogging* pada filter hingga penurunan performa mesin (Tejima *et al.*, 2017). Pada minyak sawit *Steryl Glucoside* (SG) terjadi secara alami dalam bentuk *Free Steryl Glucoside* (FSG) dan *Acylated Steryl Glucoside* (ASG). Pada proses transterifikasi ASG dikonversi menjadi FSG pada kondisi alkali (Gambar 2.1). Proses konversi ini menyebabkan konsentrasi FSG pada FAME meningkat dari kondisi sebelumnya (Montpetit and Tremblay, 2016).



Gambar 2.1 Struktur FSG dan ASG
(Sumber: Van Hoed *et al.*, 2008)

Dalam proses pengolahan FAME, SG dipisahkan pada proses *cold filtration* menggunakan media filter. Media filter yang digunakan berupa absorban yang akan menyerap kandungan SG dari bahan baku biodiesel (Plata *et al.*, 2015). Setelah proses *cold filtration* selesai, absorban yang telah dipakai sebagai media filtrasi tersebut (residu filtrasi) kemudian dibuang. Berikut ini merupakan penampakan dari residu filtrasi (Gambar 2.2).



Gambar 2.2 Residu Filtrasi FAME
(Sumber: Valentino *et al.*, 2025)

2.2. *Filter Aid*

Filter aid merupakan salah satu media padat yang digunakan pada proses filtrasi suatu cairan. Pada penerapannya sebagai media filtrasi, *filter aid* terbagi menjadi tiga jenis yaitu diatomite, perlite dan selulosa yang dijelaskan berikut ini.

A. Diatomite

Diatomite atau *diatomaceous earth* (DE) atau yang biasa disebut juga dengan tanah diatom adalah tanah yang dihasilkan dari mikroorganisme mati yang mengendap pada dasar perairan yang akhirnya membentuk sedimen diatom. Karakteristik dari tanah diatom antara lain memiliki pori-pori halus, ringan dan jika dalam keadaan kering akan mengapung dipermukaan air. Tanah diatom memiliki kemampuan menyerap dan seringkali digunakan sebagai absorben di industri pengolahan minyak kelapa sawit (Luciana *et al.*, 2017).

Studi terdahulu menyebutkan bahwa DE setidaknya memiliki 87%-91% kandungan SiO_2 (Mejia *et al.*, 2016). DE sering dimanfaatkan pada proses produksi yang menggunakan bahan baku semen (Pokorny *et al.*, 2019). Diketahui adanya penambahan kandungan DE dapat meringankan berat dari sejumlah material yang digunakan pada konstruksi bangunan. Material tersebut adalah beton, mortar, batu bata dan keramik (Ferreira *et al.*, 2024).

B. Perlite

Perlit adalah batu kaca vulkanik alami yang bisa mengalami ekspansi jika dipanaskan. Perlit secara kimia merupakan sodium potassium aluminium silikat. Dibandingkan dengan tanah diatom, perlite lebih cocok digunakan untuk

pemisahan mikropartikel kasar yang memiliki kandungan padatan yang tinggi (Barry, 2015). Perlit memiliki bentuk kecil, ringan dan berwarna putih. Perlit juga memiliki sifat yang tidak berasa dan berbau. Oleh karena itu, perlit sering digunakan sebagai *filter aid* pada industri makanan dan minuman.

C. Selulosa

Selulosa diproduksi dengan pengolahan sulfit atau sulfat kayu keras (*hard woods*). Filter aid jenis selulosa sering dikombinasikan juga dengan diatomit. Salah satu contoh selulosa organik adalah bau dari pembakaran sekam padi. Material ini memiliki kandungan silika yang tinggi dan residual karbon arang yang dapat digunakan pada pengolahan limbah berbahaya beracun (Barry, 2015).

