

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan sektor industri di Indonesia semakin pesat, khususnya pada bidang agroindustri berbasis komoditas perkebunan. Salah satu subsektor yang memiliki kontribusi besar terhadap perekonomian nasional adalah industri kelapa sawit. Indonesia merupakan negara produsen kelapa sawit terbesar di dunia, dengan kapasitas produksi yang mencapai ratusan juta ton tandan buah segar (TBS) setiap tahunnya. Tingginya kapasitas produksi ini menuntut adanya sistem pengolahan yang efisien, baik dari segi teknis maupun energi, sehingga mampu menghasilkan minyak sawit mentah (*crude palm oil* – CPO) yang kompetitif di pasar global.

Dalam proses pengolahan kelapa sawit, keberadaan energi termal memegang peranan yang sangat penting. Energi panas dibutuhkan dalam berbagai tahapan produksi, mulai dari perebusan tandan buah segar, klarifikasi, hingga proses pengolahan lanjutan. Sumber energi panas tersebut diperoleh dari sistem boiler, yaitu suatu perangkat yang berfungsi menghasilkan uap (steam) dengan tekanan dan temperatur tertentu. Uap inilah yang kemudian dimanfaatkan sebagai penggerak turbin maupun sebagai media pemanas dalam proses produksi.

Salah satu jenis boiler yang banyak digunakan pada pabrik kelapa sawit di Indonesia adalah Boiler Takuma N-600 SA. Boiler ini dirancang dengan kapasitas dan spesifikasi teknis yang sesuai untuk kebutuhan industri kelapa sawit, khususnya dalam memanfaatkan limbah padat hasil produksi sebagai bahan bakar. Limbah padat utama yang tersedia dalam jumlah besar di pabrik kelapa sawit adalah fiber (serat buah sawit)

dan cangkang (shell). Keduanya merupakan hasil samping dari proses pengepresan tandan buah segar, dan jika tidak dimanfaatkan dengan baik, berpotensi menimbulkan masalah lingkungan.

Pemanfaatan fiber dan cangkang sebagai bahan bakar boiler merupakan bentuk penerapan konsep *waste to energy*, yaitu pemanfaatan limbah industri sebagai sumber energi alternatif. Fiber memiliki sifat mudah terbakar karena kandungan volatile matter yang cukup tinggi, namun nilai kalor yang dihasilkan relatif rendah. Sebaliknya, cangkang memiliki densitas tinggi dan kandungan karbon yang lebih besar sehingga menghasilkan nilai kalor tinggi, tetapi laju pembakarannya relatif lebih lambat dibandingkan fiber. Dengan demikian, pemanfaatan keduanya sebagai bahan bakar campuran (co-firing) menjadi strategi penting untuk mencapai keseimbangan antara kemudahan penyalaan dan kestabilan energi panas yang dihasilkan.

Efisiensi dan kinerja boiler sangat dipengaruhi oleh rasio campuran fiber dan cangkang. Komposisi yang tidak tepat dapat menyebabkan permasalahan, seperti ketidakstabilan api, peningkatan residu abu, hingga menurunnya efisiensi termal boiler. Sebaliknya, pemilihan rasio campuran yang sesuai akan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi, kestabilan operasi, serta umur pakai peralatan. Oleh karena itu, analisis yang komprehensif mengenai efisiensi dan kinerja Boiler Takuma N-600 SA melalui variasi pemanfaatan campuran fiber dan cangkang menjadi relevan untuk dikaji secara ilmiah.

Dari sisi kebijakan energi nasional, pemanfaatan fiber dan cangkang sebagai bahan bakar sejalan dengan program pemerintah dalam pengembangan energi baru terbarukan (EBT). Hal ini penting mengingat ketergantungan terhadap bahan bakar

