

**ANALISIS PERFORMA BOILER BERBAHAN BAKAR
KOMBINASI *FIBER* DAN CANGKANG PADA BOILER
TAKUMA N-600 SA**

SKRIPSI

OLEH :

**ELI SIMANJUNTAK
188130031**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2023**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 8/6/23

Access From (repository.uma.ac.id)8/6/23

**ANALISIS PERFORMA BOILER BERBAHAN BAKAR
KOMBINASI *FIBER* DAN CANGKANG PADA BOILER
TAKUMA N-600 SA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana di Program
Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Medan Area

Oleh :

**ELI SIMANJUNTAK
188130031**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2023**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

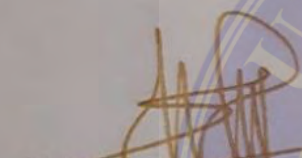
Document Accepted 8/6/23


Access From (repository.uma.ac.id)8/6/23


HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI


Judul Skripsi : Analisis Performa Boiler Berbahan Bakar Kombinasi
Fiber Dan Cangkang Pada Boiler Takuma N-600 SA
Nama Mahasiswa : Eli Smanjuntak
NIM : 18.813.0031
Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh
Komisi Pembimbing


Muhammad Idris, S.T, M.T
Pembimbing I


Jufrizal, S.T, M.T
Pembimbing II


DR. Rahmansyah, S. Kom, M.Kom
Dekan

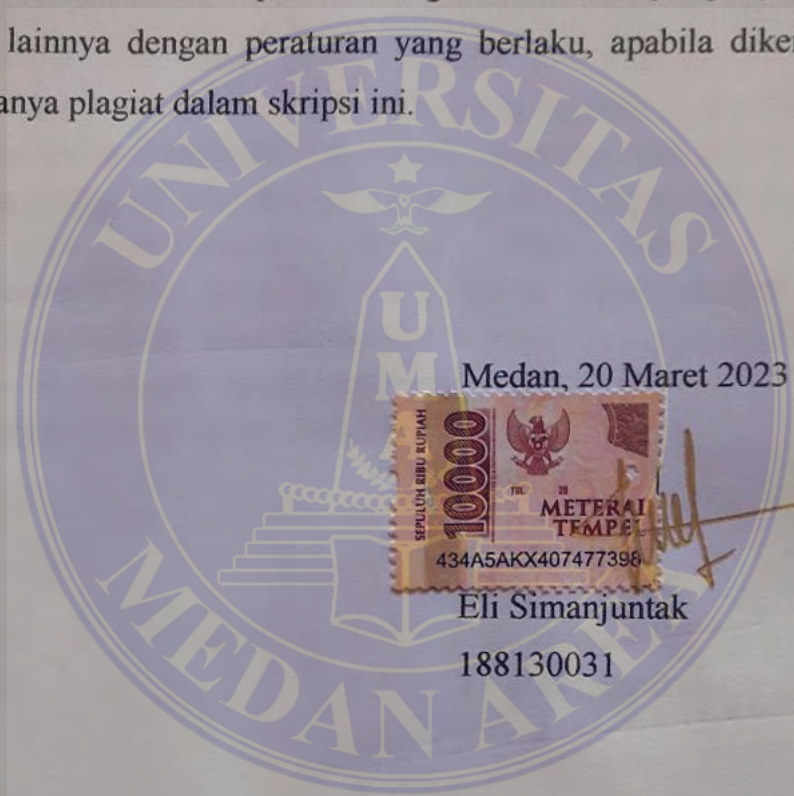

Muhammad Idris, S.T, M.T
Ka. Prodi/WD 1

Tanggal Lulus : 20 Maret 2023

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila dikemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.



Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi Karya Ilmiah

Sebagai sivitas Universitas Medan Area, saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Eli Simanjuntak
NPM : 18.813.0031
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : Analisis Performa Boiler Berbahan Bakar Kombinasi *Fiber* Dan Cangkang Pada Boiler Takuma N-600 SA beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasi tugas akhir saya Selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Medan
Pada tanggal : 20 Maret 2023
Yang menyatakan



(Eli Simanjuntak)

ABSTRAK

Boiler Merupakan bejana tertutup penghasil uap yang dapat mengkonversi energi kimia dari bahan bakar menjadi uap bertekanan. Uap tersebut digunakan sebagai sumber daya listrik dan untuk pengolahan buah kelapa sawit. Peneliti menggunakan metode observasi langsung untuk mengidentifikasi spesimen dan parameter. Untuk menganalisis efisiensi thermal boiler dan *Specific Fuel Consumption* (SFC) menggunakan bahan bakar *fiber* 100% dan kombinasi *fiber* 70% dan cangkang 30%. Dari hasil penelitian ini diperoleh bahwa menggunakan bahan bakar *fiber* 100% menghasilkan 68,1% efisiensi thermal boiler, dan diperoleh nilai SFC yaitu 13,37 kg/kWh. Penggunaan bahan bakar kombinasi *fiber* 70% dan cangkang 30% menghasilkan 74,2% efisiensi thermal boiler, dan diperoleh nilai SFC yaitu 10,98 kg/kWh. Sehingga Efisiensi thermal boiler mengalami peningkatan sebesar 6,1% dan nilai SFC mengalami penurunan sebesar 2,39 kg/kWh. Peningkatan performa boiler dan rendahnya nilai SFC disebabkan tingginya nilai kalor pada bahan bakar kombinasi *fiber* dan cangkang yaitu 12.799,343 kJ/kg dan rendahnya konsumsi bahan bakar yaitu 5.492,53 kg/jam.

Kata kunci : Performa, Boiler, *Fiber*, Cangkang, Pabrik Kelapa Sawit.

ABSTRACT

A boiler is a steam producing closed vessel that can convert chemical energy from a fuel into pressurized steam. The steam is used as an electrical power source and for the processing of oil palm fruit. Researchers use direct observation methods to identify specimens and parameters. To analyze the efficiency of thermal boilers and Specific Fuel Consumption (SFC) using 100% fiber fuel and a combination of 70% fiber and 30% shell. From the results of this study, it is stated that using 100% fiber fuel produces 68,1% thermal boiler efficiency, and an SFC value of 13,37 kg/kWh is obtained. The combined fuel use of 70% fiber and 30% shell results in 74,2% thermal boiler efficiency, and an SFC value of 10,98 kg/kWh is obtained. So that the efficiency of thermal boilers has increased by 6,1% and the SFC value has decreased by 2,39 kg/kWh. The improvement in boiler performance and low SFC value is due to the high calorific value of fiber and shell combination fuel which is 12.799,343 kJ/kg and low fuel consumption of 5.492,53 kg/hour.

Keywords : Performance, Boiler, Fiber, Shell, Palm Oil Mill.

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Dalu-dalu, Pada tanggal 17 Agustus 1999 dari Ayah Hormat Simanjuntak dan Ibu Mesdiana Manurung. Penulis merupakan putra ke enam dari delapan bersaudara.

Tahun 2018 Penulis lulus dari SMK Swasta Cinta Rakyat Pematangsiantar dan pada tahun 2018 terdaftar sebagai mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Medan Area.

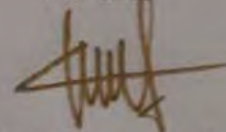
Tahun ajaran 2021/2022 penulis melaksanakan Kerja Praktek (KP) di PTPN II PKS Unit Pagar Merbau. Pada Tahun ajaran 2022/2023 penulis melaksanakan penelitian di PTPN II PKS Unit Pagar Merbau dengan judul Tugas Akhir “Analisis Performa Boiler Berbahan Bakar Kombinasi *Fiber* Dan Cangkang Pada Boiler Takuma N-600 SA”.

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala karuniaNya, sehingga skripsi ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian ini ialah Performa Boiler, dengan judul Analisis Performa Boiler Berbahan Bakar Kombinasi Fiber Dan Cangkang Pada Boiler Takuma N-600 SA.

Terima kasih penulis sampaikan kepada Bapak Muhammad Idris, ST, MT dan Bapak Zufrizal, ST, MT selaku pembimbing serta bapak Dr. Iswandi, ST, MT yang telah banyak memberikan saran. Disamping itu penghargaan penulis sampaikan kepada Bapak Pujad Had'ad dan saudara Inca Wahyu Fauza Simamora, ST yang telah membantu penulis selama melaksanakan penelitian. Ungkapan terima kasih disampaikan kepada Hormat Simanjuntak, Mesdiana Manurung, serta seluruh keluarga atas segala doa dan perhatiannya, ungkapkan terima kasih juga disampaikan kepada Suci Sauduran Silaban dan seluruh teman penulis yang selalu memberikan semangat dan dukungan selama penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat baik untuk kalangan pendidikan maupun masyarakat Akhir kata penulis ucapkan terima kasih

Penulis



Eli Simanjuntak

DAFTAR ISI

ANALISIS PERFORMA BOILER BERBAHAN BAKAR KOMBINASI <i>FIBER</i> DAN CANGKANG PADA BOILER TAKUMA N-600 SA	i
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi Karya Ilmiah.....	iv
ABSTRAK	v
RIWAYAT HIDUP.....	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Hipotesis Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Boiler	5
2.2 Air Umpan Boiler.....	11
2.3 Efisiensi Boiler	12
2.4 Biomassa Sebagai Bahan Bakar Boiler	16
2.5 Siklus Rankine.....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Tempat dan Waktu	21
3.2 Peralatan dan Bahan	22
3.3 Metode Penelitian.....	26
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Hasil.....	31
4.2 Pembahasan	32
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	39

5.1	Kesimpulan.....	39
5.2	Saran.....	39
	DAFTAR PUSTAKA	41
	LAMPIRAN.....	43



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Spesifikasi Boiler Takuma N-600 SA.....	5
Tabel 2. 2. Feed Water Boiler	12
Tabel 2. 3. Unsur-unsur kima fiber dan cangkang.....	17
Tabel 3. 1. Tahapan Tugas Akhir.....	21
Tabel 3. 2. Spesifikasi Boiler	22
Tabel 4. 1. Data Operasional Boiler.....	31
Tabel 4. 2. Konversi Nilai Data Operasional Boiler Kedalam Standar SI.....	32
Tabel Lampiran 1. Data Operasional Boiler Menggunakan Fiber 100%.....	44
Tabel Lampiran 2. Performa Boiler Menggunakan Kombinasi Fiber 70% dan Cangkang 30%	48



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Ketel Uap.....	5
Gambar 2. 2. Boiler Pipa Api.....	6
Gambar 2. 3. Ketel Uap Pipa Air	7
Gambar 2. 4. Komponen Ketel Uap.....	8
Gambar 2. 5. Serat Buah Kelapa Sawit (<i>Fiber</i>)	18
Gambar 2. 6. Cangkang Kelapa Sawit (<i>Shell</i>)	20
Gambar 2. 7. Komponen Siklus Rankine.....	20
Gambar 2. 8. Diagram Siklus Rankine Ideal.....	21
Gambar 3. 1. Boiler PKS Pagar Merbau	23
Gambar 3. 2. Temperatur Monitor	24
Gambar 3. 3. Tekanan Monitor	24
Gambar 3. 4. Monitor <i>Steam Flow</i>	25
Gambar 3. 5. <i>Water Level Gauge</i>	25
Gambar 3. 6. Serabut Kelapa Sawit (<i>Fiber</i>)	26
Gambar 3. 7. Cangkang Kelapa Sawit (<i>Shell</i>)	26
Gambar 4. 1. Grafik Perbandingan Kebutuhan Bahan Bakar	34
Gambar 4. 2. Grafik Perbandingan Kebutuhan Kalor Boiler.....	35
Gambar 4. 3. Grafik perbandingan panas yang diserap furnace	36
Gambar 4. 4. Grafik perbandingan kebutuhan udara furnace	37
Gambar 4. 5. Grafik Perbandingan Efisiensi Thermal	38
Gambar 4. 6. Grafik Perbandingan SFC	39