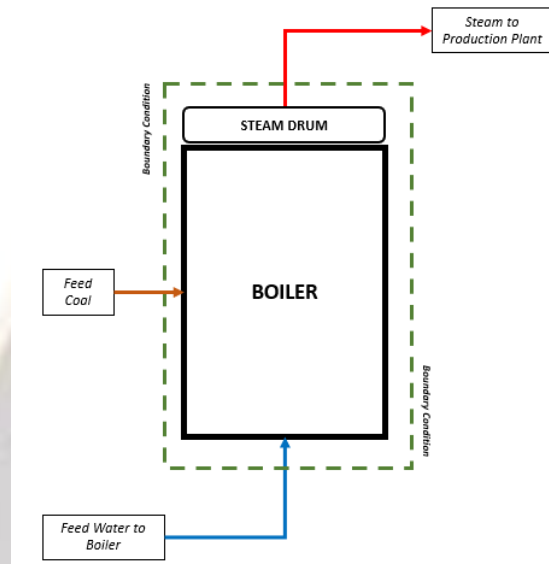
Secara keseluruhan, *filter aid* dapat digunakan sebagai media filtrasi untuk menjaga dari adanya penetrasi padatan yang tidak diinginkan. Namun perlu diperhatikan juga bahwa seluruh padatan yang tersaring akan menyatu dengan *filter aid* dan tidak ada cara praktis untuk memisahnya (Barry, 2015). Oleh karena itu, *filter aid* yang sudah digunakan harus dibuang. Alternatif lainnya, penelitian terdahulu menyatakan bahwa limbah *filter aid* dapat dimanfaatkan sebagai pupuk tanaman (Kapsandui, 2016).

2.3. Pengertian Ketel Uap (*Boiler*)

Ketel uap atau yang biasa dikenal dengan *boiler* adalah suatu alat konversi energi yang berfungsi untuk menghasilkan uap air. Bahan bakar yang digunakan bermacam-macam bisa batu bara, minyak bumi, biomassa atau listrik. Umumnya, *boiler* yang sering ditemui adalah yang menggunakan bahan bakar batu bara (Tawil, 2016).

Prinsip kerja dari *boiler* sendiri cukup sederhana yaitu bahan bakar dan udara masuk kedalam ruang bakar dan akan mengalami proses pembakaran secara kontinyu. Energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran digunakan untuk memanaskan air pada bejana tertutup. Selanjutnya air yang dipanaskan akan menguap menjadi uap air yang memiliki tekanan (*steam*). *Steam* yang dihasilkan akan dimanfaatkan untuk melakukan kerja. Dalam kasus tertentu *steam* digunakan

sebagai media pemanas (*heating system*) untuk proses produksi atau sebagai media pemutar *turbine generator* untuk membangkitkan listrik (Barma *et al.*, 2017).



Gambar 2.3 Skema ketel uap (*boiler*)
(Sumber: Valentino *et al.*, 2025)

2.4. Efisiensi *Boiler*

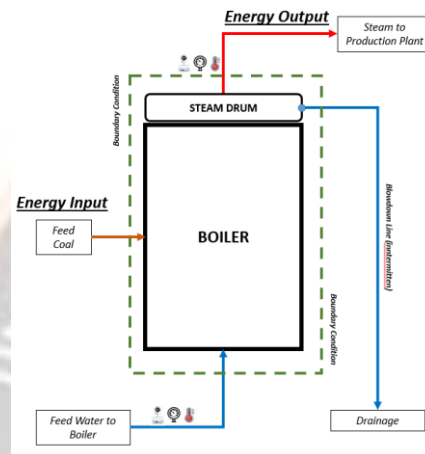
Kinerja *boiler* seperti efisiensi akan berubah-ubah seiring waktu, nilai efisiensi *boiler* dipengaruhi oleh pembakaran yang terjadi didalam *furnace*. Sementara itu kondisi pembakaran pada ruang bakar bergantung pada kualitas bahan bakar yang digunakan, dua parameter yang mempengaruhi adalah nilai kalor dan *moisture*. Pengujian efisiensi membantu untuk mengetahui seberapa jauh efisiensi *boiler* menyimpang dari titik idealnya. Oleh karena itu perlu dilakukan suatu perhitungan untuk mengetahui tingkat efisiensi *boiler* pada suatu kondisi kerja. Perhitungan efisiensi *boiler* sendiri terbagi menjadi dua, yaitu:

a. *Direct Efficiency*

Metode ini dikenal sebagai metode *input-output* karena metode ini hanya memperhitungkan nilai *output (steam)* terhadap nilai *input* (bahan bakar) dalam mengevaluasi efisiensi *boiler* (Ernest & David, 2022). Adapun rumus menghitung *direct efficiency* sebagai berikut.