fosil seperti batu bara dan minyak bumi semakin menimbulkan tantangan, baik dari segi ketersediaan maupun dampak lingkungan. Dengan demikian, penelitian mengenai efisiensi dan kinerja boiler berbahan bakar limbah sawit tidak hanya bernilai ekonomis, tetapi juga memiliki kontribusi terhadap pencapaian target bauran energi nasional yang berorientasi pada keberlanjutan lingkungan.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini difokuskan pada analisis efisiensi dan kinerja Boiler Takuma N-600 SA dengan memanfaatkan kombinasi bahan bakar fiber dan cangkang. Kajian ini diharapkan mampu memberikan gambaran empiris mengenai pengaruh variasi rasio campuran terhadap performa boiler, sekaligus memberikan rekomendasi teknis bagi industri dalam rangka meningkatkan efisiensi energi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh kombinasi bahan bakar fiber dan cangkang terhadap efisiensi termal Boiler Takuma N-600 SA?
2. Bagaimana kinerja operasional Boiler Takuma N-600 SA jika digunakan dengan variasi rasio campuran fiber dan cangkang?
3. Rasio campuran fiber dan cangkang seperti apa yang dapat menghasilkan kinerja boiler yang paling optimal?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis efisiensi termal Boiler Takuma N-600 SA melalui pemanfaatan campuran fiber dan cangkang sebagai bahan bakar.
2. Mengevaluasi kinerja operasional boiler berdasarkan variasi komposisi campuran fiber dan cangkang.
3. Menentukan rasio optimal antara fiber dan cangkang yang dapat menghasilkan kinerja boiler paling efisien.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat dari berbagai aspek, antara lain:

1. Hasil penelitian dapat menjadi referensi ilmiah bagi mahasiswa, akademisi, maupun peneliti yang berkecimpung dalam bidang energi terbarukan, teknik mesin, maupun teknik industri, khususnya terkait analisis kinerja boiler berbahan bakar biomassa.
2. Penelitian ini dapat memberikan masukan teknis kepada pihak manajemen pabrik kelapa sawit dalam menentukan strategi pemanfaatan limbah padat (fiber dan cangkang) secara optimal untuk meningkatkan efisiensi operasional boiler.
3. Dengan memaksimalkan penggunaan limbah internal sebagai sumber energi, industri dapat menekan biaya produksi, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar tambahan, serta meningkatkan daya saing produk CPO di pasar global.
4. Pemanfaatan fiber dan cangkang sebagai bahan bakar dapat mengurangi potensi pencemaran lingkungan akibat akumulasi limbah padat, sekaligus mendukung pengurangan emisi karbon yang dihasilkan dari penggunaan bahan bakar fosil.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih fokus dan terarah, maka diberikan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian hanya difokuskan pada Boiler Takuma N-600 SA yang digunakan pada pabrik kelapa sawit.
2. Bahan bakar yang dikaji terbatas pada fiber dan cangkang, tanpa melibatkan bahan bakar lain seperti batu bara atau tandan kosong.
3. Analisis kinerja boiler dibatasi pada efisiensi termal dan parameter operasional (seperti konsumsi bahan bakar, tekanan uap, dan temperatur uap).
4. Aspek ekonomi dan lingkungan hanya dibahas secara umum, tidak dianalisis secara kuantitatif mendalam.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini disusun sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN, menguraikan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA, membahas teori-teori dasar mengenai boiler, konsep efisiensi termal, karakteristik bahan bakar biomassa khususnya fiber dan cangkang.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN, Menjelaskan lokasi penelitian, objek penelitian, alat dan bahan, variabel yang diamati, metode pengumpulan data, serta teknik analisis.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN, menyajikan hasil penelitian terkait efisiensi dan kinerja boiler berdasarkan variasi komposisi bahan bakar, disertai pembahasan

mendalam dengan membandingkan teori dan penelitian sebelumnya.

BAB V PENUTUP, memuat kesimpulan yang diperoleh dari penelitian serta saran yang dapat dijadikan acuan bagi penelitian lanjutan maupun implementasi di industri.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

