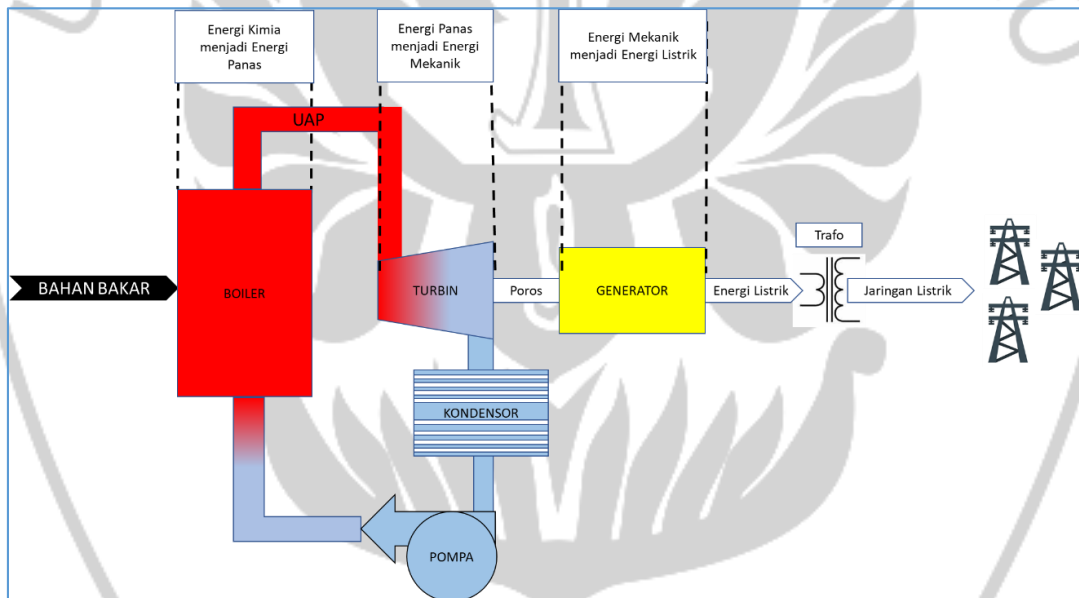


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Prinsip Kerja PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap merupakan kategori fasilitas yang memanfaatkan uap sebagai media untuk menggerakkan turbin dan generator. Fasilitas ini banyak digunakan karena pengeluaran bahan bakar yang ekonomis dan kemampuan untuk menghasilkan sejumlah besar energi listrik. Biasanya, sumber energi utama yang digunakan dalam PLTU adalah batubara. Bahan bakar diubah menjadi energi panas yang dimanfaatkan di pembangkit listrik adalah batubara. Batubara mengalami proses konversi menjadi energi panas yang kemudian di transmisikan ke air, menyebabkan berubah menjadi uap yang mendorong turbin untuk menghasilkan energi mekanik. Energi mekanik ini kemudian digunakan untuk mengoperasikan generator yang mampu menghasilkan listrik. Setelah lewatnya uap melalui turbin, kemudian dikondensasi menjadi air dan ditampung di hotwell. Air tersebut kemudian mengalami resirkulasi terus-menerus (Tirumala, 2017).



Gambar 2.1 Proses Perubahan Energi di PLTU (Tirumala, 2017)

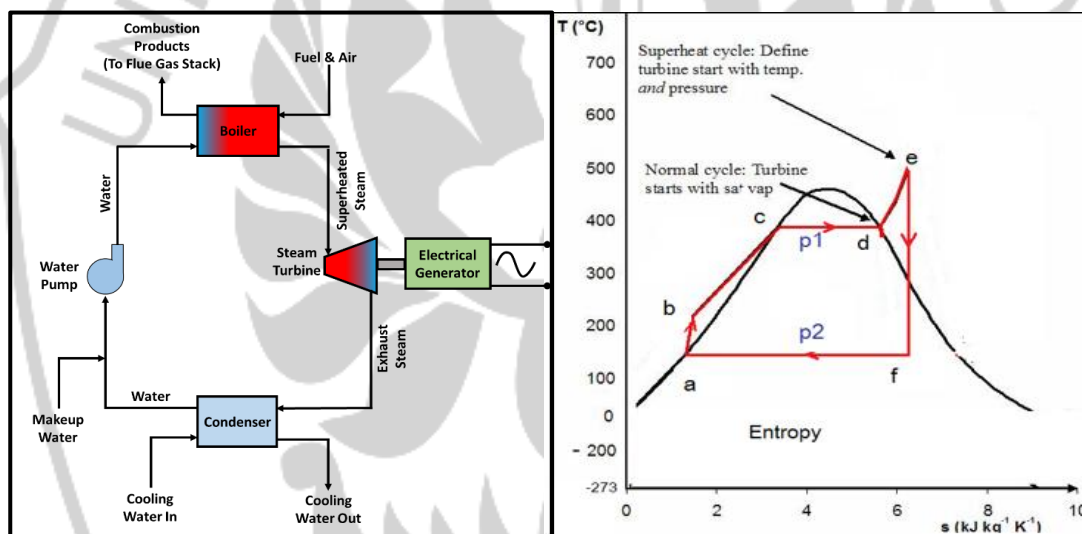
Gambar 2.1 menggambarkan mekanisme konversi energi pada PLTU yang disusun menjadi tiga tahap berbeda terdiri dari 3 tahap, yaitu:

1. Fase awal meliputi konversi energi kimia yang tertanam di dalam bahan bakar menjadi energi panas, yang kemudian berubah menjadi uap yang memiliki tekanan dan temperatur.

2. Fase selanjutnya memerlukan perluasan uap di dalam di turbin yang mengkonversi menjadi energi mekanik yang dimanifestasikan sebagai rotasi turbin.
3. Akhirnya, energi mekanik yang ditransmisikan melalui Gerakan rotasi turbin bersamaan dengan generator dapat memproduksi energi listrik.

