

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

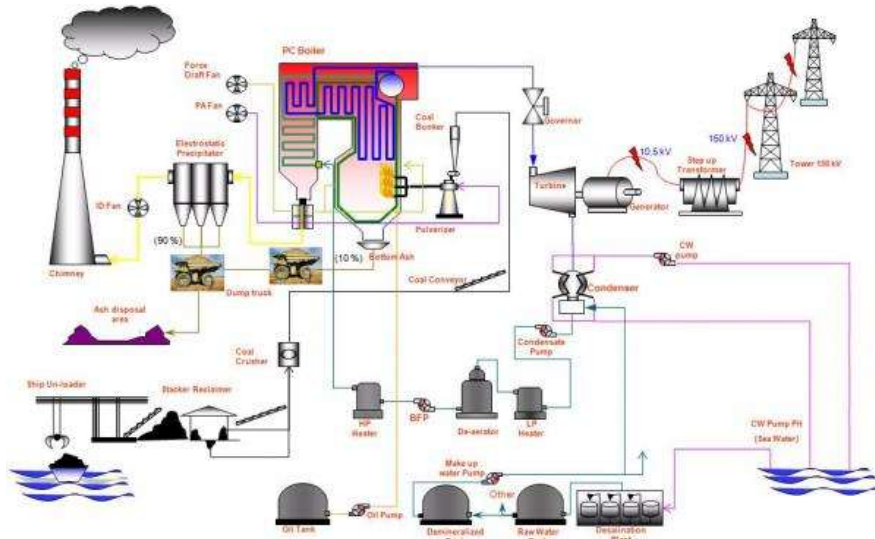
2.1 PLTU XXX

PLTU XXX merupakan salah satu Pembangkit Listrik Tenaga Uap terbesar yang terletak di Provinsi Banten, tepatnya di Kecamatan Pulo Merak, Kota Cilegon. PLTU XXX mulai dibangun secara bertahap pada lahan seluas lebih dari 240 hektare, dimulai Tahun 1984, 1989, 1997 dan terus dikembangkan sampai dengan Tahun 2021 hingga memiliki 7 pembangkit, Unit 1-4 masing masing memiliki kapasitas 400 MW dan Unit 5-7 yang memiliki kapasitas masing masing 600 MW, sehingga total kapasitas PLTU XXX adalah sebesar 3.400 MW. Seperti terlihat Pada Gambar 2.1 PLTU XXX.



Gambar 2. 1 Unit PLTU XXX (Sumber : PLN Indonesia Power)

PLTU XXX berada langsung di bawah pengelolaan PT PLN Indonesia Power subholding PT PLN (Persero) sebagai salah satu BUMN terbesar di Indonesia. Sebagai salah satu pembangkit batu bara terbesar di Indonesia, PLTU XXX berperan penting dalam menjaga keandalan pasokan listrik Jawa, Madura dan Bali. PLTU XXX yang memiliki kapasitas besar dapat menyumbang hingga 12 % beban puncak Jawa Madura dan Bali (Jamali). Berdasarkan data dinas lingkungan hidup Provinsi Banten, kontribusi PLTU XXX mencapai 17% dari kebutuhan listrik regional. (ruangenergi.com). Secara prinsip PLTU tersaji pada gambar 2.2



Gambar 2. 2 Prinsip kerja PLTU (Sumber : Website PLN Indonesia Power)

PLTU XXX terhubung dengan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500kV. Hal ini memastikan kestabilan daya saat menopang beban puncak. Pembangkit besar seperti ini sangat penting dalam memberikan fleksibilitas sistem dan menjamin reliabilitas beban dasar (base-load reliability). Hal ini sejalan dengan penelitian yang dibuat oleh Gavrikov et al.(2020) dalam energy strategy reviews, dimana mereka menyatakan bahwa pembangkit skala besar dengan konektivitas jaringan tinggi memainkan peran penting dalam stabilisasi sistem kelistrikan di negara berkembang (Gavrikov et al., 2020).