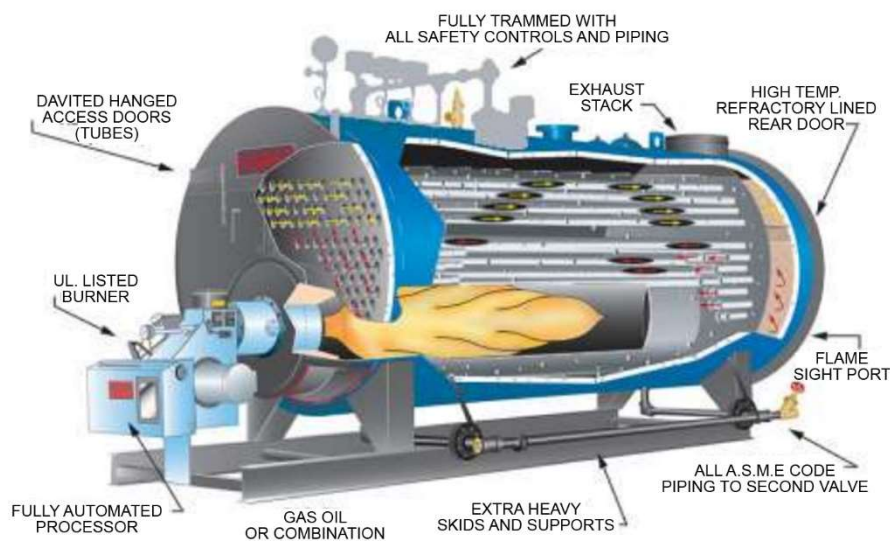
2.1 Boiler

Boiler merupakan suatu peralatan yang digunakan untuk menghasilkan steam(uap) dalam berbagai keperluan. Air di dalam boiler dipanaskan oleh panas dari hasil pembakaran bahan bakar (sumber panas lainnya) sehingga terjadi perpindahan panas dari sumber panas tersebut ke air yang mengakibatkan air tersebut menjadi panas atau berubah wujud menjadi uap. Air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah dibanding dengan air yang lebih dingin, sehingga terjadi perubahan berat jenis air di dalam boiler. Air yang memiliki berat jenis yang lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar (MF Syahputra.2018). Fungsi dari boiler adalah menghasilkan uap yang digunakan untuk kebutuhan proses pabrik, dan membangkitkan listrik untuk kebutuhan pabrik maupun perumahan karyawan di sekitar pabrik. Adanya pengaruh pengotoran baik yang ditimbulkan dari bahan bakar maupun air umpan sangat berpengaruh terhadap efisiensi boiler (Asmudi, 2017). Klasifikasi Boiler secara umum dibagi dua yaitu, Boiler pipa api dan Boiler pipa air. Jenis Boiler pipa api banyak digunakan oleh industri yang memerlukan tekanan uap yang relatif rendah, misalnya pabrik-pabrik gula. Sedangkan jenis pipa air digunakan oleh industri/pembangkit listrik yang memerlukan tekanan uap yang tinggi, misalnya pada pusat-pusat listrik tenaga uap.

2.2 Jenis-Jenis Boiler

2.2.1 Boiler Pipa Api (Fire tube boiler)

Boiler pipa api merupakan pengembangan dari ketel lorong api dengan menambah pemasangan pipa-pipa api, dimana gas panas hasil pembakaran dari ruang bakar mengalir didalamnya, sehingga akan memanasi dan menguapkan air yang berada di sekeliling pipa –pipa api tersebut. Dalam perancangan boiler ada beberapa faktor penting yang harus dipertimbangkan agar boiler yang direncanakan dapat bekerja dengan baik sesuai dengan yang dibutuhkan. Untuk lebih jelas boiler pipa api tipe vertikal dapat dilihat pada gambar 2.1



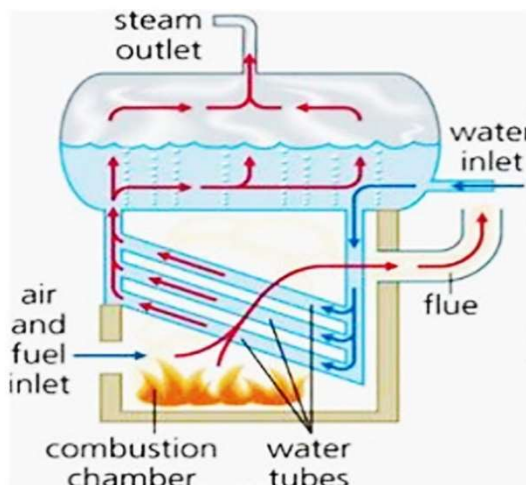
Gambar 2.1. Boiler Pipa Api

Fire tube boiler termasuk jenis boiler yang relatif sederhana dan umumnya berkapasitas kecil, sekitar 10 ton per jam dengan tekanan 16 kg/cm². Oleh karena itu, boiler ini dikategorikan sebagai boiler bertekanan rendah. Karena menghasilkan kapasitas, tekanan, dan suhu uap yang rendah, fire tube boiler jarang dipakai dalam

proses pengolahan modern. Kekurangannya adalah membutuhkan waktu lama untuk mencapai tekanan operasi pada awal penggunaan. Namun, keunggulannya terletak pada kemampuannya yang fleksibel dalam menyesuaikan diri dengan perubahan beban secara cepat.