DAFTAR LAMPIRAN

Perhitungan Kombinasi Fiber Dan Cangkang.....	43
Perhitungan Performa Boiler Menggunakan Fiber 100%.....	44
Perhitungan Performa Boiler Menggunakan Kombinasi <i>Fiber</i> 70% dan Cangkang 30%	48



DAFTAR NOTASI

HHV	=	Nilai kalor atas bahan bakar (kJ/kg)
LHV	=	Nilai kalor bawah bahan bakar (kJ/kg)
W_{fuel}	=	Kebutuhan bahan bakar (kg/jam)
h_1	=	Enthalpy <i>feed water</i> boiler (kJ/kg)
h_2	=	Enthalpy daerator (kJ/kg)
h_3	=	Enthalpy superheater (kJ/kg)
h_4	=	Enthalpy uap sisa (kJ/kg)
m_u	=	Kapasitas uap boiler (kg/jam)
η	=	Efisiensi thermal boiler (%)
Q	=	Kebutuhan kalor (kJ/kg)
Δh	=	Perubahan enthalpy uap (kJ/kg)
Q_f	=	Panas yang diserap <i>furnace</i> (kJ/kg)
$U_{act(total)}$	=	Kebutuhan udara actual total (kg/jam)
SFC	=	Konsumsi spesifik bahan bakar (kg/kWh)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Dewasa ini populasi Penduduk meningkat 1,22% berdasarkan Badan Pusat Statistik tahun 2021 dan perkembangan dunia industri akan terus meningkat, dengan pasokan dan jumlah kebutuhan akan bahan bakar fosil juga semakin bertambah, maka penyediaan akan sumber bahan bakar dari fosil akan rendah, salah satu contoh minyak bumi akan semakin berkurang. Oleh karena itu Indonesia mempunyai perkebunan kelapa sawit yang luasnya mencapai 14.663 juta Ha pada tahun 2021. Maka peneliti memiliki ide untuk menggunakan biomassa sebagai pengganti bahan bakar fosil yang diperoleh dari hasil olahan kelapa sawit tersebut (Badan Pusat Statistik, 2022).

Kelapa sawit merupakan salah satu tanaman budidaya penghasil minyak nabati. Selain menghasilkan CPO, kelapa sawit juga memperoleh limbah padat dan cair sisa olahan yang belum banyak digunakan secara maksimal. Diketahui bahwa 1 Ton kelapa sawit, menghasilkan limbah padat antara lain, Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) sebanyak 23% atau 230 Kg, Serat Kelapa Sawit 13% atau 130 kg, Cangkang (*Shell*) sebanyak 6,5% atau 65 kg, Lumpur Sawit (*wet decanter solid*) 4% atau 40 kg, serta limbah cair sebanyak 50%. Dari data tersebut pemanfaatan limbah hasil olahan masih belum maksimal, khususnya serat buah kelapa sawit (*Fiber*) dan cangkang (*Shell*) kelapa sawit (Kamal, 2018).

Menurut penelitian sebelumnya yang berjudul Analisis Unjuk Kerja Boiler Terhadap penurunan Daya Pada PLTU PT. Indonesia Power UBP Perak. Efisiensi

thermal yang dihasilkan boiler sebesar 87.35 % saat komisioning, menjadi 73,20 % saat kondisi sekarang, sehingga mengalami penurunan sebesar 14,15 % (Asmudi, 2010). Menurut Analisa Pemakaian Bahan Bakar Dengan Melakukan Pengujian Nilai Kalor Terhadap Performansi Ketel Uap Tipe Pipa Air Dengan Kapasitas Uap 60 Ton/Jam. Diketahui bahwa boiler membutuhkan bahan bakar kombinasi biomassa (*Fiber* 75 % + Cangkang 25 %) yaitu 13.481,94 kg/jam (Hasibuan & Napitupulu, 2013). Konsumsi spesifik bahan bakar (SFC) yaitu 1,25 kg/kWh pada Analisis Spesifik Konsumsi Bahan Bakar Dengan menggunakan Bahan Bakar Rendah Kalori (Hasanudin et al., 2020). Dari data tersebut maka limbah dimanfaatkan sebagai bahan bakar biomassa yakni *Fiber* dan Cangkang sebagai spesimen utama untuk bahan bakar boiler. Dengan demikian, penggunaan biomassa sebagai bahan bakar boiler memunculkan masalah pada boiler tersebut, yaitu rendahnya efisiensi thermal dan tingginya *Specific Fuel Consumption* (SFC) karena sifat bahan bakar biomassa tersebut mudah habis terbakar. Berkaitan dengan masalah diatas, persoalan penting yang perlu mendapat perhatian utama adalah performa pada boiler tersebut.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun identifikasi dan masalah dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

- a. Bagaimanakah pengaruh penggunaan bahan bakar biomassa terhadap efisiensi thermal boiler ?
- b. Bagaimanakah pengaruh tingginya *Specific Fuel Consumption* (SFC) terhadap operasional boiler ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Menghitung efisiensi thermal pada Boiler Takuma N-600 SA menggunakan bahan bakar *fiber* 100% dan kombinasi *fiber* 70% dan cangkang 30 %.
- b. Menghitung nilai *Spesific Fuel Consumption* (SFC) boiler sebagai sumber daya pengolahan PKS.

1.4 Hipotesis Penelitian

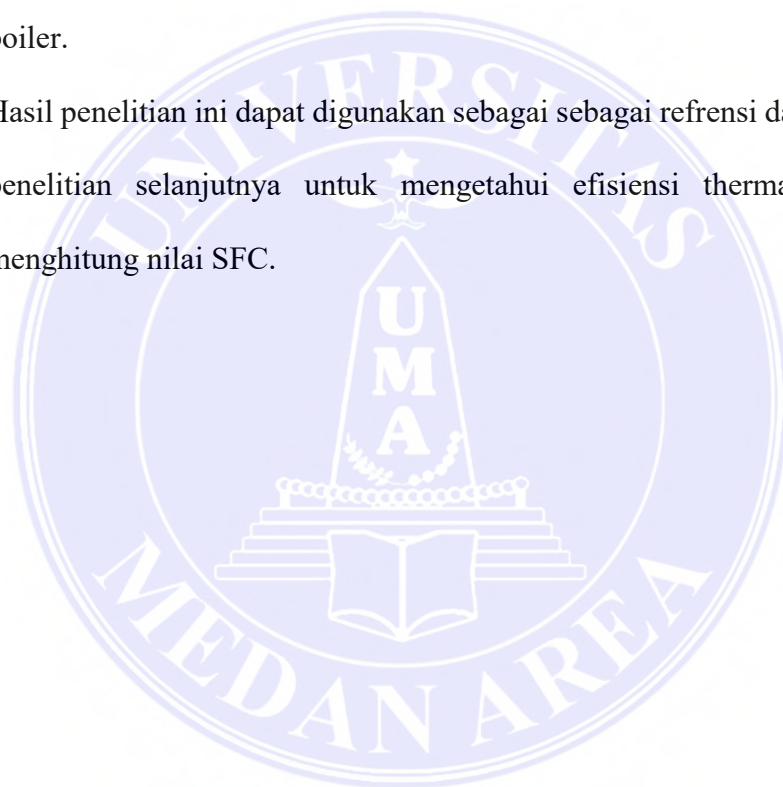
Hipotesis yang dapat ditarik dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Dugaan efisiensi thermal pada boiler menggunakan *fiber* 100% yaitu 75%, sedangkan menggunakan *fiber* 70% dan cangkang 30% yaitu 80%. Efisiensi thermal boiler mengalami peningkatan sebesar 5% disebabkan oleh meningkatnya kapasitas uap boiler, meningkatnya nilai kalor bahan bakar, dan rendahnya komsumsi bahan bakar. Peningkatan efisiensi tidak terlalu signifikan dikarenakan banyaknya faktor lain yang mempengaruhi efisiensi thermal boiler, contoh salah satunya yaitu pipa-pipa air boiler tertutup oleh kerak hasil pembakaran.
- b. Dugaan SFC dengan penggunaan daya rata-rata yaitu 500 kWh, SFC menggunakan *fiber* 100% yaitu 12 kg/kWh, sedangkan menggunakan kombinasi *fiber* 70% dan cangkang 30% yaitu 10 kg/kWh. SFC mengalami penurunan yaitu sebesar 2 kg/kWh disebabkan nilai kalor kombinasi bahan bakar *fiber* dan cangkang lebih tinggi sehingga kebutuhan bahan bakar boiler yang lebih rendah.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Penelitian ini sebagai sarana dalam meningkatkan potensi penulis dalam mengembangkan ilmu pengetahuan khususnya analisis efisiensi boiler dan menghitung nilai SFC boiler dengan metode perbandingan dan interpolasi.
- b. Melalui penelitian ini, peneliti dapat memberikan kontribusi dalam memperkaya penelitian-penelitian sebelumnya yang berkaitan pada efisiensi boiler.
- c. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai sebagai referensi dan acuan pada penelitian selanjutnya untuk mengetahui efisiensi thermal boiler dan menghitung nilai SFC.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Boiler

Boiler atau ketel uap adalah alat yang menghasilkan *steam* berupa bejana tertutup untuk memanaskan pipa-pipa saluran air. Memanaskan bejana yang berisi air dan bahan bakar menghasilkan uap panas. Panas dipindahkan dari pembakaran bahan bakar ke permukaan pemanas di dapur (*heating surface*) (Muin, 1988). PKS PTPN II Pagar Merbau mempunyai 2 (dua) unit boiler, salah satunya Takuma N-600 SA dan spesifikasinya dapat dilihat pada tabel 2.1.

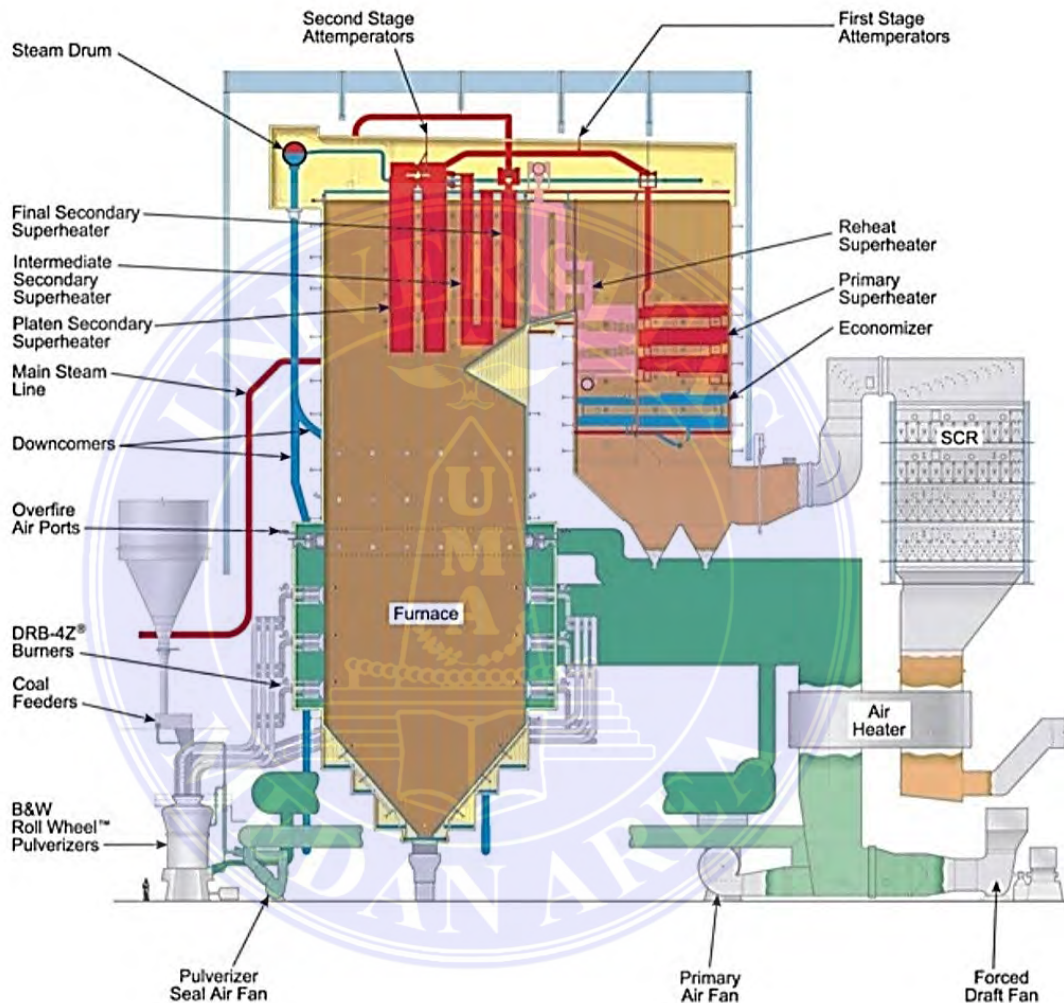
Tabel 2. 1. Spesifikasi Boiler Takuma N-600 SA