2.1.1 Siklus *Rankine* PLTU

Siklus *Rankine* mewakili siklus termodinamika dimana panas diubah menjadi kerja mekanis. Fenomena ini memerlukan sirkulasi loop tertutup dari fluida kerja. Air berfungsi sebagai media yang dipanaskan atau didinginkan. Nomenklatur "Siklus *Rankine*" berasal dari ilmuwan Skotlandia William John Mac Eown Rankin. Siklus *Rankine* Sebagian besar digunakan sebagai kerangka operasional dalam pembangkit listrik. Sumber energi panas siklus *Rankine* dapat berasal dari berbagai input, termasuk batubara, gas alam, minyak bumi, energi nuklir, biomassa dan energi matahari.



Gambar 2.2 Siklus *Rankine* (Elamin, 2020)

Gambar 2.2 menggambarkan siklus *Rankine* (Elamin, 2020), menjelaskan tahapan berurutan siklus sebagai berikut:

1. Pertama air dipompakan oleh pompa untuk mengisi boiler, air yang di gunakan adalah air filtrasi (air demin). Di dalam boiler, air ini mengalami pemanasan melalui gas panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar dengan tambahan udara, sehingga menghasilkan pembentukan uap.

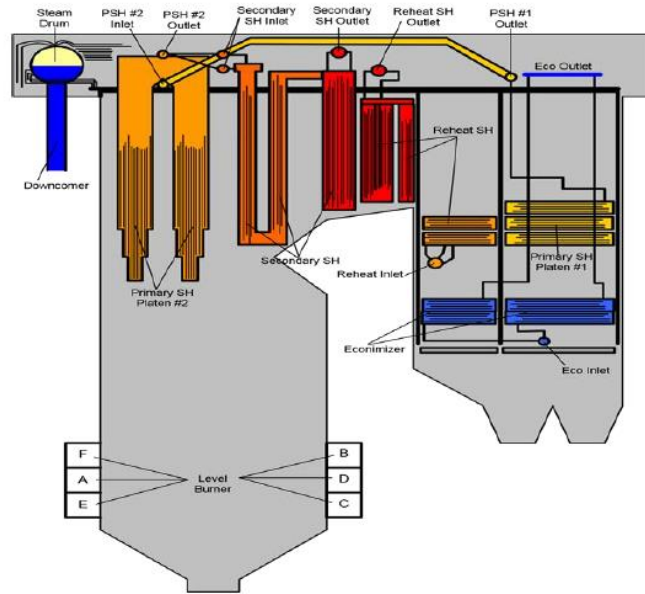
2. Uap yang dihasilkan dari proses pembakaran di dalam boiler, ditandai dengan kondisi tekanan dan suhu tertentu. Kemudian diarahkan ke turbin, sehingga menghasilkan daya mekanik dalam bentuk gerakan rotasi.
3. Ketiga generator, yang secara mekanis digabungkan dengan turbin akan mengalami rotasi untuk menghasilkan energi listrik.
4. Keempat uap keluar dari turbin kemudian akan mengalir ke kondensor, dimana akan didinginkan menggunakan air pendingin yang bersumber dari air laut. Air kondensat dingin yang dihasilkan akan diarahkan ke ruang panas yang akan digunakan lagi untuk proses pengisian di dalam boiler.

2.1.2 Spesifikasi Peralatan

Pembangkit Listrik Tenaga Uap Suralaya Unit 5 menggunakan sistem boiler *Pulverized Coal (PC)* dengan kapasitas sebesar 600 megawatt (MW). Berikut spesifikasi Boiler, *Pulverized*, Generator dan Turbin ditunjukkan pada Tabel 2.1, Tabel 2.2, Tabel 2.3 dan Tabel 2.4. Gambar 2.3 menunjukkan skema boiler tipe *Pulverized Coal (PC)* dengan kapasitas 600 MW.

Tabel 2.1 Spesifikasi Teknik Boiler

Pembuat	Babcock & Wilcock
Nama	<i>Carolyne Radian Boiler</i>
Type	<i>Balance draft, Natural Circulation, Single Drum, Radiant Boiler</i>
Kapasitas	
<i>Main Steam Flow</i>	1.953.866 kg /h
<i>Reheat Steam Flow</i>	1.758.500 kg /h
<i>Main Steam Pressure / temp</i>	174 kg /cm ² / 540 C
<i>Reheat Steam Pressure / temp</i>	39,8 kg /cm ² / 540 C
<i>Jumlah Burner</i>	35 / 36 set
Bahan bakar utama	Batubara
Bahan bakar untuk penyalat awal	Solar
Luas Penampang	
<i>Furnace</i>	8.529 m ²
<i>Economizer</i>	10.629 m ²
<i>Primary Superheater</i>	14.634 m ²
<i>Secondary Superheater</i>	5.643 m ²
<i>Reheater</i>	17.092 m ²



Gambar 2.3 Skema Boiler (Manual Book BW, 1997)

Tabel 2.2 Spesifikasi Teknik *Pulverized*

Pembuat	Babcock & Wilcock
Terpasang	6 buah (6 x 20 %)
Type	<i>Vertical spindle roll & race</i>
Ukuran	MPS 89N
Kapasitas	63.000 kg/h
<i>Fineness</i>	200 mesh > 70 %
Putaran	23,8 rpm pada <i>grinding ring</i>
	982 rpm pada <i>drive motor</i>
Motor	825 kw / 3,3 kV / 982 rpm, <i>insulation class F</i>

Tabel 2.3 Spesifikasi Teknik Generator

Pabrik pembuat	Mitsubishi Electric Corp, Japan
Kecepatan putaran	3000 rpm
Jumlah fasa	3
Frekwensi	50 Hz
Tegangan	23 kV
KVA keluaran	767 MVA
kW	651.950 kW
Arus	19.253 A
Faktor daya	0,85
Media pendingin	Gas Hidrogen
Tekanan gas H2	5 kg/cm2
Volume gas	125 m ³