$$Direct\ Efficiency = \frac{Heat\ Output}{Heat\ Input} \times 100 \quad (2.1)$$

$$Direct\ Eff. = \frac{Flow\ Steam \times (enthalpy\ steam - feedwater)}{Flow\ Fuel \times Calorific\ Value} \times 100\% \quad (2.2)$$



Gambar 2.4 Diagram energi *input* dan *ouput* boiler

(Sumber: Valentino *et al.*, 2025)

Pada Gambar 2.4 ditunjukkan alur energi *input* dan *ouput* dari boiler. Energi *input* berasal dari bahan bakar yang dikonsumsi. Total berat bahan bakar dikali dengan nilai kalor, maka akan diperoleh nilai energi *input* boiler. Sedangkan energi *ouput*, diperoleh dari jumlah *steam* yang diproduksi boiler. Total kuantitas *steam* yang diproduksi dikali dengan selisih *enthalpy feedwater* dengan *steam*, maka akan diperoleh nilai energi *ouput* boiler.

b. Indirect Efficiency

Pada metode ini pengukuran efisiensi dilakukan berdasarkan rugi-rugi yang terjadi pada boiler, lalu mengurangi total kerugian tersebut dari 100%. Maka dari itu, metode ini akan menghitung nilai yang lebih terperinci dan akurat dibandingkan dengan metode *direct efficiency* (Ernest & David, 2022). Beberapa parameter rugi-rugi yang terjadi pada boiler adalah sebagai berikut.

1. Rugi-rugi panas pada *flue gas*
2. Rugi-rugi panas dari penguapan air karena kandungan kadar H_2
3. Rugi-rugi panas karena kandungan air di bahan bakar

4. Rugi-rugi panas karena kandungan air di udara (*humidity*)
5. Rugi-rugi panas karena pembakaran tidak sempurna
6. Rugi-rugi panas karena radiasi dan konveksi
7. Rugi-rugi panas karena *un-burnt fly ash*
8. Rugi-rugi panas karena *un-burnt bottom ash*

Kemudian efisiensi boiler dapat dihitung menggunakan rumus berikut.

$$\begin{aligned} \text{Indirect Efficiency} \\ = (100\% - \text{total kerugian panas}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.5. Pengertian *Co-Firing*

Co-firing merupakan suatu istilah yang digunakan untuk menggambarkan pencampuran bahan bakar sekunder dengan bahan bakar primer pada peralatan pembakaran yang sama (Suganal and Hudaya, 2019). *Co-firing* umumnya seringkali diterapkan pada *boiler* berbahan bakar batu bara. Berikut ini terdapat tiga jenis metode *co-firing*, yaitu.

1. *Direct Co-Firing*

Metode *direct co-firing* adalah metode yang paling sederhana dan murah untuk diterapkan di *boiler* (Gil & Rubiera, 2018). Hal ini dikarenakan tidak perlu adanya modifikasi tambahan pada sistem, sehingga tidak memerlukan biaya yang banyak untuk menerapkannya. Penerapan metode ini cukup dengan memasukkan bahan bakar primer dan sekunder secara bersamaan kedalam ruang bakar.