Ketel Uap	Takuma
Kapasitas Uap Maksimal	21.000 kg/jam
Tekanan Uap maksimal	21 kg/cm ²
Temperatur Uap maksimal	290 °C
Daya Output Generator	500 kWh
Jenis Uap	Uap Basah
Jenis Boiler	Water Tube
Tipe Boiler	N-600 SA

2.1.1 Prinsip Kerja Boiler

Boiler adalah bejana tertutup dimana panas pembakaran dialihkan ke air sampai terbentuk air panas atau *steam*. Air panas atau *steam* pada tekanan tertentu kemudian digunakan untuk mengalihkan panas ke suatu proses. Jika air di didihkan sampai menjadi *steam*, volumenya akan meningkat sekitar 1.600 kali. Sistem boiler terdiri dari: sistem air umpan, sistem uap dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan *steam*. Sistem *steam* mengumpulkan dan mengontrol produksi *steam* dalam boiler. *Steam*

dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan uap diatur menggunakan katup (*valve*) dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Gambar 2.1 merupakan salah satu desain boiler beserta dengan bagian-bagiannya (Aulia, 2018).



Gambar 2. 1. Ketel Uap

2.1.2 Desain Boiler

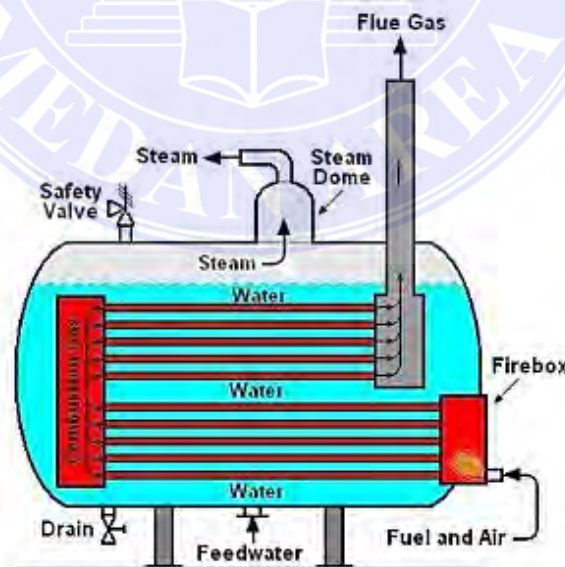
Boiler mempunyai 2 desain utama yaitu boiler pipa api dan boiler pipa air. Pada boiler pipa api, fluida yang mengalir dalam pipa adalah gas nyala (hasil pembakaran). Pada boiler pipa air, fluida yang mengalir dalam pipa adalah air,

energi panas dipindahkan dari luar pipa ke air boiler. Dan selanjutnya akan di jelaskan dibawah ini.

1. Boiler Pipa Api

Pada sistem boiler pipa api ini, air bertekanan tinggi ditempatkan pada sisi luar pipa api. Karena pada dasarnya setiap pipa mempunyai kekuatan dua kali lipat terhadap tekanan internal dibandingkan dengan terhadap tekanan eksternal, maka sistem ini terbatas hanya untuk tekanan uap yang relatif rendah. Diameter drum maksimum adalah 8 kaki dan tekanan uap maksimum terbatas sekitar 17 atm, meskipun kebanyakan sistem ini biasanya bekerja pada tekanan sekitar 10 atm. Jenis boiler pipa api yang terkenal diantaranya ialah Ketel *Scotch* (Muin, 1988).

Pada boiler pipa api, fluida yang mengalir adalah fluida bertemperatur tinggi sebagai akibat penyerapan kalor (hasil pembakaran). Gambar 2.2 merupakan boiler pipa api, dimana nyala api dan gas panas yang dihasilkan melalui dinding pipa dari gas panas ke air di sekeliling pipa tersebut.

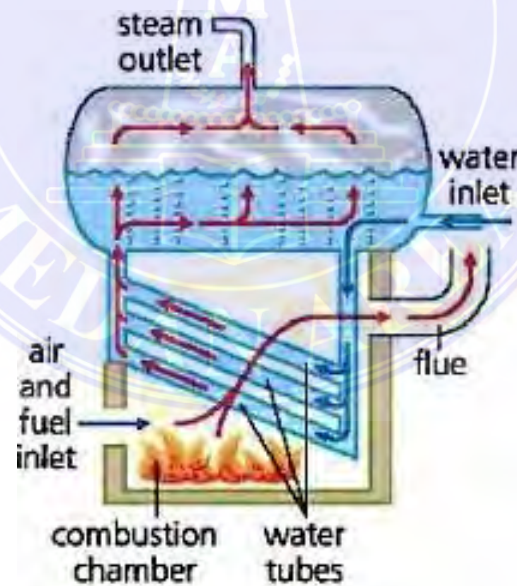


Gambar 2. 2. Boiler Pipa Api

2. Boiler Pipa Air

Pada boiler jenis ini, air ketel mengalir di dalam pipa-pipa, sedangkan pemanasan air itu dilakukan oleh gas-gas asap yang beredar di sekitar pipa-pipa itu. Boiler ini biasanya dapat bekerja dengan tekanan-tekanan uap yang tinggi, yang ditinjau dari sudut ekonomi yang sangat menguntungkan. Jadi tekanan uap yang tinggi itu juga hanya dapat diperoleh sampai dengan tekanan 100 bar dengan pemakaian boiler pipa air karena boiler ini terutama tersusun dari bejana-bejana air dan bejana-bejana uap yang berbentuk silinder seperti yang terlihat pada gambar 2.3 (Muin, 1988). Secara ringkas, keuntungan boiler pipa air adalah:

- a. Sanggup bekerja dengan tekanan tinggi.
- b. Berat ketel yang relatif ringan dibandingkan dengan kapasitas boiler.
- c. Kapasitas yang besar.

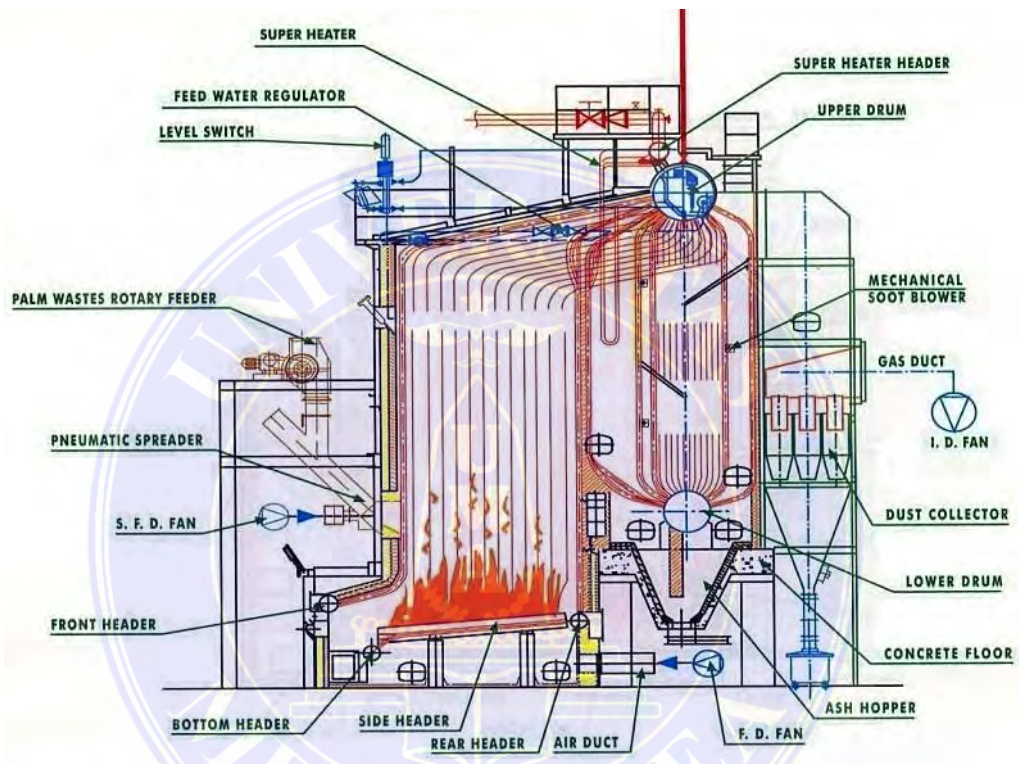


Gambar 2. 3. Ketel Uap Pipa Air

2.1.3 Komponen Boiler

Untuk merubah air menjadi uap pada boiler perlu dilakukan langkah-langkah serta melewati bagian-bagian pada boiler agar fasa cair dapat berubah

menjadi fasa uap (Santoso, 2018). Ketel memiliki beberapa komponen untuk melakukan proses merubah fasa cair menjadi fasa uap yang terdiri dari beberapa komponen yaitu : Pipa evaporator, ruang bakar (*furnace*), drum, pemanasan lanjut (*superheater*), pemanas udara (*air heater*), *dust collector* seperti terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4. Komponen Ketel Uap

Alat pendukung kinerja boiler :

a. *Induce Draft Fan* (IDF)

Induce Draft Fan (IDF) yaitu kipas yang digunakan menyedot asap dari hasil pembakaran pada dapur boiler.

b. *Forced Draft Fan* (FDF)

FDF atau disebut juga dengan *Secondary Air Fan* berfungsi untuk mengontrol udara dan oksigen yang dibutuhkan saat proses pembakaran dan untuk mendorong bahan bakar ke dapur boiler supaya tidak terjadi penumpukan.

c. *Primary Air Fan*

Yaitu kipas yang berfungsi untuk membantu mempercepat proses pembakaran bahan bakar dengan udara (udara primer) supaya proses pembakaran menjadi lebih optimal.

d. Pipa Evaporator

Pipa evaporator merupakan susunan pipa yang mempunyai fungsi untuk mengubah air menjadi uap bertekanan, pipa evaporator disusun vertikal pada dinding boiler mengelilingi dapur pembakaran (*furnance*).

e. *Furnace*

Furnace adalah dapur penerima panas bahan bakar untuk pembakaran, yang terdapat *fire gate* dibagian bawah sebagai alas bahan bakar dan yang sekelilingnya adalah pipa-pipa air ketel yang menempel pada dinding ruang pembakaran yang menerima panas dari bahan bakar secara radiasi, konveksi, konduksi.

f. Drum

Drum merupakan tempat menampung air dari *economizer* sekaligus sebagai pemisah uap dan air. Pada konstruksi sebuah boiler terdapat 2 buah drum yakni drum uap atas dan drum uap bawah. Drum uap berfungsi untuk menampung uap hasil dari sirkulasi. Drum uap bawah merupakan drum yang posisinya di bawah drum uap dan berfungsi sebagai pengumpul air panas yang akan didistribusikan ke dalam *wall tube*.

g. Pemanas Lanjut

Pemanas lanjut (*superheater*) adalah bagian boiler yang berfungsi untuk merubah fasa uap *saturated* menjadi fasa uap *superheat*.

h. Pemanas Udara

Pemanas udara (*air heater*) adalah alat pemanas udara yang akan dihembuskan ke ruang bakar. Flue gas yang memiliki temperatur yang tinggi digunakan untuk memanaskan udara pada *air heater*.

i. *Damper* I dan *Damper* II

Kedua *Damper* ini mempunyai fungsi yang sama yakni untuk mengumpulkan abu atau wadah abu hasil pembakaran.