2.2.2 Ketel Pipa Air (Water tube boiler)

Ketel pipa air (*water tube boiler*) merupakan jenis ketel uap di mana air atau uap berada di dalam pipa-pipa atau tabung, sedangkan aliran gas panas atau asap hasil pembakaran berada di bagian luar pipa. Pada sistem *water tube boiler*, air umpan dialirkan melalui pipa-pipa menuju drum, kemudian uap terbentuk akibat sirkulasi air yang dipanaskan oleh gas hasil pembakaran pada ruang pemanas, sehingga terjadi proses penguapan di dalam drum. Sebagai salah satu jenis ketel uap modern, *water tube boiler* umumnya dirancang untuk beroperasi pada tekanan yang sangat tinggi dengan kapasitas produksi uap berkisar antara 4.500 hingga 12.000 kg per jam.



Gambar 2.2 Water tube boiler

Secara umum, *water tube boiler* terdiri atas beberapa drum (umumnya 2 hingga

4 buah) yang terhubung dengan pipa-pipa eksternal. Sambungan antara ujung pipa dengan drum biasanya dilakukan melalui proses *rolling* atau ekspansi, dan dalam beberapa kasus diperkuat dengan teknik pengelasan (*seal welded*) untuk meningkatkan kekuatan dan keandalannya. Apabila kapasitas boiler melebihi 20 MW atau tekanan operasionalnya lebih besar dari 24 bar, maka ketel ini dianggap layak untuk digunakan dalam produksi uap skala besar, khususnya uap *superheated* (Dalimunthe, 2016).

Penggunaan *water tube boiler* dinilai lebih unggul karena memiliki respons yang cepat terhadap perubahan beban serta kelembaman panas termal yang relatif rendah. Oleh karena itu, dalam unit pengolahan modern, jenis ketel ini banyak dipilih karena mampu menghasilkan uap dengan kapasitas, temperatur, dan tekanan tinggi yang sesuai dengan kebutuhan industri.

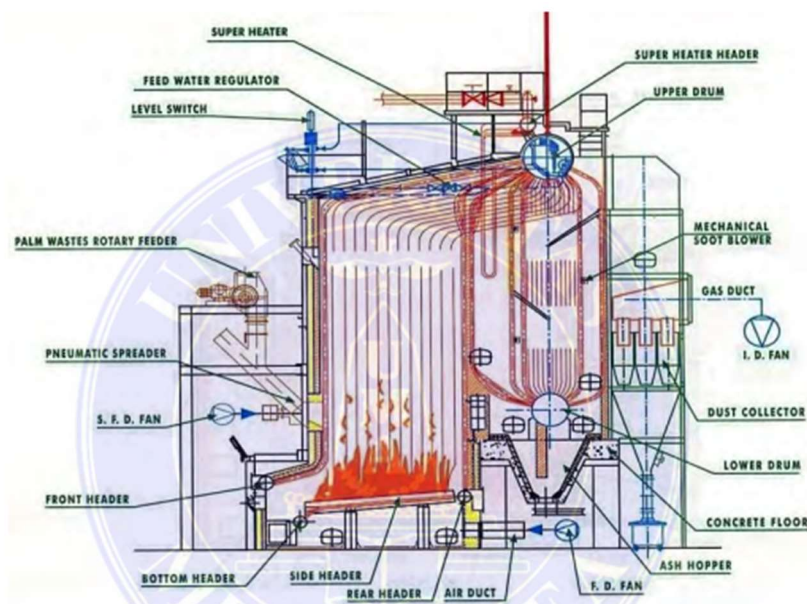
2.2.3 Prinsip Kerja Boiler

Prinsip kerja boiler didasarkan pada proses pemanasan air yang terdapat di dalam *steam drum* melalui panas hasil pembakaran bahan bakar di dalam *furnace*. Energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut ditransfer ke air, sehingga air di dalam *steam drum* mengalami perubahan fase menjadi uap. Perbedaan temperatur yang terjadi menyebabkan adanya variasi massa jenis air di dalam boiler. Air dengan temperatur lebih tinggi memiliki massa jenis lebih rendah sehingga cenderung naik, sedangkan air dengan temperatur lebih rendah dan massa jenis lebih tinggi bergerak turun ke bagian dasar. Mekanisme sirkulasi alami ini mendukung terjadinya proses perpindahan panas secara berkesinambungan di dalam sistem boiler (Djokosetyardjo, 1990).