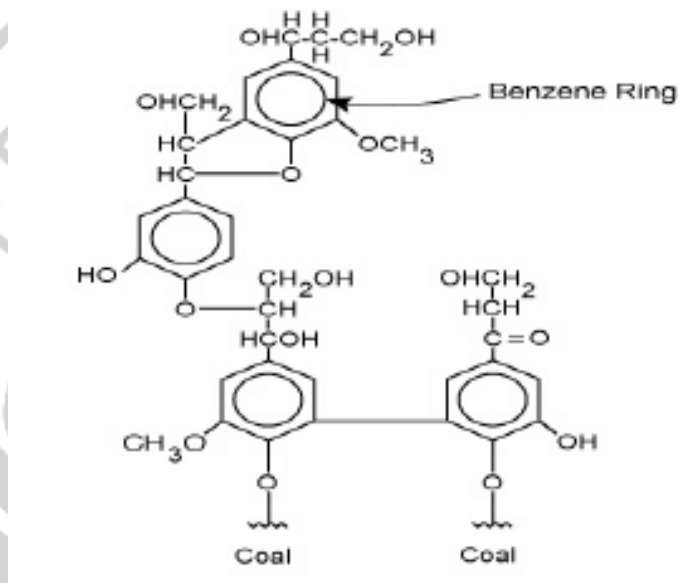
Pabrik pembuat	Mitsubishi Electric Corp, Japan
Tegangan penguat medan	590 V
Kumparan	Y
Sistem Excitasi Generator	
Penguat Medan Tanpa Sikat (<i>Brushless Exciter</i>)	
Pabrik pembuat	Mitsubishi Electric Corp, Japan
Tipe	<i>Totally enclosed</i>
kW keluaran	3300 kW
Tegangan	590 V
Arus	5593 A
Kecepatan putaran	3000 rpm
Penyearah (<i>Rotating Rectifier</i>)	
Pabrik pembuat	Mitsubishi Electric Corporation, Japan
Tipe	Penyearah silikon (<i>silicon rectifier</i>)
kW keluaran	330 kW
Tegangan	590 V
Arus	550 A

Tabel 2.4 Spesifikasi Teknik Turbin

Type	<i>Tandem compound quadruple exh. Condensing RH Turbin (TC 4F 33)</i>
Capability (at Gen.Terminal)	600.000 KW.
Speed	3000 rpm.
Rotary Direction (view from governor end)	clockwise.
Design condition	MS Inlet P / T : 169 k/cm/539°C RH temp. : 539 °C Exh.press. : 697 mmHG
Blading	
HP-Turbin	1 stage Rateu 9 stage reaction
IP- Turbin	7 stage reaction
LP1 -Turbin	2 x 7 stage reaction
LP2 -Turbin	2 x 7 stage reaction
Labyrinth type steam gland	

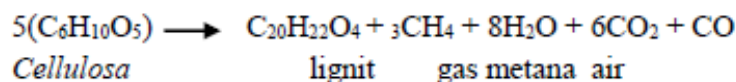
2.2 Batubara

Batubara adalah mineral organik yang mudah terbakar, berasal dari sisa-sisa flora primordial yang disimpan dan kemudian diubah melalui serangkaian proses fisik dan kimia yang mencakup jutaan tahun. Konstituen utama batubara adalah karbon, hidrogen, dan oksigen. Analisis unsur menghasilkan rumus empiris seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4, khususnya C137H97O9NS untuk batubara bitumen dan C240H90O4NS untuk antrasit.



Gambar 2.4 Rumus Kimia Batubara (Akar, 2012)

Reaksi yang mengarah pada pembentukan batubara dapat direpresentasikan sebagai berikut.



2.2.1. Jenis Batubara

Klasifikasi batubara didasarkan pada tingkat proses pembentukannya, yang ditentukan oleh pengaruh tekanan, suhu, dan faktor temporal. Akibatnya, batubara dikategorikan menjadi lima jenis yang berbeda: *antrasit*, *bitumen*, *sub-bitumen*, *lignit*, dan gambut.

- a) *Antrasit* mewakili kualitas tertinggi batubara, ditandai dengan kilau logam, kandungan unsur Karbon (C) mulai dari 86% hingga 98%, dan kadar air kurang dari 8%, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Batubara *Antrasit* (Akar, 2012)

- b) *Bituminous* terdiri dari 68-86% unsur kimia Karbon (C) dan menunjukkan kadar air mulai dari 8-10% dari massa totalnya, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.6. Klasifikasi batubara dominan yang diekstraksi di Indonesia tersebar di seluruh pulau Sumatera, Kalimantan, dan Sulawesi.



Gambar 2.6 Batubara *Bituminous* (Akar, 2012)

- c) *Sub-bituminus* dicirikan oleh kandungan karbon (C) yang relatif rendah dan kadar air yang sangat tinggi, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.7. Akibatnya, jenis batubara ini dianggap sebagai sumber energi panas yang kurang efektif bila disandingkan dengan batubara *bituminous*.



Gambar 2.7 Batubara *Sub-bituminus* (Akar, 2012)

- d) *Lignit* umumnya disebut sebagai batubara coklat. Merupakan bentuk batubara bermutu rendah yang ditandai dengan kadar air berkisar antara 35% hingga 75% berat. Gambar 2.8 menggambarkan batubara *lignit*.



Gambar 2.8 Batubara *Lignit* (Akar, 2012)

- e) Gambut merupakan varian batubara yang sangat berpori, ditandai dengan kadar air melebihi 75% dan menunjukkan nilai kalor minimum seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Batubara Gambut (Akar, 2012)

2.2.2 Analisis Batubara

Batubara yang diekstraksi melalui kegiatan penambangan secara inheren terdiri dari kotoran. Kotoran dalam batubara ini berasal dari mineral penyusun yang ditemukan dalam formasi geologi yang ditemui selama proses sedimentasi yang mencakup komponen anorganik dan organik. Kandungan pengotor dalam batubara selalu terbawa pada saat proses penambangan, sehingga membuat akuisisi batubara bersih dan bebas mineral merupakan hasil yang tidak dapat dihindarkan. Dua metodologi analitik yang berbeda yang digunakan untuk memastikan sifat kimia dan karakteristik batubara melalui pengujian di laboratorium. Ada dua kategori pengujian analitik yang berbeda yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas batubara yaitu Analisis Proximat (Proximate Analysis) dan Analisis Ultimate (Ultimate Analysis).