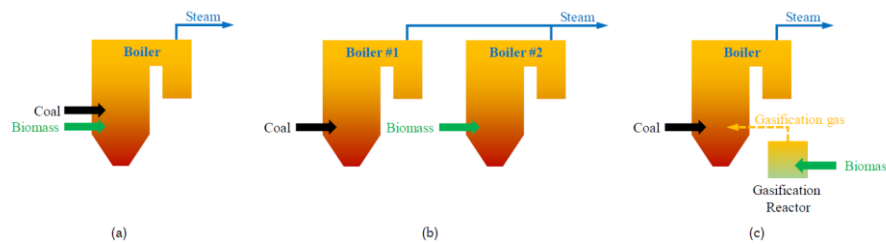
2. *Paralel Co-Firing*

Metode paralel *co-firing* dilakukan dengan menggunakan dua unit *boiler* yang berbeda, satu unit *boiler* menggunakan bahan bakar primer dan yang lainnya menggunakan bahan bakar sekunder. *Output steam* yang dihasilkan pada kedua *boiler* tersebut kemudian digunakan untuk suatu proses yang sama. Metode ini sering digunakan dalam industri kertas, dimana biomassa yang digunakan berupa kulit dan limbah kayu (Gil & Rubiera, 2018).

3. *Indirect Co-Firing*

Metode *indirect co-firing* melibatkan gasifikasi biomassa padat pada gasifier yang terpisah, dimana bahan bakar sekunder yang padat diubah menjadi gas

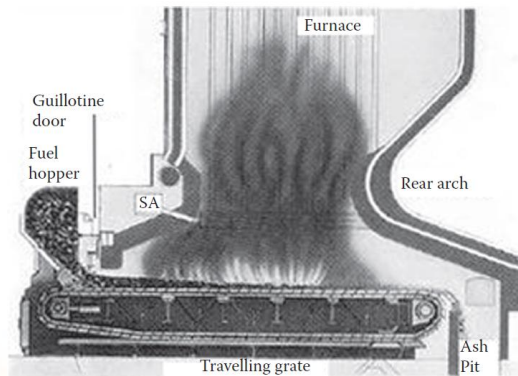
kemudian dibakar dengan bahan bakar primer didalam *furnace boiler* yang sama (Gil & Rubiera, 2018). Biaya untuk menerapkan metode ini cukup mahal dikarenakan perlu untuk menambahkan *gasifier*. Namun, metode ini memungkinkan untuk memakai variasi biomassa yang lebih luas dan persentase penggunaan biomassa yang lebih tinggi dari metode *direct co-firing*.



Gambar 2.5 Jenis-jenis Metode *Co-Firing Boiler*: (a) *direct co-firing*; (b) *parallel co-firing*; (c) *indirect co-firing* (Sumber: Mansour and Zuwala, 2010)

2.6. *Stoker Boiler*

Stoker boiler atau yang disebut juga dengan *grate boiler* merupakan tipe boiler khusus untuk membakar bahan bakar padat. Terdapat mekanisme *grate boiler* dengan permukaan tetap (*fixed grate*) maupun bergerak (*travelling grate*). Boiler di industri hilir pengolahan minyak kelapa sawit merupakan boiler stoker dengan mekanisme *travelling grate*. Prinsip kerja mekanisme ini adalah bahan bakar dimasukkan melalui *hopper*, kemudian akan terdistribusi diatas *chain grate*. *Chain grate* kemudian akan bergerak dengan kecepatan tertentu untuk menyalurkan bahan bakar dari sisi depan, tengah hingga belakang boiler (Gambar 2.6). Disaat yang sama udara suplai untuk proses pembakaran akan masuk untuk kedalam ruang bakar dengan bantuan *Forced Draft Fan* (FD fan) yang kemudian diseimbangkan dengan bantuan *Induced Draft Fan* (ID fan) (Rayaprolu, 2013). Oleh karena itu, proses pembakaran yang tercipta dipengaruhi oleh tiga parameter operasional yaitu *grate speed*, *FD fan* dan *ID fan*.