2.1.4 Material Pipa Boiler

Sifat kehandalan dari suatu konstruksi merupakan salah satu faktor penentu dari upaya meningkatkan produktifitas, dimana umur pakai material menjadi hal yang utama. Umur pakai material umumnya ditentukan oleh beberapa sifat mekanik material tersebut diantaranya: nilai kekerasan, kekuatan tarik, ketahanan terhadap beban kejut (*impact*), ketahanan terhadap serangan korosi dan juga kemampuan untuk dioperasikan pada temperatur tinggi (Zhang, 2013).

2.2 Air Umpan Boiler

Sistem air umpan yang dimiliki boiler untuk menghasilkan uap panas harus memiliki spesifikasi dan syarat tertentu sehingga dapat digunakan sebagai umpan boiler. Dengan menggunakan pompa air pengisian ketel atau *Boiler Feed Water Pump* (BFWP) air umpan boiler dipompakan dari luar masuk ke dalam boiler dari tekanan 1 bar hingga mencapai tekanan kerja maksimum di dalam boiler (Djokosetyoarjo, 1990).

Air yang disuplai ke boiler untuk di ubah menjadi uap panas disebut air umpan (*feed water*). Terdapat dua sumber air umpan yaitu :

Uap panas yang mengembun yang dikembalikan dari proses atau kondensat.

Air baku yang diolah yang harus diumpankan dari luar ruang boiler dan (*plant process*) yang disebut *air make up* .

Batasan-batasan yang direkomendasikan bila *demineralized water* dipakai sebagai *feed water* untuk boiler dapat dilihat pada Tabel 2.2 sebagai berikut (Pertamina, 1993) :

Tabel 2. 2. *Feed Water Boiler*

No	Item	Unit	Feed Water	Boiler Water
1	pH value (at 25°C)	-	8.0 – 9.0	9.2 – 10.8
2	Hardness(as CaCO ₃)	pp	0	-
3	Oil Content	pp	Maintain at nearly “0”	-
4	DissolvedO ₂	ppm	<0.03	-
5	M alkanity (as CaCO ₃)	ppm	-	-
6	P alkanity (as CaCO ₃)	ppm	-	-
7	Hydrazine N ₂ H ₄	ppm	>0.01	-
8	Total Iron Fe	ppm	<0.1	-
9	Total Copper Cu	ppm	<0.05	-
10	Total Dissolved Solid	ppm	-	<300
11	Chloride ion Cl	ppm	-	<30
12	Phosphatic acid ion PO _{3/4}	ppm	-	3-10
13	Silica SiO ₂	ppm	<0.2	<5
14	Conductivity	us/cm	<10	<500

2.3 Efisiensi Boiler

Efisiensi adalah unjuk kerja suatu kemampuan alat utilitas. Disamping itu, definisi efisiensi boiler yaitu tingkat kemampuan kerja boiler atau ketel uap yang diperoleh melalui perbandingan antara energi yang berpindah tempat atau diserap oleh fluida kerja didalam boiler dengan masukan kimia dan bahan bakar (Muin, 1988).

2.3.1 Kebutuhan Bahan Bakar

Banyaknya bahan bakar yang dibutuhkan boiler untuk menghasilkan steam dengan kondisi optimal yang akan digunakan untuk proses pengolahan, dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$W_{fuel} = \frac{m_u \times (h_3 - h_1)}{\eta_b \times LHV} \text{ (kg/jam)} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

W_{fuel} = Kebutuhan bahan bakar (kg/jam)

m_u = Massa uap (kg/jam)

h_1 = Enthalpy *feed water* (kJ/kg)

h_3 = Enthalpy *superheater* (kJ/kg)

LHV = *Low heating value* (kJ/kg)

η_b = Efisiensi boiler (%)

2.3.2 Kebutuhan Kalor Boiler

Kalor pembakaran yaitu panas yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar didalam *furnace*. Tingginya nilai kalor pembakaran yang dihasilkan pada *furnace* dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini (Djokosetyardjo, 2003) :

$$Q = m_u \times \Delta h \text{ (kJ/kg)} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

Q = Kalor pembakaran (kg/jam)

m_u = Massa uap (kg/jam)

Δh = Perubahan enthalpy (kJ/kg)

2.3.3 Panas Yang Diserap *Furnace*

$$Q_f = W_{fuel} \times LHV \times \eta_f \text{ (kJ/kg)} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana (Muin, 1988) :

Q_f = Panas yang diserap *furnace* (kJ/kg)

W_{fuel} = Komsumsi bahan bakar (kg/jam)

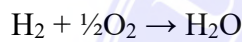
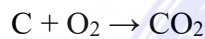
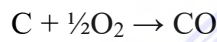
η_f = Efisiensi *furnace* (%)

LHV = *Low heating value* (kJ/kg)

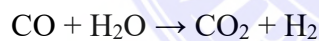
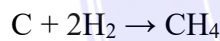
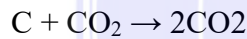
2.3.4 Kebutuhan Udara *Furnace*

Pembakaran biomassa sebagai bahan bakar umumnya dengan menggunakan 2 tahap yakni dengan (Atnaw et al., 2011) :

a. Pembakaran : biomassa + oksigen stoikiometri → panas hasil pembakaran



b. Grasifikasi : biomassa + oksigen → bahan bakar



Sisa hasil pembakaran yang diperoleh dari pembakaran *fiber* dan cangkang sangat berpengaruh terhadap rasio kombinasi biomassa dan udara. Kombinasi *fiber* dan cangkang yaitu 60 : 40 atau 70 : 30. Rasio udara untuk pembakaran optimal 12/1 dengan *Excess Air* (AE) maksimal 120 % rasio udara 16/1 dengan AE maksimal 150% (Leong, 1986).

Jumlah udara teoritis yang dibutuhkan untuk membakar bahan bakar, dapat dihitung dengan persamaan berikut (Djokosetyarjo, 1989) :

$$U_{teo} = \frac{100}{23,1} \times m_{o_2} \dots\dots\dots (2.4)$$

Untuk mendapatkan pembakaran optimal dari bahan bakar dibutuhkan penambahan udara sebesar aktual dapat diperoleh dengan persamaan dibawah ini :

$$U_{act} = 1,17 \times U_{teo} \dots\dots\dots (2.5)$$

Maka kebutuhan udara total adalah :

$$U_{act(total)} = U_{act} \times W_{fuel} \dots\dots\dots (2.6)$$

2.3.5 Efisiensi Thermal Boiler

Efisiensi thermal boiler yaitu perbandingan antara konsumsi panas dengan suplai panas, adapun rumus untuk mencari efisiensi boiler yaitu sebagai berikut (Muzaki & Mursadin, 2019) :

Efisiensi Boiler :

$$\eta_b = \frac{Q_{Berguna}}{Q_{Masuk}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.7)$$

Atau :

$$\eta_b = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)}{(h_3 - h_2)} \times 100 \%$$

Dimana :

- η_b = Efisiensi thermal boiler (%)
- h_1 = Enthalpy *Feed Water* (kJ/kg)
- h_2 = Enthalpy *daerator* (kJ/kg)
- h_3 = Enthalpy *Superheater* (kJ/kg)
- h_4 = Enthalpy *uap sisa* (kJ/kg)

2.3.6 Konsumsi Spesifik Bahan Bakar (SFC)

Konsumsi spesifik bahan bakar merupakan daya listrik yang dapat di bangkitkan oleh banyaknya bahan bakar dalam menghasilkan daya listrik. Konsumsi Spesifik Bahan Bakar dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Ginancar, 2019) :

$$SFC = \frac{W_{fuel}}{kWh} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana :

SFC : Konsumsi spesifik bahan bakar (kg/kWh)

W_{fuel} : Kebutuhan bahan bakar (kg/jam)

kWh : Daya output generator (kWh)

2.4 Biomassa Sebagai Bahan Bakar Boiler

Biomassa merupakan bahan biologis yang berasal dari organisme atau makhluk hidup baik hewan maupun tumbuhan. Dalam berbagai situasi, biomassa juga didefinisikan sebagai bahan-bahan organik berumur relatif muda yang berasal dari tumbuhan atau hewan, baik yang terbentuk dari hasil produksinya, sisa metabolismenya, ataupun limbah yang dihasilkannya.

Biomassa dapat di peroleh dari berbagai bidang industri budidaya, baik pertanian, perkebunan, kehutanan, peternakan, maupun perikanan. Biomassa umumnya mempunyai kadar volatile relatif tinggi, dengan kadar karbon rendah dan kadar abu lebih rendah dibandingkan batubara. Namun dengan penanganan yang tepat penggunaan biomassa dapat dijadikan sebagai sumber energi berkelanjutan untuk menggantikan energi fosil. Di Indonesia sendiri biomassa masih memiliki nilai ekonomis rendah karena penggunaannya masih secara tradisional.

Selain itu biomassa cukup ramah terhadap lingkungan. Hal ini dikarenakan biomassa dianggap sebagai karbon netral, yang berarti biomassa mengambil karbon dari atmosfer pada saat tanaman tumbuh, dan mengembalikannya ke udara ketika dibakar. Karena itulah, setidaknya menurut teori, terjadi siklus karbon tertutup tanpa peningkatan kadar karbon dioksida (CO₂) di atmosfer (April, 2013). Untuk mengetahui komposisi dari unsur-unsur kimia cangkang dan *fiber* dengan analisis ultimate, yaitu sebagai berikut (Pakpahan et al., 2021) :

Tabel 2. 3. Unsur-unsur kima *fiber* dan cangkang

Nama Unsur	<i>Fiber</i> (%)	Cangkang (%)
Carbon (C)	40,15	61,34
Hidrogen (H ₂)	4,25	3,25
Oksigen (O ₂)	30,12	31,16
Nitrogen (N ₂)	22,29	2,14
Sulfur (S)	0,19	0,9
Abu	3	1,21
Total	100	100

2.4.1 *Fiber*

Serat buah kelapa sawit ialah bagian dimana terdapat kandungan minyak kelapa sawit dan serat buah memiliki potensi limbah 13,0% dari setiap ton tandan buah segar kelapa sawit. Limbah serat buah kelapa sawit disebut juga sebagai *fiber press* dikarenakan untuk mendapatkan minyak pada serat buah akan dilakukan proses penekanan (*press*) pada stasiun *press*-an di pabrik kelapa sawit, setelah diambil minyaknya maka disebutlah sebagai limbah *fibre press*.