1. Analisis Proximat (*Proximate Analysis*):

✓ *Heating Value (HV) Calorific Value* / Nilai kalor

Merupakan nilai kalor batubara dengan jumlah energi yang diukur dalam kilokalori yang dihasilkan per kilogram batubara. Nilai kalor terdiri dari Nilai Pemanasan Tinggi (HHV) dan Nilai Pemanasan Rendah (LHV). HHV didefinisikan sebagai energi panas yang dilepaskan per satuan massa atau volume bahan bakar pada suhu standar 25° C setelah pembakaran lengkap, dengan produk pembakaran yang dihasilkan kembali ke suhu awal 25° C. Energi termal ini mencakup panas laten yang terkait dengan perubahan fase air dari cair menjadi uap. HHV secara alternatif ditetapkan sebagai Nilai Kalori Bruto. LHV dicirikan sebagai jumlah panas yang dilepaskan selama pembakaran total jumlah bahan bakar tertentu. Penting untuk dicatat bahwa LHV menyimpang dari HHV karena proses pembakaran tidak memperhitungkan panas laten dari penguapan air. LHV juga dikenal sebagai Nilai Kalori Bersih atau Nilai Kalori *Nett*. Nilai kalor yang dikaitkan dengan bahan bakar padat yang berasal dari proses torrefaksi berkaitan dengan standar klasifikasi batubara seperti yang digambarkan oleh ASTM D-388 (Basu, dkk, 2011).

✓ *Moisture Content* (kandungan air)

Kadar air yang ada dalam batubara dapat dikategorikan menjadi dua jenis yang berbeda: kadar air permukaan (kelembaban permukaan) dan kadar air internal (kelembaban yang melekat). Kelembaban permukaan mengacu pada kelembaban yang terletak di permukaan luar bahan bakar padat, sedangkan kelembaban intrinsik berkaitan dengan kelembaban yang ada di dalam pori-pori bahan bakar padat. Umumnya lebih layak untuk menghilangkan kelembaban permukaan dibandingkan dengan kelembaban bagian dalam.

Kombinasi kedua kategori air ini diidentifikasi sebagai kelembaban total. Batubara dengan tingkat kelembaban yang signifikan membutuhkan peningkatan udara primer untuk mendukung pengeringan batubara, sehingga memastikan bahwa suhu batubara yang keluar dari *pulverizer* dapat terjamin kualitasnya.

✓ *Ash Content* (kandungan abu)

Komposisi batubara bersifat heterogen, apabila batubara dibakar maka senyawa organik yang ada akan di ubah menjadi senyawa oksida yang berukuran butiran dalam bentuk abu. Abu dari sisa pembakaran inilah yang dikenal sebagai *ash content*. Abu ini merupakan kumpulan dari bahan – bahan pembentuk batubara yang tidak dapat terbakar atau yang di oksidasi oleh oksigen. Bahan sisa dalam bentuk padatan ini antara lain senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Mn_3O_4 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O , P_2O_5 , SO_3 dan oksida unsur lainnya.

✓ *Sulfur Content* (kandungan belerang)

Belerang yang terdapat pada batubara dalam bentuk senyawa organik dan anorganik, dalam senyawa anorganik dapat dijumpai dalam bentuk mineral pirit (FeS_2 bentuk kristal kubus), markasit (FeS_2 bentuk kristal orthorombik) atau dalam bentuk sulfat. Sedangkan belerang organik terbentuk selama terjadinya proses *coalification*. (Krevelen, 1993)

✓ *Volatile Matter* (mudah menguap)

Komponen dalam bahan bakar padat selain air yang terlepas ketika bahan bakar dilakukan pemanasan dengan kondisi *innert* atau tanpa oksigen. Zat *volatile* ini merupakan hidrokarbon siklik, alifatik maupun aromatik. Zat volatil menghasilkan kalor dalam proses pembakaran namun tidak sebesar nilai karbon tetap.

✓ *Fixed Carbon*

Karbon tetap adalah komponen residu yang tersisa setelah pengusiran senyawa volatil. Bentuk spesifik karbon ini menunjukkan karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan alotrop karbon lainnya, terutama karena adanya unsur karbon yang dihilangkan selama fase penguapan, kemudian membentuk ikatan hidrokarbon dalam hubungannya dengan zat volatil. Karbon tetap berfungsi sebagai kontributor utama nilai kalor bahan bakar padat.

Ini didefinisikan sebagai zat residu yang tersisa setelah penghapusan kelembaban, bahan yang mudah menguap, dan abu. Keterkaitan antara ketiga komponen ini digambarkan sebagai berikut:

Karbon Tetap (%): $100\% - \text{Kadar Air} - \text{Kandungan Abu}$

Karbon Tetap: $100 - \text{Materi Volatile} (\%)$

✓ *Hardgrove Grindability Index (HGI)*

Suatu bilangan yang menunjukkan mudah atau sukarnya batubara di giling atau digerus menjadi bentuk serbuk. HGI di ukur dengan menggunakan skala 0 -100, jika nilai HGI pada batubara tinggi menunjukkan bahwa batubara lebih mudah untuk digerus dan sebaliknya. Faktor yang mempengaruhi nilai HGI pada batubara antara lain:

- Tingkat kematangan batubara (*rank*): batubara yang memiliki tingkat kematangan yang tinggi (seperti antrasit) memiliki nilai HGI yang lebih tinggi (lebih mudah digiling).
- Kandungan mineral: kandungan mineral pada batubara berdampak pada proses penggilingan.
- Komposisi organik batubara (maceral): Kandungan maceral pada batubara berpengaruh pada nilai HGI batubara. Batubara yang diidentifikasi oleh kandungan vitrinit yang signifikan sering mencerminkan nilai HGI yang ditingkatkan relatif terhadap batubara yang sebagian besar terdiri dari inertinit.
- Ukuran partikel awal: Ukuran batubara sebelum dilakukan proses penggilingan juga mempengaruhi nilai HGI.