Dengan demikian, prinsip kerja boiler secara fundamental adalah mengubah serta memindahkan energi panas dari bahan bakar hasil pembakaran menjadi energi panas yang tersimpan dalam uap air.

2.2.4 Komponen Boiler

Untuk merubah air menjadi uap pada boiler perlu dilakukan langkahlangkah 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 2.3.



Gambar 2.3. 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

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 Demper ini mempunyai fungsi yang sama yakni untuk mengumpulkan abu atau wadah abu hasil pembakaran.

2.2.5 Material Pipa Boiler

Keandalan suatu konstruksi merupakan salah satu faktor utama yang menentukan upaya peningkatan produktivitas, di mana umur pakai material menjadi aspek yang paling esensial. Umur pakai material pada umumnya ditentukan oleh karakteristik mekanik yang dimilikinya, antara lain tingkat kekerasan, kekuatan tarik, ketahanan terhadap beban kejut (*impact*), ketahanan terhadap serangan korosi, serta kemampuan material untuk tetap berfungsi optimal pada kondisi temperatur tinggi (Zhang, 2013).

2.2.5 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 :

1. 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 2.1 sebagai berikut (Pertamina, 1993) :

Tabel 2.1. Feed Water Boiler

No	Item	Unit	Feed Water	Boiler Water
1	pH velue (at 25 ⁰ C)	-	8.0 – 9.0	9.2 – 10.8
2	Hardness (as CaCO ₃)	pp	0	-
3	Oil Countent	Pp	Maintain at nealu “0”	-
4	Dissolved O 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	-	<5
13	Silica SiO ₂	ppm	<0.2	<5
13	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 :

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

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) :

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

Dimana :

Q = Kalor pembakaran (kg/jam)

m_u = Massa uap (kg/jam)

Δ_h = Perubahan enthalpy (kJ/kg)

2.3.3 Panas Yang Diserap Furnace

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

Dimana

Q_f = Panas yang diserap furnace (kJ/kg)

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

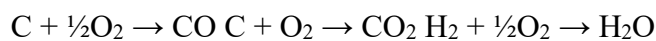
η_f = Efisiensi furnace (%)

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 \rightarrow panas hasil pembakaran



b. Grasifikasi : biomassa + oksigen \rightarrow bahan bakar



Sisa hasil pembakaran yang dihasilkan dari proses pembakaran fiber dan cangkang sangat memengaruhi rasio perbandingan antara biomassa dan udara. Kombinasi penggunaan fiber dan cangkang umumnya berada pada rasio 60 : 40 atau 70 : 30. Untuk mencapai pembakaran yang optimal, rasio udara terhadap bahan bakar ditetapkan sebesar 12 : 1 dengan nilai *Excess Air (EA)* maksimum 120%, sedangkan

pada rasio udara 16 : 1 nilai *Excess Air* maksimum dapat mencapai 150% (Leong, 1986). Kebutuhan udara teoritis untuk proses pembakaran bahan bakar dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Djokosetyarjo, 1989):

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

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

$$U_{act} = 1,17 \times U_{teo}$$

Maka kebutuhan udara total adalah :

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

2.3.5 Efisiensi Thermal Boiler

Efisiensi termal pada boiler didefinisikan sebagai perbandingan antara energi panas yang dikonsumsi dengan energi panas yang disuplai. Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung efisiensi boiler dapat dinyatakan sebagai berikut (Muzaki & Mursadin, 2019):

$$\eta_b = Q_{Berguna}/Q_{masuk} \times 100\%$$

atau

$$\eta_b = ((h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)) / ((h_3 - h_2)) \times 100\%$$

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 didefinisikan sebagai jumlah bahan bakar yang digunakan untuk membangkitkan daya listrik dalam jumlah tertentu. Besarnya konsumsi spesifik bahan bakar dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Ginanjar, 2019):

$$SFC = W_{fuel}/kWh$$

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 salah satu sumber energi terbarukan yang berasal dari material organik, mencakup limbah pertanian, limbah industri, serta produk sampingan hasil pengolahan bahan alami. Sebagai energi alternatif, biomassa telah lama dimanfaatkan untuk menggantikan peran bahan bakar fosil dalam berbagai bentuk, baik padat, cair, maupun gas. Dalam sektor industri, khususnya pada industri kelapa sawit, jenis biomassa yang umum digunakan antara lain cangkang kelapa sawit (*palm kernel shell*) dan serat mesokarp (*mesocarp fiber*). Pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar dinilai memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi energi sekaligus menekan dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh penggunaan bahan bakar fosil.