Gambar 2. 5. Serat Buah Kelapa Sawit (*Fiber*)

Nilai kalor bahan bakar merupakan hasil dari pembakaran bahan bakar pada saat terjadi oksidasi mengandung kandungan kimia yang terkandung pada bahan bakar *fiber* (Pakpahan et al., 2021).

Pada dasarnya *fiber* ini masih mengandung minyak dengan jumlah sedikit. Nilai Kalor yang terdapat pada *fiber* ini tergolong tinggi dengan HHV 13.879,523 kJ/kg dan LHV 10.639,523 kJ/kg, maka cukup berpotensi digunakan sebagai bahan bakar biomassa dan sebagai upaya mengurangi limbah sisa pengolahan (Ceki, 2017).

$$\begin{aligned} \text{HHV} &= (33.950 \times C) + 144.200 \left(\text{H}_2 - \frac{\text{O}_2}{8} \right) + 9.400 \times S \text{ kJ/kg} \dots\dots\dots (2.10) \\ &= (33.950 \times 0,4015) + 144.200 \left(0,0425 - \frac{0,3012}{8} \right) + 9.400 \times 0,0019 \\ &\text{kJ/kg} \\ &= 13.879,523 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Untuk mencari nilai LHV, uap air yang terbentuk dari hasil pembakaran tidak perlu dicairkan terlebih dahulu, sehingga panas pengembunannya tidak ikut serta dihitung dengan panas pembakaran bahan bakar tersebut. Berdasarkan rumus Dulong, maka nilai kalor bawah dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{LHV} &= \text{HHV} - 2.400 (M + 9\text{H}_2) \\ &= 16.673,39 - 2.400 \times (0,0411 + 9 \times 0,038) \\ &= 10.639,523 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

2.4.2 Cangkang

Cangkang kelapa sawit terdapat dalam buah kelapa sawit itu sendiri dan memiliki potensi limbah 6,5% dari setiap ton TBS, cangkang sendiri merupakan limbah kelapa sawit yang sudah terlebih dahulu memiliki nilai jual dikarenakan penggunaan cangkang kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler sudah lebih dahulu dilakukan. Cangkang kelapa sawit adalah bagian keras yang terdapat pada buah kelapa sawit yang berfungsi melindungi isi atau karnel dari buah sawit tersebut (Santoso, 2018).

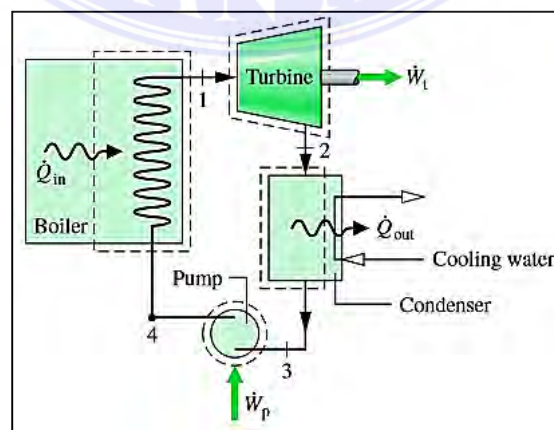
Kandungan nilai kalor yang terdapat pada cangkang sawit ini relatif tinggi. Nilai kalor atas (HHV) yaitu 23.529,47 kJ/kg dan nilai kalor bawah (LHV) yaitu 20.289,47 kJ/kg. Cangkang kelapa sawit ini cukup berpotensi digunakan sebagai bahan bakar boiler dan juga mengurangi limbah sawit (Saputra, 2015).



Gambar 2. 6. Cangkang Kelapa Sawit

2.5 Siklus Rankine

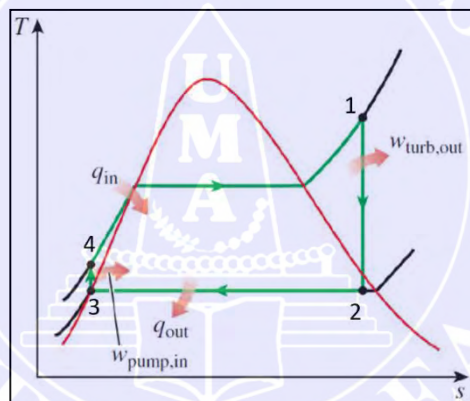
Siklus Rankine adalah sebuah siklus yang mengkonversi energi panas menjadi kerja atau energi gerak. Hal ini terlihat pada fluida yang bekerja didalamnya, yaitu adanya proses penguapan dan kondensasi. Oleh karena itu semua yang dihasilkan dari siklus rankine ini pastilah uap, dapat dilihat pada Gambar 2.7 (Pratama et al., 2021) sebagai berikut.



Gambar 2. 7. Komponen Siklus Rankine

Siklus Rankine yang ideal tidak melibatkan masalah ireversibilitas internal. Ireversibilitas internal hasil dari gesekan, throttling dan pencampuran fluida. Hal penting dalam siklus ini adalah ireversibilitas pada turbin dan pompa dan banyaknya kerugian tekanan pada penukaran panas, pipa, siku dan katup (Pratama et al., 2021). Fluida kerja pada siklus rankine ideal seperti pada Gambar 2.8 (Rohman, n.d.) mengalami serangkaian proses sebagai berikut :

- a. Proses 1-2 : Proses ekspansi isentropis pada turbin (W_{out})
- b. Proses 2-3 : Pembuangan panas secara isobar ke kondensor (Q_{out})
- c. Proses 3-4 : Penekanan isentropis oleh pompa (W_{in})
- d. Proses 4-1 : Penambahan panas secara isobar di boiler (Q_{in})



Gambar 2. 8. Diagram Siklus Rankine Ideal

Berdasarkan Gambar 2.8 yaitu diagram siklus Rankine menunjukkan proses aliran sederhana, dimana steam yang dihasilkan oleh boiler dibutuhkan oleh turbin untuk menghasilkan usaha. Siklus Rankin bekerja dengan cara mengubah panas menjadi kerja. Panas yang dihasilkan dari luar dengan aliran tertutup. Turbin memproduksi daya yang lebih besar dari yang dibutuhkan oleh pompa dan output daya bersih sama dengan selisih antara kecepatan input panas dalam boiler dan kecepatan penolakan panas dalam kondensor.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu

3.1.1 Tempat

Tempat dilaksanakanya penelitian adalah di PTPN II PKS Pagar Merbau, Jl. Lubuk Pakam, Sumberejo, Kec. Pagar Merbau, Kab. Deli Serdang, Sumatera Utara 20551.

3.1.2 Waktu

Penulis melaksanakan penlitian ini selama kurun waktu 2 bulan, dimulai dari bulan September 2022. Detail tahapan tugas akhir dapat dilihat pada Tabel 3.1 sebagai berikut :

Tabel 3. 1. Tahapan Tugas Akhir

Aktivitas	2022												2023																															
	Mei.				Jun.				Jul.				Agu.				Sep.				Okt.				Nov.				Des.				Jan.				Feb.				Maret			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4								
Pengajuan Judul	■	■	■	■																																								
Penyelesaian Proposal					■	■	■	■																																				
Seminar Proposal									■	■	■	■																																
Pengumpulan Data													■	■	■	■																												
Analisis Data																	■	■	■	■																								
Penyelesaian Proposal																					■	■	■	■																				
Seminar Hasil																									■	■	■	■																
Sidang Sarjana																													■	■	■	■												

3.2 Peralatan dan Bahan

3.2.1 Peralatan

1. Boiler

Peralatan yang dipakai pada penelitian ini adalah boiler merek Takuma N-600 SA dengan tipe *water tube boiler*. Menggunakan bahan bakar *Fiber* dan cangkang kelapa sawit, dengan spesifikasi detail dapat dilihat pada Tabel 3.2 sebagai berikut :

Tabel 3. 2. Spesifikasi Boiler

Boiler	Takuma N-600 SA
Tekanan Kerja	20 kg/cm ²
Kapasitas uap kerja	20.000 kg/jam
Output Daya Generator	500 kWh
Temperatur uap	Saturasi °C
Tahun	2022
Dirancang oleh	PT. Super Andalas Steel Indonesia
Tipe Boiler	<i>Water Tube Boiler</i>

Boiler Takuma ada beberapa model yaitu, model N dan NS dengan bahan bakar kayu, ampas tebu, *fiber*, *shell*, dan lain-lain. Boiler ini dirancang dengan sistem *balance draft* dan sirkulasi natural. Tipe dengan kontruksi dinding dapur yang sama sekali di dinginkan dengan air, yang dapat menyerap panas radiasi secara efektif dalam dapur pembakaran (*Combustion Camber*). Takuma N-600 SA mempunyai efisiensi yang sangat tinggi dan sangat fleksibel terhadap fluktuasi beban, boiler Takuma N-600 SA dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3. 1. Boiler PKS Pagar Merbau

2. Temperatur Monitor

Alat ukur ini dipasang pada bagian panel kontrol boiler, *Temperature Gauge* berfungsi mengukur tinggi nilai temperatur uap di dalam boiler secara kontinue.

Monitor temperatur dapat dilihat pada Gambar 3.2 sebagai berikut.



Gambar 3. 2. Temperatur Monitor

3. Tekanan Monitor

Tekanan Monitor atau *Pressure Gauge* yaitu alat yang berfungsi sebagai pengukur nilai tekanan uap boiler. Nilai tekanan kerja pada boiler dapat diketahui melalui monitor tekanan yang terlihat pada Gambar 3.3 sebagai berikut.



Gambar 3. 3. Tekanan Monitor

4. Laju Aliran Uap Monitor

Alat ukur laju aliran uap yaitu alat ukur yang digunakan untuk mendapatkan nilai laju aliran uap pada saat boiler sedang beroperasi. Monitor Steam Flow dapat dilihat pada Gambar 3.3 sebagai berikut.



Gambar 3. 4. Monitor *Steam Flow*

5. *Water Level Gauge*

Water Level Gauge (Gelas Penduga) yaitu alat yang difungsikan untuk mengetahui kondisi level air yang terdapat di dalam drum atas pada boiler. *Water Level Gauge* dapat dilihat pada Gambar 3.5 sebagai berikut.



Gambar 3. 5. *Water Level Gauge*

6. Fiber Conveyor dan Cangkang Conveyor

Conveyor ini difungsikan untuk menampung bahan bakar *fiber* dan cangkang yang dihasilkan dari proses pemisahan pada stasiun *nut* dan *carnele*. *Conveyor* ini juga berfungsi untuk mendistribusikan bahan bakar *fiber* yang jatuh dari *fiber cyclone* dan cangkang yang berasal dari *Light Tenera Dust Separator II* (LTDS II) menuju ke *Siding Fuel valve* boiler.

7. *Siding Fuel Valve*

Alat ini difungsikan untuk membuka atau menutup *fuel flow*. Berfungsi juga untuk mengontrol variasi campuran bahan bakar atau banyaknya jumlah bahan bakar *fiber* dan cangkang yang masuk kedalam ruang bakar boiler. Pengoperasian alat ini dapat dilakukan secara manual atau otomatis sehingga temperature boiler dapat terjaga dalam keadaan optimal.

3.2.2 Bahan

1. *Fiber*

Serabut kelapa sawit sebagian besar digunakan sebagai bahan bakar boiler di PTPN II PKS Pagar Merbau dapat dilihat pada Gambar 3.6 dibawah ini.



Gambar 3. 6. *Fiber*

2. Cangkang

Cangkang kelapa sawit selain memiliki nilai ekonomis karena dapat dijual, juga digunakan sebagai bahan bakar boiler. Cangkang kelapa sawit tersebut akan dicampur dengan *fiber*, dengan metode pencampuran yang sangat bervariasi hingga mencapai kinerja optimal boiler, sampel cangkang dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut ini.