✓ *Ash Fusion Character of coal*

Kualitas batubara meliputi karakteristik fisik dan kimia yang mempengaruhi utilitas prospektifnya. Penilaian kualitas batubara bergantung pada konstituen mineral dan bahan yang diekstraksi, di samping tingkat koalisi, yang biasa disebut sebagai peringkat. Untuk mengevaluasi kualitas batubara, analisis kimia dilakukan, yang menggabungkan analisis proksimat dan ultimate. Analisis proksimat dilakukan untuk memastikan jumlah kelembaban, bahan volatil, karbon tetap, dan kandungan abu. Sebaliknya, analisis ultimate dilakukan untuk menjelaskan komposisi unsur sifat kimia batubara. Konstituen kimia batubara termasuk karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, belerang, elemen tambahan, dan elemen jejak.

Kategorisasi ini didasarkan pada konsentrasi karbon padat dan nilai kalor yang dinilai berdasarkan basis kering, bebas bahan mineral (dmmf). Konversi dari basis kering udara (adb) menjadi bebas bahan mineral (dmmf) difasilitasi melalui penerapan Formula Parr (ASTM, 1981, seperti dikutip dalam Wood et al., 1983). Dimana:

FC: % karbon padat (adb)

VM: % materi volatil (adb)

M: % kelembaban total (adb)

A: % abu (adb)

S: % belerang (adb)

2. Analisis Ultimate terdiri dari:

- Karbon

Batubara yang ditandai dengan peningkatan kandungan karbon cenderung memiliki peningkatan energi atau nilai kalor.

- Hidrogen

Kandungan hidrogen yang lebih tinggi pada batubara berdampak pada proses pembakaran yang lebih mudah. Kandungan hidrogen juga berkontribusi pada nilai kalor dan emisi yang dihasilkan pada saat pembakaran.

- Oksigen

Kandungan oksigen pada batubara mempengaruhi nilai kalor dan reaktivitasnya.

- Nitrogen

Kandungan nitrogen pada batubara akan berpengaruh pada pembentukan NO_x ketika proses pembakaran.

- Sulfur

Kandungan sulfur pada batubara akan mempengaruhi terbentuknya SO_x ketika proses pembakaran.

2.3 Biomassa

Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang berasal dari organisme hidup, termasuk tanaman pertanian, ganggang, dan limbah organik. Klasifikasi biomassa dikelompokkan menjadi biomassa kayu, biomassa non-kayu, dan biomassa sekunder. Selain itu, biomassa juga dapat dikategorikan menjadi limbah pertanian, limbah kehutanan, energi perkebunan, dan limbah

organik. Pemanfaatan biomassa dapat dibagi menjadi dua kategori berbeda: biomassa tradisional dan biomassa modern.

Sudut pandang konvensional mengenai biomassa berkaitan dengan tidak adanya jaminan mengenai ketersediaan biomassa melalui penanaman kembali tanaman komersial atau penggunaan produk sampingan pertanian yang efektif. Sebaliknya, biomassa kontemporer mencakup inisiatif yang bertujuan untuk mengolah atau menggunakan sumber daya yang diperoleh dari praktik pertanian atau sampah kota. Metodologi analisis peristiwa yang ketat ada untuk memastikan karakteristik biomassa, yang mencakup analisis proksimat, analisis ultimate, dan analisis unsur konstituen biomassa.

2.3.1 Analisis Proksimat (*Proximate Analysis*)

Analisis proksimat merupakan pemeriksaan laboratorium yang bertujuan untuk mengukur kadar air, zat volatil, karbon tetap, dan abu biomassa. Analisis proksimat dilakukan dengan menggunakan metode standar seperti ASTM (*American Society for Testing and Materials*): ASTM 3173. Adapun hasil analisis proksimat di laboratorium sebagai berikut:

1. Kadar air (*moisture content*)

Kadar air yang ada dalam bahan bakar biomassa menunjukkan variabilitas yang bergantung pada kategori biomassa tertentu, karakteristik morfologi biomassa, kondisi penyimpanan, dan faktor iklim. Semakin tinggi kadar air yang terkandung di dalam biomassa akan berdampak pada semakin rendah nilai kalornya. Fenomena ini terjadi karena energi yang dihasilkan selama proses pembakaran digunakan untuk menguapkan air, sehingga mengurangi jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan panas. *Total moisture* yang tinggi dalam biomassa akan mempengaruhi kebutuhan udara primer yang diperlukan untuk proses pengeringan, sehingga semakin tinggi *total moisture* maka semakin banyak udara primer dengan *temperature* yang tinggi yang dibutuhkan untuk mengeringkan biomassa. Kenaikan udara primer berdampak pada peningkatan *pulverizer outlet temperature* (Kurniastuti, 2015).

2. Kadar abu (*ash*)

Abu biomassa merupakan produk sampingan dari pembakaran dan memiliki karakteristik yang tidak mudah terbakar. Abu merupakan mineral utama setelah karbon, oksigen, belerang, dan udara, yang dihasilkan selama prosedur pembakaran. Unsur-unsur tertentu

yang bermanifestasi sebagai abu dalam biomassa pasca-pembakaran ditetapkan sebagai elemen pembentuk abu.