Pada boiler yang menggunakan biomassa sebagai bahan bakar, proses

pembakaran berlangsung di dalam ruang bakar yang dirancang khusus untuk memaksimalkan pemanfaatan energi dari biomassa. Dengan demikian, karakteristik biomassa seperti nilai kalor, kadar air, serta kandungan abu—memiliki peran krusial dalam mempengaruhi tingkat efisiensi pembakaran maupun kinerja keseluruhan boiler.

Pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar pada boiler memberikan berbagai manfaat yang signifikan, mencakup aspek ekonomi, lingkungan, serta keberlanjutan industri, antara lain:

1. Reduksi Emisi Karbon

Keunggulan utama dari pemanfaatan biomassa adalah kemampuannya dalam menekan emisi karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil. Sebagai material organik, biomassa menyerap karbon dioksida dari atmosfer selama masa pertumbuhannya, sehingga emisi yang dilepaskan ketika dibakar dianggap bersifat netral karbon. Dengan demikian, penggunaan biomassa dalam boiler berkontribusi pada penurunan jejak karbon industri serta mendukung upaya mitigasi perubahan iklim.

2. Sumber Energi Terbarukan dan Berkelanjutan

Biomassa termasuk dalam kategori energi terbarukan yang dapat dihasilkan secara berkesinambungan melalui pengelolaan sumber daya alam yang tepat. Pemanfaatannya dalam proses pembakaran boiler mampu mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil yang ketersediaannya terbatas, sekaligus meminimalisasi dampak negatif terhadap lingkungan akibat ekstraksi energi fosil.

3. Optimalisasi Pengelolaan Limbah

Pada industri kelapa sawit, biomassa berupa serat (*fiber*) dan cangkang merupakan hasil sampingan dari proses pengolahan. Dengan menjadikannya sebagai bahan bakar, volume limbah yang berpotensi mencemari lingkungan dapat ditekan, sekaligus meningkatkan efisiensi pengelolaan limbah. Pendekatan ini tidak hanya menurunkan biaya penanganan limbah, tetapi juga memperkuat citra industri sebagai entitas yang ramah lingkungan.

4. Efisiensi Ekonomi

Penggunaan biomassa, khususnya limbah seperti serat dan cangkang kelapa sawit, dapat mengurangi biaya operasional boiler karena harganya relatif lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil, seperti batu bara atau minyak. Selain itu, pemanfaatan biomassa juga menekan ketergantungan pada pasokan bahan bakar eksternal yang cenderung tidak stabil akibat fluktuasi harga pasar.

Selain itu, biomassa dikenal lebih ramah lingkungan karena dianggap sebagai sumber energi karbon netral. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa tumbuhan menyerap karbon dioksida (CO₂) dari atmosfer selama masa pertumbuhannya, kemudian melepaskan kembali karbon tersebut ke udara ketika biomassa dibakar. Dengan demikian, secara teoretis terjadi siklus karbon tertutup tanpa menambah konsentrasi CO₂ di atmosfer (April, 2013).

Untuk mengetahui kandungan unsur kimia dalam cangkang dan serat (*fiber*), dilakukan analisis *ultimate* sebagaimana ditunjukkan oleh penelitian sebelumnya (Pakpahan et al., 2021).

1. Serat (Fibre)

Serat (*fiber*) merupakan limbah kelapa sawit yang berasal dari proses pemerasan buah sawit pada tahap pengempaan (*press*). Limbah ini berbentuk serabut pendek menyerupai benang dengan warna kuning kecokelatan. Dari setiap pengolahan 1 ton tandan buah segar (TBS), dihasilkan sekitar 120–140 kg serat atau setara dengan 12–14% dari total TBS yang diproses (Thomas B. Frickle, 2009).

Serat ini merupakan residu sisa perasan buah sawit berbentuk serabut halus yang menyerupai benang, dengan kandungan protein kasar sekitar 4%, serat kasar 36% (terdiri atas lignin sekitar 26%), serta nilai kalor berkisar antara 2.637–3.998 kkal/kg. Sebagai salah satu limbah padat pabrik kelapa sawit, serat kelapa sawit berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif. Limbah ini dihasilkan dalam bentuk ampas serabut (*fiber*) melalui unit *screw press* dan selanjutnya diproses pada stasiun *fiber cyclone*.