Gambar 3. 7. Cangkang Kelapa Sawit

3.3 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu observasi langsung, metode yang digunakan dapat dijabarkan sebagai berikut :

3.3.1 Sistematika Penelitian

Sistematika pada analisis performa boiler berbahan bakar kombinasi *Fiber* dan Cangkang pada boiler Takuma N-600 SA sebagai berikut :

a. Studi Literatur

Untuk menyelesaikan identifikasi masalah, penulis melakukan literatur mengenai komposisi bahan bakar sehingga menyebabkan tingginya kebutuhan bahan bakar dan rendahnya efisiensi thermal boiler.

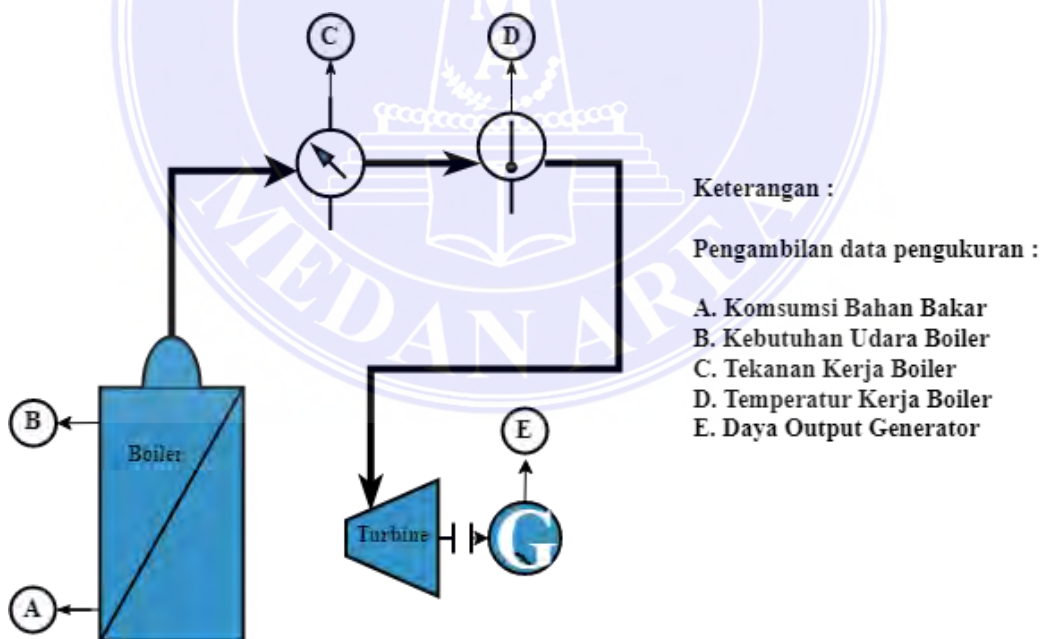
b. Observasi lapangan bertujuan untuk memperoleh data-data operasional boiler saat menggunakan bahan bakar *Fiber* dan Cangkang.

- c. Melakukan perhitungan terhadap kebutuhan bahan bakar dan nilai efisiensi thermal boiler.
- d. Menganalisis dan membandingkan nilai panas pada bahan bakar terhadap efisiensi thermal boiler.
- e. Menarik kesimpulan.

3.3.2 Parameter Pengukuran

Parameter yang akan diukur dalam analisis performa boiler berbahan bakar kombinasi *Fiber* dan Cangkang pada boiler Takuma N-600 SA adalah sebagai berikut:

- a. Tekanan Uap Boiler (kg/cm^2)
- b. Temperatur Uap Boiler ($^{\circ}\text{C}$)
- c. Daya Output Generator (kWh)



Gambar 3.1. Lokasi Titik Pengambilan Data

3.3.3 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah prosedur pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Menyiapkan peralatan dan bahan.
- b. Menentukan akurasi pembacaan alat ukur atau indikator berfungsi optimal.
- c. Bahan bakar boiler saat jam operasional dipastikan menggunakan bahan bakar *fiber* dan cangkang kelapa sawit

3.3.4 Teknik Pengumpulan dan Analisi Data

Penelitian ini dilaksanakan dengan dua sumber data yaitu data primer dan data sekunder.

1. Data Primer

Pengumpulan data primer diperoleh dari peninjauan langsung ke pabrik PTPN II PKS Pagar Merbau. Data primer tersebut berkenaan pada stasiun boiler yaitu sebagai berikut :

- a. Spesifikasi boiler
- b. Nilai kalor bahan bakar biomassa
- c. Persentase kombinasi bahan bakar biomasa
- d. Daya yang dihasilkan generator

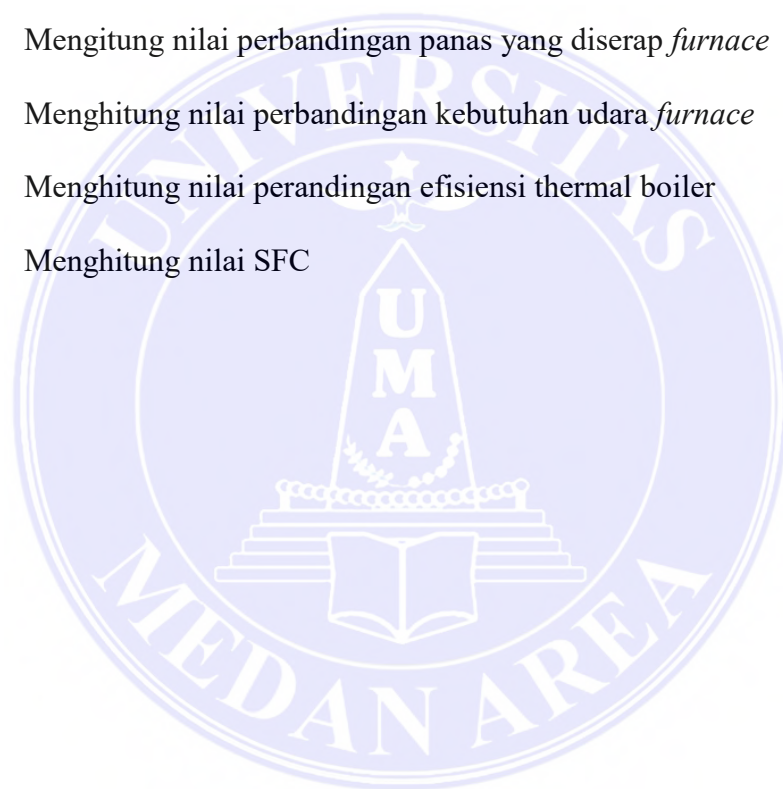
2. Data Sekunder

Data sekunder yaitu data diperoleh langsung dari pihak yang bersangkutan, dengan data sudah dipersiapkan oleh PTPN II PKS Unit Pagar Merbau, antara lain yaitu spesifikasi alat atau mesin, lembar data tentang kinerja boiler pada periode waktu yang lalu, kemudian penulis melakukan studi ke perpustakaan atau internet untuk mempelajari buku-buku atau hal-hal yang berkaitan dengan stasiun ketel uap.

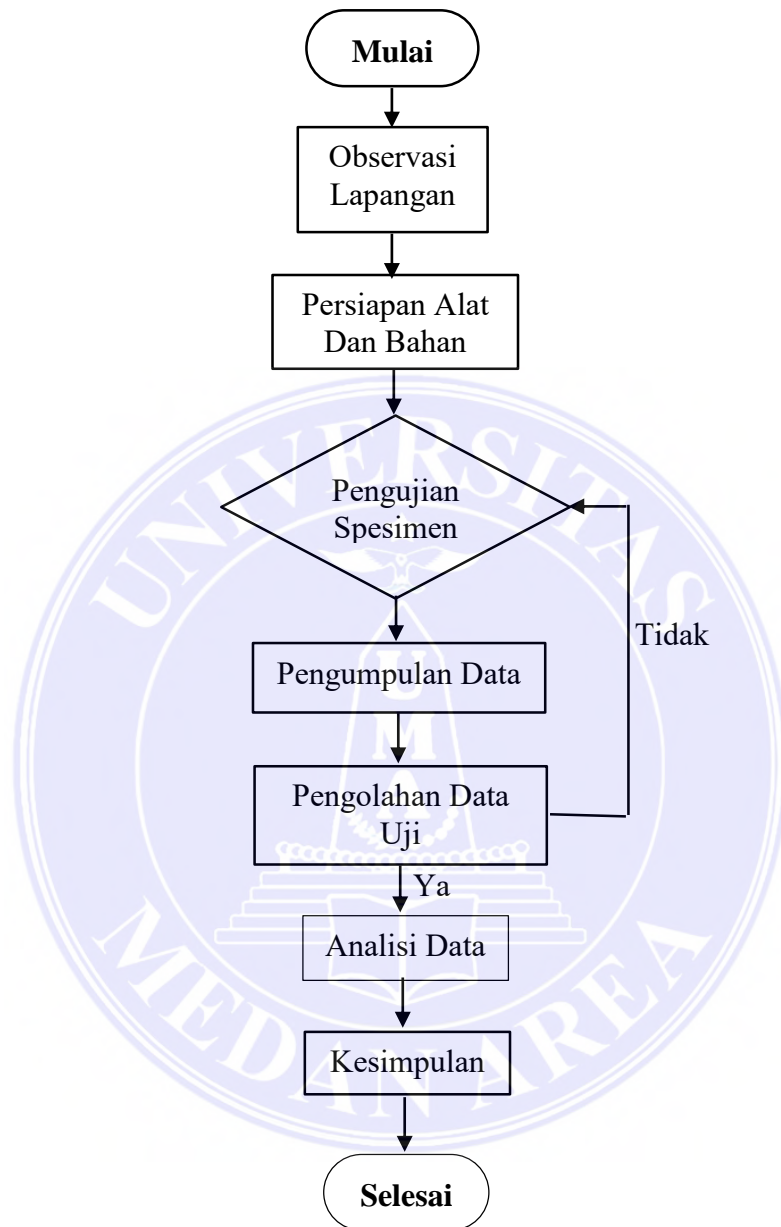
3. Analisis Data

Analisis data pada penelitian ini menggunakan metode perbandingan dan interpolasi untuk mengetahui optimasi performa boiler. Setelah semua data yang dibutuhkan terkumpul selanjutnya menghitung perbandingan terhadap variabel sebagai berikut :

- a. Menghitung nilai perbandingan kebutuhan bahan bakar
- b. Menghitung nilai perbandingan kebutuhan kalor boiler
- c. Menghitung nilai perbandingan panas yang diserap *furnace*
- d. Menghitung nilai perbandingan kebutuhan udara *furnace*
- e. Menghitung nilai perbandingan efisiensi thermal boiler
- f. Menghitung nilai SFC



3.4 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang sudah dilaksanakan pada boiler Takuma N-600 SA di Pabrik Kelapa Sawit PTPN II Pagar Merbau, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- a. Bahan bakar *fiber* 100% menghasilkan efisiensi thermal boiler 68,1% dengan kebutuhan bahan bakar 6.585,21 kg/jam. Kombinasi *fiber* 70% dan cangkang 30% menghasilkan menghasilkan 74,2% dengan kebutuhan bahan bakar 5.492,53 kg/jam. Efisiensi thermal meningkat 5% saat menggunakan bahan bakar kombinasi (*fiber* 70% dan cangkang 30%).
- b. SFC dengan rata-rata penggunaan daya 500 kWh, untuk menghasilkan daya tersebut membutuhkan 13,37 kg/kWh bahan bakar *fiber* 100%, dan membutuhkan bahan bakar kombinasi *fiber* 70% dan cangkang 30% sebanyak 10,98 kg/kWh.