3. Zat terbang (*volatile matter*)

Materi yang mudah menguap mewakili komponen biomassa yang mengalami penguapan selama proses perlakuan termal. Selama perlakuan termal biomassa, berbagai senyawa yang ditunjuk sebagai zat volatil dipancarkan. Zat udara ini termasuk gas hidrogen, karbon monoksida, karbon dioksida, metana, hidrokarbon ringan, tar, amonia, belerang, dan oksigen. Adapun dampak yang terjadi ketika kandungan *volatile matter* tinggi:

- Peningkatan konsentrasi zat volatil menandakan bahwa biomassa memiliki sifat mudah terbakar dan memiliki potensi untuk menyala dengan cepat. Namun kadar zat terbang yang terlalu tinggi juga menyebabkan peningkatan arus pulverizer. Hal ini terjadi karena peningkatan efisiensi pembakaran (Tampubolon & Dwiyanoro, 2023).
- Kandungan *volatile matter* lebih banyak menyebabkan pembakaran menjadi lebih cepat, sehingga menghasilkan lebih banyak energi dalam waktu yang lebih cepat. Selain itu penambahan *volatile matter* juga berdampak pada kebutuhan udara untuk pembakaran semakin sedikit yang diperlukan untuk mencapai pembakaran yang sempurna. Hal ini berdampak perubahan dalam aliran udara dan meningkatkan kinerja *pulverizer* (Tampubolon & Dwiyanoro, 2023).
- Biomassa dengan kadar *volatile matter* tinggi dapat meningkatkan intensitas nyala api dan efisiensi pembakaran, sehingga memungkinkan reduksi jumlah pasokan batubara tanpa mengurangi output listrik (Tampubolon & Dwiyanoro, 2023).
- Peningkatan persentase penggunaan biomassa dengan kandungan *volatile matter* tinggi dalam proses co-firing akan berdampak pada peningkatan air fuel ratio (Tampubolon & Dwiyanoro, 2023).

4. Karbon tetap (*fixed carbon*)

Kandungan karbon padat (*fixed carbon*) adalah karbon yang terkandung dalam bahan yang tersisa setelah bahan yang mudah menguap. Hal ini berbeda dengan kandungan karbon primer biomassa karena sebagian karbon hilang dalam bentuk hidrokarbon yang mudah menguap.

5. *Hardgrove Grindability Index* (HGI)

Ukuran kuantitatif yang menandakan kelembutan relatif atau ketangguhan biomassa ketika mengalami proses penggilingan atau penggilingan untuk tujuan mencapai keadaan bubuk. HGI di ukur dengan menggunakan skala 0 -100, jika nilai HGI pada biomassa tinggi menunjukkan bahwa biomassa lebih mudah untuk digerus dan sebaliknya.

Pengaruh nilai HGI terhadap kinerja motor *pulverizer*:

✓ Nilai HGI tinggi

Biomassa dengan nilai HGI tinggi menunjukkan bahwa biomassa tersebut mudah untuk digerus. Hal ini akan berdampak pada penurunan arus listrik yang diperlukan oleh motor *pulverizer*. Semakin tinggi nilai HGI, semakin lunak biomassa, sehingga motor *pulverizer* tidak berkeja lebih keras untuk mengerus.

✓ Nilai HGI rendah

Berbanding terbalik dengan biomassa HGI tinggi. Biomassa dengan nilai HGI rendah lebih keras dan sulit untuk digerus, maka akan berdampak pada kerja motor *pulverizer* semakin keras yang berakibat kenaikan arus listrik yang dibutuhkan untuk proses penggerusan

Klasifikasi berdasarkan nilai HGI:

- ✓ HGI<30: biomassa dengan nilai HGI dibawah 30 termasuk dalam kategori sangat sulit untuk digerus. Seperti beberapa jenis limbah pertanian dan biomassa keras.
- ✓ HGI 30-50: biomassa ini termasuk dalam kategori sedang. Seperti serbuk kayu dan limbah pertanian.
- ✓ HGI 50-70: biomassa dengan nilai HGI tergolong mudah digerus. Seperti jenis kayu lunak dan limbah organik.
- ✓ HGI>70: biomassa dengan nilai HGI tinggi yang sangat mudah mudah digerus. Seperti serbuk gergaji kayu dan biomassa yang mengalami proses torrefaksi.

2.3.2 Analisis Ultimate (*Ultimate Analysis*)

Analisis *ultimate* adalah sebuah metode yang digunakan untuk mengetahui kandungan komposisi kimia dari biomassa yang mencakup berbagai elemen penting yang berhubungan dengan karakteristik energi dan potensi pembakaran.

Analisis *ultimate* biomassa dilakukan dengan menggunakan standart ASTM (*American Society for Testing and Materials*) seperti ASTM D5373. Metode ini memiliki keunggulan yaitu

dapat memberikan informasi komposisi kimia dasar pada biomassa secara akurat. Berikut hasil analisis ultimate (*ultimate analysis*) sebagai berikut:

1. Karbon (C)

Karbon merupakan komponen utama yang berhubungan dengan kandungan energi pada biomassa.

2. Hidrogen (H)

Kandungan hidrogen pada biomassa berpengaruh pada nilai kalor dan emisi gas buang pada saat pembakaran. Biomassa dengan kandungan hidrogen yang lebih tinggi akan lebih mudah terbakar.

3. Sulfida (S)

Biomassa memiliki kandungan sulfida yang dapat menyebabkan emisi sulfur dioksida (SO_2).

4. Oksigen (O)

Kadar oksigen pada biomassa akan mempengaruhi proses pembakaran yang efisien. Semakin tinggi kadar oksidasi akan dapat meningkatkan stabilitas dan efisiensi pembakaran.