Gambar 2.6 Terminologi stoker *boiler*
(Sumber: Rayaprolu, 2013)

Selain itu, terdapat juga penelitian yang membahas terkait pembakaran pada ruang bakar *boiler* stoker. Pembakaran yang baik menghasilkan tampak visual api yang jelas dan tersebar merata diseluruh bagian ruang bakar. Maka dari itu, parameter yang perlu diperhatikan adalah kandungan *moisture* bahan bakar serta tampak visual api didalam ruang bakar *boiler*. Bahan bakar dengan kandungan *moisture* rendah, akan cenderung menghasilkan nyala api yang terang dan penyebaran api yang merata diseluruh ruang bakar *boiler* (Lee *et al.*, 2022). Contoh tampak visual dari pembakaran yang baik dan buruk ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Tampak visual pembakaran yang baik (kanan) dan buruk (kiri)
(Sumber: Lee *et al.*, 2022)

Berikut merupakan spesifikasi dari stoker *boiler* yang digunakan dalam penelitian ini (Tabel 2.1). Informasi ini berguna sebagai pendukung untuk melakukan analisis pengujian *co-firing residual cake* SG.

Tabel 2. 1 Spesifikasi *Boiler*

Deskripsi	Nilai	Unit
Kapasitas Boiler	20	ton/jam
Tekanan Desain	18	BarG
Tekanan Kerja	13,5 – 14,5	BarG
Efisiensi Desain	79	%
Nilai Kalor Bahan Bakar Desain (<i>Gross As Received</i>)	4.741	kcal/kg
Medium	<i>Saturated Steam</i>	-
Jenis	<i>Stoker/Chain Grate</i>	-

(Sumber: Manual Book *Stoker Boiler*)

2.7. Kajian Ekonomi

Specific Fuel Consumption (SFC) merupakan suatu metode yang dapat digunakan untuk menentukan nilai ekonomi suatu mesin. Perhitungan SFC menggunakan metode energi *input* dan *output* seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.4 dan 2.5. Energi input berasal dari jumlah bahan bakar yang dikonsumsi oleh *boiler*, sedangkan energi *output* adalah jumlah *steam* yang diproduksi oleh *boiler*.

Sementara itu, untuk menghitung biaya bahan bakar dapat menggunakan persamaan 2.6. Harga bahan bakar diperoleh dari data pembelian bahan bakar dalam satuan IDR/kg. Biaya bahan bakar diperoleh dengan cara mengalikan harga bahan bakar dengan SFC. Hasil perhitungan biaya bahan bakar diperoleh dalam unit satuan IDR/ton *steam* (Destalia and Aryanny, 2024).

$$SFC = \frac{\text{energi input}}{\text{energi output}} \quad (2.4)$$

$$SFC = \frac{\text{konsumsi bahan bakar (ton fuel)}}{\text{Produksi Steam (ton steam)}} \quad (2.5)$$

$$\text{Biaya Bahan Bakar} = \text{Harga Bahan Bakar} \left(\frac{\text{IDR}}{\text{ton}} \right) \times SFC \left(\frac{\text{ton fuel}}{\text{ton steam}} \right) \quad (2.6)$$

2.8. Kajian Emisi Karbon

Emisi karbon merupakan jumlah pelepasan gas karbon dioksida (CO₂) ke atmosfer bumi akibat dari adanya proses pembakaran bahan bakar (batu bara, minyak, gas, biomassa dsb). Emisi karbon yang menumpuk di permukaan bumi dapat merusak lapisan ozon dan berdampak perubahan iklim diseluruh bagian bumi. Maka dari itu, produksi emisi karbon perlu dibatasi agar tidak berlebih. Berikut ini adalah formula untuk menghitung jumlah emisi karbon yang dihasilkan dari proses pembakaran pada unit *boiler* (ISCC, 2021).

$$EM_{heat} = fuel\ consumption \left[\frac{kg\ or\ ton}{hours} \right] \times EF_{fuel} \left[\frac{kgCO_2eq}{kg} \right] \quad (2.7)$$

$$EM_{heat} = fuel\ consumption \left[\frac{kg\ or\ ton}{hours} \right] \times EM_{coeff.} \left[\frac{kgCO_2eq}{MJ} \right] \times fuel\ CV \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (2.8)$$

SEKOLAH PASCASARJANA