5.2 Saran

Dari penelitian dan pengambilan data yang telah dilakukan, maka penulis memiliki beberapa saran yaitu :

- a. Untuk penelitian selanjutnya pada saat pengumpulan data di PKS Pagar Merbau supaya memperhatikan aturan- aturan yang ada, menggunakan APD supaya mengurangi resiko kecelakaan kerja.

- b. Agar proses pengolahan berjalan secara optimal, hendaknya meningkatkan mutu *maintenance* komponen pendukung operasional boiler.
- c. Untuk penelitian selanjutnya dapat membandingkan pengaruh *ph feed water* boiler untuk mengoptimalkan performa boiler.



DAFTAR PUSTAKA

- April. (2013). *Penyerapan gas CO hasil pembakaran sampah menggunakan Sorbent termodifikasi dalam reactor Fixed Bed.*
- Asmudi. (2010). *Analisa Unjuk Kerja Boiler Terhadap Penurunan Daya Pada PLTU PT. Indoesia Power UBP Perak.*
- Atnaw, S. M., Sulaiman, H. A., & Yusup, S. (2011). A simulation study of downdraft gasification of oil-palm fronds using ASPEN PLUS. In *Journal of Applied Sciences* (Vol. 11, Issue 11, pp. 1913–1920).
- Aulia, R. (2018). *Karakteristik Bahan Bakar Biomassa Jenis Tandan Kosong, Cangkang Dan Serat Kelapa Sawit Serta Pengaruh Timbulnya Pengotoran Alat Penukar Kalor Pada Ketel Uap.* Universitas Sumatera Utara.
- Badan Pusat Statistik. (2022). Catalog : 1101001. In D. D. Statistik (Ed.), *Statistik Indonesia 2022.* Badan Pusat Statistik.
- Ceki, E. R. (2017). *Analisis energi dan exergi beberapa bahan bakar biomassa untuk penggunaan pada boiler.* Universitas Sumatera Utara.
- Djokosetyardjo. (2003). *Ketel Uap Cetakan Kelima.* PT. Pradnya Paramita.
- Djokosetyarjo, M. J. (1989). *Ketel Uap.* PT. Pradnya Paramita.
- Djokosetyoarjo, M. . (1990). *Pembahasan Lebih Lanjut Tentang Ketel Uap* (P. Paramita (ed.)).
- Ginangjar, T. (2019). Analisa Kebutuhan Bahan Bakar Boiler Dengan Melakukan Uji Kalori Pada Pabrik Kelapa Sawit Pt. Sentosa Prima Agro. *Jurnal Mahasiswa Prodi Teknik Mesin.*
- Hasanudin, L., Imran, A. I., Gunawan, Y., Balaka, R., Sudia, B., Lolok, A., Aminur, A., Salimin, S., Samhudin, S., & Aksar, P. (2020). Analisis Spesifik Konsumsi Bahan Bakar Dengan Menggunakan Bahan Bakar Rendah Kalor. *Dinamika : Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 11(2), 50.
- Hasibuan, H. C., & Napitupulu, F. H. (2013). *Analisa Pemakaian Bahan Bakar Dengan Melakukan Pengujian Nilai Kalor Terhadap Performansi Ketel Uap Tipe Pipa Air.*
- Kamal, N. (2018). Karakterisasi dan Potensi Pemanfaatan Limbah Sawit. *Itenas*

Library.

Leong, W. L. (1986). *Control Of Black Smoke And Particulate Emission For Palm Oil Mill Boilers, Proc Nat Workshop On Recent Developments In Palm Oil Milling Technology Pollution Control (PORIM, Kuala Lumpur)*.

Muin, S. A. (1988). *Pesawat-pesawat konversi energi I*. Rajawali.

Muzaki, I., & Mursadin, A. (2019). Analisis Efisiensi Boiler Dengan Metode Input–Output Di Pt. Japfa Comfeed Indonesia Tbk. Unit Banjarmasin. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*.

Pakpahan, B., Silalahi, C., Gultom, D., Sihombing, E., Simanjuntak, J., Munthe, L., Panjaitan, P., Lubis, R., Teknik, J., Program, M., Teknik, S., Energi, K., Medan, P. N., Bulan, P., & Medan, K. (2021). *Uap Berbahan Bakar Cangkang Dan Serabut Dengan Kapasitas 20 Ton Uap*.

Pertamina. (1993). *Pedoman Operasi EXOR-1 Balongan Fasilitas Utility Unit 52 , JGC Corporation Dan Foster Wheeler (Indonesia) Limited*. Pertamina.

Pratama, F. D., Pribadi, Y. J., & Utomo, G. P. (2021). Penerapan Siklus Rankine Pada Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Sederhana Sebagai Media Pembelajaran. *Publikasi Online Mahasiswa Teknik Mesin*.

Rohman, I. (n.d.). *Siklus Renkine*. Retrieved September 8, 2022, from <https://independent.academia.edu/IfanRohman>

Santoso, A. R. (2018). *Karakteristik Bahan Bakar Ketel Uap dengan Biomassa Campuran Tandan Kosong, Cangkang, dan Serat Kelapa Sawit Serta Prediksi Pembakaran dengan Aspenplus*. Universitas Sumatera Utara.

Saputra, M. (2015). Analisis Pengujian Nilai Kalor Limbah Padat Kelapa Sawit Pada Pt. Syaukath Sejahtera Untuk Bahan Bakar Boiler. *ETD Unsyiah*.

Zhang, D. (2013). *Ultra-supercritical coal power plants: materials, technologies and optimization*. Woodhead Publishing.

LAMPIRAN

1. Perhitungan Kombinasi *Fiber* Dan Cangkang

Untuk menghitung perbandingan komposisi bahan bakar kombinasi dari kedua jenis bahan bakar yaitu *fiber* dan cangkang, maka dilakukan perbandingan konsumsi bahan bakar dengan satuan berat yang sama. Persentase komposisi bahan bakar kombinasi berdasarkan SOP PKS Pagar Merbau yaitu *fiber* 70% dan cangkang 30%. Maka, komposisi kandungan 1 kg bahan bakar yaitu sebagai berikut :

$$C = 0,70 (40,15) + 0,30 (61,34) = 46,507 \% = 0,46507$$

$$H_2 = 0,70 (4,25) + 0,30 (3,25) = 3,95 \% = 0,0395$$

$$O_2 = 0,70 (30,12) + 0,30 (31,16) = 30,432 \% = 0,30432$$

$$N_2 = 0,70 (22,29) + 0,30 (2,14) = 16,245 \% = 0,16245$$

$$S = 0,70 (0,19) + 0,30 (0,9) = 0,403 \% = 0,00403$$

$$\text{Abu} = 0,70 (3) + 0,30 (1,21) = 2,463 \% = 0,02463$$

Jumlah presentase 1 kg bahan bakar kombinasi *fiber* dan cangkang yaitu : 100 %

Dari data-data diatas maka penulis dapat mencari nilai *higher heating value* (HHV).

Kalori yang dihasilkan dari pembakaran 1 kg bahan bakar pada pembakaran sempurna.

Dalam membentuk kandungan energi panas bahan bakar, menggunakan analisis komposisi kimia persamaan Dulong dan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$HHV = (33.950 \times C) + 144.200 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9.400 \times S \text{ (kJ/kg)} \dots \dots \dots (2.10)$$

$$= (33.950 \times 0,46507) + 144.200 \left(0,0395 - \frac{0,30432}{8} \right) + 9.400 \times 0,00403$$

(kJ/kg)

$$= 16.039,34 \text{ kJ/kg}$$

Low Heating Value (LHV) merupakan nilai kalor terendah bahan bakar atau nilai kalor bawah. Dalam menentukan nilai LHV, uap air yang terbentuk dari hasil pembakaran tidak perlu dicairkan terlebih dahulu, sehingga panas pengembunannya tidak ikut serta dihitung dengan panas pembakaran bahan bakar tersebut. Berdasarkan rumus Dulong, maka nilai kalor bawah dapat dihitung sebahai berikut :

$$\begin{aligned} \text{LHV} &= \text{HHV} - 3.240 \text{ kJ/kg} \\ &= 16.039,343 \text{ kJ/kg} - 3.240 \text{ kJ/kg} \\ &= 12.799,34 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

2. Perhitungan Performa Boiler Menggunakan *Fiber* 100%

Boiler Takuma N-600 SA yang digunakan di PTPN II PKS unit Pagar Merbau menggunakan bahan bakar *fiber*. Performa boiler saat menggunakan bahan bakar *fiber* 100% adalah sebagai berikut :

Tabel Lampiran 1. Data Operasional Boiler Menggunakan *Fiber* 100%

Parameter	Nilai	Satuan
Kapasitas Uap Boiler (m_u)	19.000	kg/jam
Tekanan Uap Boiler (P_b)	18	kg/cm ²
Temperatur <i>Feed Water</i>	90	°C
Temperatur <i>Superheater</i>	261	°C
Enthalpy Air Umpan (h_1)	377,04	kJ/kg
Enthalpy Superheater (h_3)	2.926,4	kJ/kg
LHV <i>fiber</i>	10.639,5	kJ/kg
Efisiensi Thermal Boiler (η_{tb})	68,1	%

a. Kebutuhan Bahan Bakar (W_{fuel})

Banyaknya *fiber* yang digunakan sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan steam dengan kondisi optimal dapat dilihat pada Tabel 1 dan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$W_{fuel} = \frac{m_u (h_3 - h_1)}{\eta_{tb} \cdot LHV} \text{ kg/jam} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$= \frac{19.000 \text{ kg/jam} \times (2.926,4 - 377,04) \text{ kJ/kg}}{0,681 \times 10.639,52 \text{ kJ/kg}} \text{ kg/jam}$$

$$= 6.685,21 \text{ kg/jam}$$

b. Kebutuhan Kalor Boiler (Q)

Besarnya nilai kalor yang dihasilkan pada *furnace* dapat dihitung dengan menggunakan rumus dibawah ini :

$$Q = m_u \times \Delta h \text{ (kJ/jam)} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$= 19.000 \text{ kg/jam} \times (2.926,4 \text{ kJ/kg} - 377,04 \text{ kJ/kg})$$

$$= 48.437.840 \text{ kJ/jam}$$

$$= 48.437,84 \text{ MJ/jam}$$

c. Panas Yang Diserap *Furnace* (Q_f)

$$Q_f = W_{fuel} \cdot LHV \cdot \eta_f \text{ (kJ/jam)} \dots\dots\dots (2.3)$$

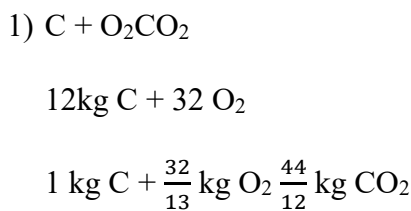
$$= 6.685,5 \text{ kg/jam} \times 10.639,5 \text{ kJ/kg} \times 0,681$$

$$= 48.439.787 \text{ kJ/kg}$$

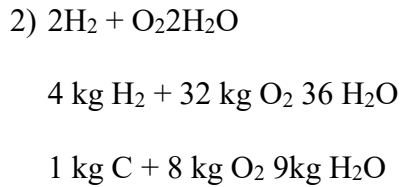
$$= 48.439,78 \text{ MJ/jam}$$

d. Kebutuhan Udara *Furnace* (U_{act.total})

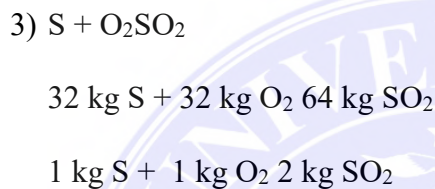
Dalam 1 kg bahan bakar fiber mengandung unsur Carbon (C) 0,4015 kg, Hidrogen (H₂) 0,0425 kg, Sulfur (S) 0,0019 kg. Komposisi kimia yang bereaksi dengan O₂ pada pembakaran sempurna yaitu C, H₂, dan S dengan reaksi kimia sebagai berikut :



Pembakaran setiap 1 kg C membutuhkan $\frac{32}{12}$ kg O₂ atau $0,4015 \times \frac{32}{12}$, maka O₂ yang dibutuhkan = 1,106 kg/kg bahan bakar.