2.3.3 Biomassa Bahan Bakar Jumptan Padat (BBJP / *Solid Recovered Fuels* (SRF))

Produksi bahan bakar melibatkan klasifikasi dan homogenisasi bahan limbah menjadi partikel kecil atau konversi bahan tersebut menjadi pelet, yang berfungsi sebagai pengganti bahan bakar fosil yang layak. Mengenai metodologi pemrosesan BBJP, representasi visual disediakan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Alur Pengolahan Biomassa BBJP (*Engineering Sheet PT PLN, 2021*)



Gambar 2.11 Biomassa BBJP (*Engineering Sheet PT PLN, 2021*)

BBJP yang digunakan adalah produk yang dihasilkan dari TPSA yang terletak di kota Cilegon ditunjukkan pada Gambar 2.11. Sebelum digunakan untuk uji *co-firing* di PLTU, terlebih dahulu material sampah kota diolah menjadi BBJP dengan tahapan sebagai berikut:

1. Penilaian dan analisis komposisi limbah yang ditunjuk untuk pengolahan, dengan mengikuti ketentuan kandungan anorganik maksimum 20% dan kandungan organik minimum 80%, sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI) 8966:2021 tentang “Bahan Bakar Bahan Bakar Padat untuk Pembangkit Listrik,” disajikan pada Tabel 2.5.
2. Pemilahan sampah tidak dapat digunakan ataupun yang masih memiliki nilai ekonomi (kaca, besi, aluminium, pampers dll).
3. Penimbangan sampah dan pencampuran sampah yang telah dipilah sesuai dengan variasi yang dibutuhkan (perbedaan komposisi menyebabkan perbedaan kualitas BBJP).
4. Memasukkan sampah kedalam bedengan menggunakan alat berat (Bob Cat, Excavator dsb).
5. Penyiraman bioaktivator sesuai dengan kebutuhan (*rule of thumb bio activator* diencerkan dengan 40-80 L air, dan *bio activator* disiram pada setiap ketinggian sampah pada bedengan 20 cm). Selanjutnya setelah bedengan penuh, tutup bedengan menggunakan terpal atau karung goni.
6. Proses fermentasi akan terjadi kurang lebih sekitar 3 hari setelah bedengan ditutup. Setelah fermentasi terjadi biarkan hingga 3-5 hari untuk menurunkan kadar total moisture pada bakal produk BBJP, selama proses berlangsung ukur temperatur dan pH secara berkala.
7. Memanen hasil fermentasi (BBJP) dan mengangin-anginkan BBJP untuk menurunkan kadar air dan mempermudah kinerja mesin.
8. Mencacah kasar BBJP (mesh 1) dan cacah halus (mesh 5). Selanjutnya BBJP dapat di packing dan di loading pada alat transportasi.

Tabel 2.5 SNI 8966:2021 Bahan Bakar Jumputan Padat Untuk Pembangkit Listrik

Parameter Uji	Satuan min/maks	Kualitas			Metode Uji/Preparasi
		1	2	3	
Kadar organik (a)	%, min	Organik ≥ 95	$87,5 \leq$ organik < 95	$80 \leq$ organik $< 87,5$	Pencampuran dua bagian H_2SO_4 dengan bagian $K_2Cr_2O_7 1N$
Kadar air (b)	%-berat	< 15	< 20	< 25	SNI 01-1206
Nilai kalor netto (b)	MJ/kg, <i>mean (c)</i>	≥ 20	≥ 15	≥ 10	SNI 01-6235
Nilai sulfur total (b)	%-berat		$\leq 1,5$		Pembakaran hingga $1350^{\circ}C$
Kadar klorin (b)	%-berat <i>mean (c)</i>	$\leq 0,2$	$\leq 0,6$	≤ 1	Pencampuran dengan <i>Eschka</i> pemanasan

Catatan:

Pemilihan ukuran jumputan padat disesuaikan dengan kebutuhan jenis boiler.

Keterangan :

- a) Bahan organik dapat terbakar
- b) *As Received*
- c) Jumlah percontoh yang diambil sesuai kesepakatan produsen dan konsumen

2.3.4 Presentasi Karakteristik Bahan Bakar Padat

Metodologi yang digunakan untuk eksposisi karakteristik yang berkaitan dengan bahan bakar padat atau batubara menunjukkan pendekatan yang bervariasi. Akibatnya, diperlukan pembentukan kondisi yang seragam untuk analisis komparatif. Dalam hal kerangka metodologis untuk menggambarkan karakteristik bahan bakar padat, digambarkan dalam Tabel 2.6.

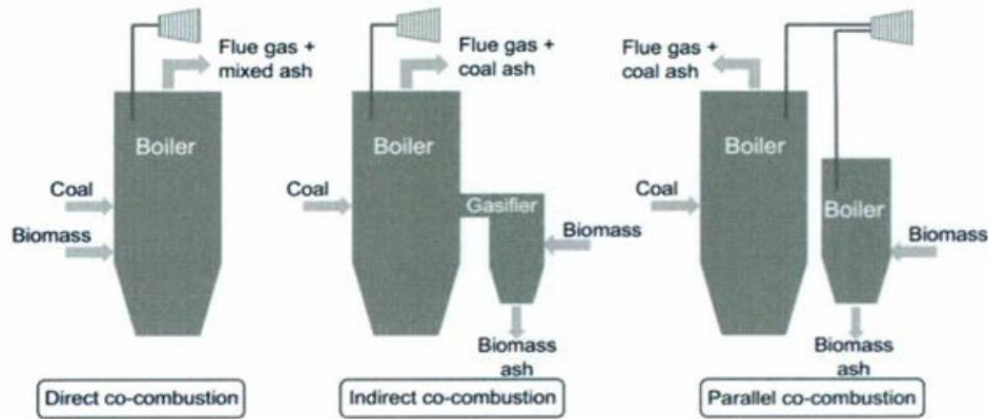
Tabel 2.6 Metode Penyajian Bahan Bakar Padat

Metode	Uraian
<i>As received</i> (ar)	Metodologi <i>as received</i> berkaitan dengan aplikasi langsung dalam proses pembakaran. Komposisi bahan bakar padat atau batubara tersebut dianggap mencakup totalitas bahan bakar padat atau batubara.
<i>Air dried basis</i> (adb)	Metodologi <i>air-dry base</i> (ADB) menjelaskan komposisi bahan bakar padat atau batubara tanpa kadar air permukaan.
<i>Dry basis</i> (db)	Metode <i>dry basis</i> (db) menunjukkan adanya bahan bakar padat atau konstituen batubara tanpa kandungan air atau kelembaban keseluruhan..
<i>Dry, ash-free</i> (daf)	Metodologi kering, bebas abu (daf) menunjukkan bahan bakar padat atau batubara yang tidak mengandung kadar air dan abu.