Gambar 2.4 Serat (Fibre) Kelapa Sawit

2. Cangkang

Cangkang kelapa sawit merupakan bagian keras dari buah kelapa sawit yang berfungsi melindungi inti atau kernel di dalamnya. Limbah ini memiliki potensi sekitar 6,5% dari setiap ton tandan buah segar (TBS) yang diolah. Berbeda dengan serat,

cangkang kelapa sawit telah lebih dahulu memiliki nilai ekonomi karena sejak lama dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler dalam industri pengolahan kelapa sawit (Santoso, 2018).

Cangkang kelapa sawit memiliki kandungan nilai kalor yang tergolong tinggi, dengan nilai kalor atas (*Higher Heating Value/HHV*) sebesar 23.529,47 kJ/kg dan nilai kalor bawah (*Lower Heating Value/LHV*) sebesar 20.289,47 kJ/kg. Dengan karakteristik tersebut, cangkang kelapa sawit berpotensi besar dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler sekaligus berperan dalam mengurangi jumlah limbah kelapa sawit (Saputra, 2015).



Gambar 2.5. Cangkang Kelapa Sawit

2.5 Boiler Takuna

Boiler merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pembangkitan energi maupun proses industri, yang berfungsi mengubah energi panas hasil pembakaran bahan bakar menjadi energi termal dalam bentuk uap air (*steam*). Jenis dan desain boiler bervariasi, salah satunya adalah *water tube boiler* yang memiliki efisiensi dan kapasitas tinggi, sehingga banyak digunakan pada sektor industri berskala

besar.

Boiler Takuma N-600 SA merupakan salah satu jenis *water tube boiler* yang dirancang dengan kapasitas uap menengah hingga besar, sesuai untuk kebutuhan industri pengolahan, termasuk pabrik kelapa sawit. Pada sistem ini, air dialirkan melalui pipa-pipa (*water tube*) dan dipanaskan oleh gas hasil pembakaran bahan bakar (*fiber* maupun *cangkang sawit*) yang mengalir di sekitar pipa. Proses perpindahan panas terjadi melalui konduksi, konveksi, dan radiasi, hingga air mencapai titik didih dan berubah menjadi uap bertekanan tinggi.

Adapun karakteristik utama dari Boiler Takuma N-600 SA meliputi:

1. Tipe Konstruksi

Menggunakan desain *water tube* dengan beberapa drum utama yang terhubung melalui pipa-pipa, sehingga memungkinkan sirkulasi air yang lebih efisien serta mampu menghasilkan uap dengan kapasitas besar dan tekanan tinggi.

2. Bahan Bakar

Boiler ini umumnya menggunakan biomassa sebagai bahan bakar utama, terutama *fiber* (serat) dan *palm kernel shell* (cangkang kelapa sawit) yang merupakan limbah dari industri kelapa sawit. Hal ini menjadikan boiler tidak hanya efisien secara energi, tetapi juga ramah lingkungan karena memanfaatkan limbah biomassa sebagai sumber energi terbarukan.

3. Kapasitas dan Kinerja

Boiler Takuma N-600 SA dirancang untuk menghasilkan uap dengan kapasitas tinggi (hingga ratusan ton per jam) dengan tekanan kerja menengah hingga tinggi. Hal ini menjadikannya sangat cocok digunakan dalam industri pengolahan kelapa

sawit yang membutuhkan kontinuitas suplai uap untuk proses sterilisasi, pengempaan, pemurnian minyak, hingga pengeringan.

4. Efisiensi dan Keandalan

Dengan desain modern, boiler ini memiliki efisiensi pembakaran yang tinggi karena dilengkapi sistem pengendalian suplai udara dan bahan bakar. Selain itu, penggunaan material konstruksi yang tahan panas dan korosi meningkatkan umur pakai serta keandalan operasional boiler dalam jangka Panjang

5. Aspek Lingkungan

Pemanfaatan fiber dan cangkang sawit sebagai bahan bakar membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil sekaligus menekan emisi karbon. Selain itu, penggunaan limbah padat kelapa sawit sebagai sumber energi mendukung prinsip *circular economy* dalam industri berbasis agro.