Pembakaran 1 kg H₂ membutuhkan 8 kg O₂ atau $0,0425 \times 8$, maka O₂ yang dibutuhkan = 0,34 kg/kg bahan bakar.



Pembakaran setiap 1 kg S membutuhkan 1 kg O₂ atau $0,0019 \times 1$, maka O₂ yang dibutuhkan 0,0019 kg/kg bahan bakar.

Jumlah O₂ yang terkandung dalam bahan bakar *fiber* yaitu 0,3012 sehingga jumlah oksigen yang dibutuhkan pada proses pembakaran yaitu :

$$m_{o_2} = 1,106 + 0,34 + 0,0019 - 0,3012$$

$$= 1,1467 \text{ kg/kg bahan bakar}$$

Kebutuhan udara teoritis untuk pembakaran 1 kg bahan bakar *fiber* yaitu :

$$U_{teo} = \frac{100}{23,1} \times m_{o_2} \dots \dots \dots (2.4)$$

$$= \frac{100}{23,1} \times 1,1467 \text{ kg}$$

$$= 4,961 \text{ kg udara/kg bahan bakar}$$

Supaya terjadi pembakaran sempurna maka ditambah *Excess Air* (EA) 50%, maka udara aktual yaitu :

$$U_{act} = U_{teo} \cdot 1 + EA \dots \dots \dots (2.5)$$

$$= 4,961 \times 1 + 0,5$$

$$= 5,461 \text{ kg udara/kg bahan bakar}$$

Maka jumlah kebutuhan udara yang dimasukkan ke *furnace* yaitu :

$$U_{act.total} = U_{act} \times W_{fuel} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$= 5,461 \text{ kg udara/kg bahan bakar} \times 6.685,5 \text{ kg/jam}$$

$$= 36.509,51 \text{ kg udara/jam}$$

e. Efisiensi Thermal Boiler (η_{tb})

Berdasarkan data kinerja boiler menggunakan bahan bakar *fiber* 100%, maka untuk efisiensi boiler dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

Dimana :

Temperatur <i>feed water</i>	: 90 °C	(h ₁)= 2.660 kJ/kg
Temperatur <i>Daerator</i>	: 100 °C	(h ₂)= 2.675,6 kJ/kg
Temperatur <i>Superheater</i>	: 261 °C	(h ₃)= 2.926,4 kJ/kg
Temperatur Uap Sisa	: 145 °C	(h ₄)= 2.739,8 kJ/kg

$$\eta_{tb} = \frac{Q \text{ berguna}}{Q \text{ masuk}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.7)$$

Maka :

$$\eta_{tb} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 + h_4)}{(h_3 - h_2)} \times 100\%$$

$$= \frac{(2.660 - 2.675,6) + (2.926,4 + 2.739,8)}{(2.926,4 - 2.675,6)} \times 100 \%$$

$$= 0,681 \times 100 \%$$

$$\eta_{tb} = 68,1\%$$

f. Konsumsi Spesifik Bahan Bakar (SFC)

$$SFC = \frac{W_{fuel}}{kWh} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$= \frac{6.685,5 \text{ kg/jam}}{500 \text{ kWh}}$$

$$= 13,37 \text{ kg/kWh}$$

3. Perhitungan Performa Boiler Menggunakan Kombinasi *Fiber* 70% dan Cangkang 30%

Boiler Takuma N-600 SA yang digunakan di PTPN 2 PKS unit Pagar Merbau menggunakan bahan bakar *fiber* 100% + cangkang 30% . Performa boiler saat menggunakan bahan bakar kombinasi *fiber* dan cangkang dapat dilihat pada Tabel 2. sebagai berikut :

Tabel Lampiran 2. Performa Boiler Menggunakan Kombinasi *Fiber* 70% dan Cangkang 30%

Parameter	Nilai	Satuan
Kapasitas Uap Boiler (m_u)	20.000	kg/jam
Tekanan Uap Boiler (P_{boiler})	20	kg/cm ²
Temperatur <i>Feed Water</i>	90	°C
Temperatur Uap Boiler	285	°C
Enthalpy Air Umpan (h_1)	377,04	kJ/kg
Enthalpy Uap Boiler (h_3)	2.985,2	kJ/kg
LHV <i>fiber</i> 70% dan cangkang 30%	12.799,34	kJ/kg
Efisiensi Thermal Boiler (η_{tb})	0,742	%

a. Kebutuhan Bahan Bakar (W_{fuel})

Banyaknya *fiber* dan cangkang yang digunakan sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan *steam* dengan kondisi optimal dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$W_{fuel} = \frac{m_u \times (h_3 - h_1)}{\eta_{tb} \times LHV} \text{ (kg/jam)} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$= \frac{20.000 \text{ kg/jam} \times (2.985,2 - 377,04) \text{ kJ/kg}}{0,742 \times 12.799,34 \text{ kJ/kg}} \text{ (kg/jam)}$$

$$W_{fuel} = 5.492,53 \text{ kg/jam}$$

b. Kalor Yang Dibutuhkan Boiler (Q)

Besarnya nilai kalor yang dihasilkan pada *furnace* dapat dihitung dengan menggunakan rumus dibawah ini :

$$\begin{aligned}
 Q &= m_u \times \Delta h \text{ (kJ/kg)} \dots\dots\dots (2.2) \\
 &= 20.000 \text{ kg/jam} \times (2.985,2 - 377,04) \text{ kJ/kg} \\
 &= 52.163.200 \text{ kJ/kg} \\
 &= 52.163,20 \text{ MJ/kg}
 \end{aligned}$$

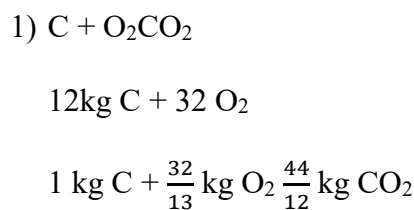
c. Panas Yang Diserap *Furnace* (Q_f)

Panas yang diserap *furnace* dari hasil pembakaran 70% fiber dan 30% cangkang dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

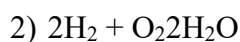
$$\begin{aligned}
 Q_f &= W_{fuel} \times LHV \times \eta_f \text{ (kJ/kg)} \dots\dots\dots (2.3) \\
 &= 5.492,5 \text{ kg/jam} \times 12.799,34 \text{ kJ/kg} \times 0,742 \\
 &= 52.162.878,2 \text{ kJ/kg} \\
 &= 52.162,87 \text{ MJ/kg}
 \end{aligned}$$

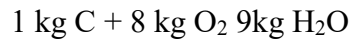
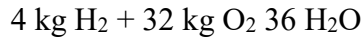
d. Kebutuhan Udara *Furnace* ($U_{act.total}$)

Dalam 1 kg bahan bakar kombinasi *fiber* dan cangkang mengandung unsur Carbon (C) 0,46507 kg, Hidrogen (H₂) 0,0395 kg, Sulfur (S) 0,00403 kg. Komposisi kimia yang bereaksi dengan O₂ pada pembakaran sempurna yaitu C, H₂, dan S dengan reaksi kimia sebagai berikut :

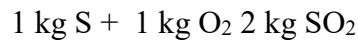
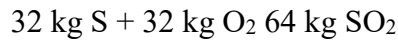
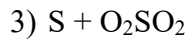


Pembakaran setiap 1 kg C membutuhkan $\frac{32}{12}$ kg O₂ atau $0,46507 \times \frac{32}{12}$, maka O₂ yang dibutuhkan = 1,240 kg/kg bahan bakar.





Pembakaran 1 kg H₂ membutuhkan 8 kg O₂ atau $0,0395 \times 8$, maka O₂ yang dibutuhkan = 0,316 kg/kg bahan bakar.



Pembakaran setiap 1 kg S membutuhkan 1 kg O₂ atau $0,00403 \times 1$, maka O₂ yang dibutuhkan = 0,00403 kg O₂/kg bahan bakar.

Jumlah O₂ yang terkandung dalam bahan bakar *fiber* yaitu 0,30432 sehingga jumlah oksigen yang dibutuhkan pada proses pembakaran yaitu :

$$\begin{aligned} m_{\text{O}_2} &= 1,240 + 0,316 + 0,00403 - 0,30432 \\ &= 1,2557 \text{ kg}_{\text{udara}}/\text{kg}_{\text{bahan bakar}} \end{aligned}$$

Kebutuhan udara teoritis untuk pembakaran 1 kg bahan bakar kombinasi *fiber* dan cangkang yaitu :

$$\begin{aligned} U_{\text{teo}} &= \frac{100}{23,1} \times m_{\text{O}_2} \dots\dots\dots (2.4) \\ &= \frac{100}{23,1} \times 1,2557 \text{ kg} \\ &= 5,435 \text{ kg}_{\text{udara}}/\text{kg}_{\text{bahan bakar}} \end{aligned}$$

Supaya terjadi pembakaran sempurna maka ditambah *Excess Air* (EA) 50%, maka udara aktual yaitu :

$$\begin{aligned} U_{\text{act}} &= U_{\text{teo}} \cdot 1 + \text{EA} \dots\dots\dots (2.5) \\ &= 5,435 \times 1 + 0,5 \\ &= 5,935 \text{ kg udara/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

Maka jumlah kebutuhan udara yang dimasukkan ke *furnace* yaitu :

$$\begin{aligned}
 U_{act.total} &= U_{act} \times W_{fuel} \dots\dots\dots (2.6) \\
 &= 5,935 \text{ kg}_{udara}/\text{kg}_{bahan bakar} \times 5.492,5 \text{ kg/jam} \\
 &= 32.597,9 \text{ kg}_{udara}/\text{jam}.
 \end{aligned}$$

e. Efisiensi Thermal Boiler (η_{tb})

Berdasarkan data kinerja boiler menggunakan bahan bakar kombinasi *fiber* 70% dan cangkang 30%, maka untuk efisiensi boiler dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

Dimana :

- Temperatur *feed water* : 90 °C (h_1) = 3.35,02 kJ/kg
- Temperatur daerator : 100 °C (h_2) = 2.675,6 kJ/kg
- Temperatur *superheater* : 285 °C (h_3) = 2.985,2,6 kJ/kg
- Temperatur uap sisa : 145 °C (h_4) = 2.739,8 kJ/kg

$$\eta_{tb} = \frac{Q \text{ keluar}}{Q \text{ masuk}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.7)$$

Maka :

$$\begin{aligned}
 \eta_{tb} &= \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)}{(h_3 - h_2)} \times 100 \% \\
 &= \frac{(2.660 - 2.675,6) + (2.985,2 - 2.739,8)}{(2.985,2 - 2.675,6)} \times 100 \% \\
 &= 0,742 \times 100 \% \\
 \eta_{tb} &= 74,2\%
 \end{aligned}$$

f. Konsumsi Spesifik Bahan Bakar (SFC)

Berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan bahan bakar menggunakan kombinasi *fiber* 70% dan cangkang 30%. SFC yang dihitung yaitu daya untuk pemakaian pengolahan maka, konsumsi spesifik bahan bakar dapat dihitung dengan persamaan 2.9 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{SFC} &= \frac{W_{fuel}}{\text{kWh}} \dots\dots\dots (2.8) \\ &= \frac{5.492,5 \text{ kg/jam}}{500 \text{ kWh}} \\ &= 10,98 \text{ kg/kWh} \end{aligned}$$