Metode	Uraian
<i>Dry, mineral-matter free (dmmf)</i>	Metode kering, bebas materi mineral (dmmf) mengasumsikan bahwa komposisi batubara hanya terdiri dari komponen organik, mengabaikan keberadaan air, abu, dan mineral.
<i>Moist, ash-free (maf)</i>	Metodologi lembap, bebas abu (maf) menunjukkan adanya bahan bakar padat atau batu bara tanpa abu, sementara secara bersamaan mempertahankan jumlah kelembaban minimal.
<i>Moist, mineral-matter free</i>	Metode ini, tanpa bahan mineral dan ditandai dengan kelembaban, menunjukkan sifat bahan bakar padat atau batu bara, tidak ada abu dan mineral tetap mempertahankan kadar air.

2.4 Co-firing

Co-firing merupakan salah satu metode yang memfasilitasi penggantian sebagian batubara dengan bahan bakar terbarukan dalam proses pembakaran di boiler. Salah satu tujuan dari co-firing yaitu untuk mengurangi emisi batubara yang dibawa oleh gas buang. Co-firing merupakan salah satu metode jangka panjang yang dapat mengurangi emisi CO₂, memerlukan investasi modal yang relatif rendah, menawarkan manfaat lingkungan lebih baik bila disandingkan dengan penggunaan batubara sepenuhnya (Kommalapati, dkk, 2018) dan selain itu menunjukkan kandungan sulfur di biomassa lebih sedikit dibandingkan dengan batubara (Tchapda & Pisupati, 2014). Jenis biomassa yang digunakan dalam proses co-firing secara umum antara lain sawdust, cangkang sawit, sekam padi atau sampah yang sudah diolah. Ada beberapa metode co-firing yang dapat diterapkan pada proses pembakaran batubara dengan biomassa yaitu (Al-Mansour & Zuwala, 2020). Ada beberapa metode *co-firing* yang dapat diterapkan pada proses pembakaran batubara dengan biomassa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Metode Co-firing (Tripathy, dkk, 2014)

1. Direct Co-firing

Dalam paradigma konfigurasi ini, biomassa diperkenalkan sebagai bahan bakar sekunder (biomassa) bersama dengan bahan bakar primer (batubara) yang berfungsi sebagai bahan bakar utama ke dalam boiler tunggal. Pendekatan direct co-firing lebih umum karena efektivitas biaya investasi yang lebih ekonomis.

2. Indirect Co-firing

Metode ini memerlukan persiapan peralatan tambahan untuk bahan bakar sekunder secara independen dari bahan bakar primer. Awalnya biomassa mengalami proses gasifikasi untuk mengubah menjadi syngas di dalam mesin sebelum diarahkan ke ruang bakar.

3. Parallel Co-firing

Dalam teknik ini, biomassa yang diperlukan dipisahkan dari boiler berbahan bakar batubara, dimana uap yang dihasilkan dari pembakaran biomassa dan batubara kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan energi listrik.

Diantara tiga metodologi untuk *co-firing*, *direct co-firing* merupakan pendekatan yang paling mudah untuk diimplementasikan dan dikaitkan dengan pengeluaran modal yang relatif rendah. Kekurangan *direct co-firing* adalah perlunya mencampurkan biomassa hingga homogen untuk mencapai kualitas operasi yang optimal.

2.5 Tara kalor/Net Plant Heat Rate (NPHR)

NPHR menunjukkan tingkat efisiensi pembangkit listrik yang memproses bahan bakar menjadi energi panas dan kemudian menjadi listrik. Tara kalor menunjukkan energi panas agregat

yang dimasukkan ke dalam pembangkit sehubungan dengan energi listrik yang dihasilkan. Adapun formula tara kalor ditulis dalam Persamaan 2.1 (Tampubolon & Dwiyanoro, 2023).

$$NPHR = \frac{Q_f \times LHV}{Netto\ Power} \quad (2.1)$$

NPHR : *Net Plant Heat Rate* [kkal/kWh]

Q_f : Total pemakaian bahan bakar per jam [kg]

LHV : Nilai kalor batubara per kg [kkal/kg]

Netto Power : Total energi listrik (daya output generator – pemakaian sendiri) [kWh]

NPHR merupakan salah satu parameter penting yang digunakan dalam evaluasi kinerja pembangkit listrik tenaga uap. NPHR menunjukkan tingkat efisiensi pembangkit dalam mengubah energi panas menjadi energi listrik.

2.6 *Specific Fuel Consumption* (SFC)

Specific Fuel Consumption (SFC) merupakan metrik yang signifikan dalam dinamikan operasional pembangkit karena mencerminkan seberapa besar efisiensi dalam mengubah energi kimia menjadi energi mekanik (Gudmundsson, 2013). SFC mengukur jumlah total bahan bakar yang digunakan oleh pembangkit untuk menghasilkan 1 kWh output listrik. Nilai SFC yang rendah memiliki korelasi dengan pengurangan pemakaian bahan bakar. SFC dapat direpresentasikan secara matematis ditulis dalam Persamaan 2.2 (Riadessy, 2014):

$$SFC\ Gross = \frac{Q_f}{Netto\ Power} \quad (2.2)$$

dimana:

SFC Netto : *Specific Fuel Consumption Netto* [kg/kWh]

Netto Power : Total energi listrik (daya output generator – pemakaian sendiri) [kWh]

Q_f : Total pemakaian bahan bakar per jam [kg]

BAB III