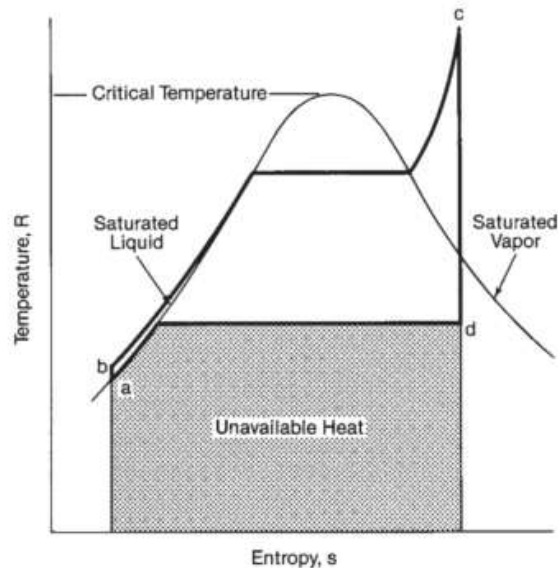
Selain itu, integrasi antara pembangkit konvensional besar dan sistem transmisi tegangan tinggi sangat penting untuk menjamin kontinuitas pasokan listrik, terutama di Kawasan padat seperti asia Tenggara (Zheng et al., 2019). Pada sistem PLTU sendiri memerlukan bahan bakar sebagai pasokan energi utama. Hal ini dikarenakan untuk melakukan pembakaran di Boiler memerlukan energi panas yang didapatkan dari energi kimia bahan bakar.

2.2 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan pembangkitan yang memanfaatkan energi primer panas hasil pembakaran di boiler menjadi energi listrik. Pembakaran memanaskan boiler yang menghasilkan uap panas lalu mengalir ke turbin kemudian dikonversi menjadi energi mekanik untuk memutar generator. *Exhaust steam* keluaran dari turbin dikondensasikan di dalam kondensor dan kembali menjadi fase air. Pompa *feedwater* digunakan untuk memompa air dari kondensor menuju boiler untuk diproses kembali (Alaa, 2020). Secara detail penjelasan proses konversi energi di PLTU yaitu sebagai berikut:

- a) Pertama, energi kimia dalam hal ini adalah bahan bakar dirubah menjadi energi panas yang dilakukan pembakaran di Boiler untuk memanaskan air yang bersirkulasi secara tertutup untuk menghasilkan uap bertekanan dan temperatur tinggi
- b) Kedua, energi panas dalam hal ini uap dirubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran dalam hal ini untuk memutar turbin
- c) Ketiga, Turbin yang seporos dengan Generator yang diputar oleh energi mekanik (uap), menghasilkan energi listrik.

PLTU beroperasi berdasarkan siklus rankine. Gambar 2.3 menunjukkan Diagram T-S Pada Siklus Rankine. Fluida cair dikompresi secara isentropic dari point a ke point b. dari point b ke c, panas ditambahkan secara reversible di dalam fluida cair bertekanan sehingga menjadi fasa campuran dan akhirnya berada pada fasa uap superheat. Ekspansi secara isentropic dengan keluaran daya poros turbin berada pada posisi c dan d, dan panas dibuang ke lingkungan melalui sistem pendingin dari titik d ke a. kompresi fluida cair terjadi pada titik a ke b dan penambahan panas terjadi dari point b ke c. ekspansi dan kerja turbin terjadi pada point c ke d. Modifikasi sistem dari siklus rankine dengan penambahan beberapa peralatan pendukung umum dilakukan pada sistem pembangkit daya tenaga uap untuk meningkatkan efisiensi siklus. (Kitto and Stultz, 2005).



Gambar 2. 3 Diagram T-S Pada Siklus Rankine (Sumber : Blogger "Siklus Termodinamika Pembangkit)

2.2.1 Sistem Pembakaran pada PLTU

Pembakaran dapat terjadi jika ketiga unsur bakar tersedia. Unsur tersebut yaitu bahan bakar, oksigen, dan sumber panas yang berperan sebagai pemantik awal. Dalam sistem ini, keseimbangan antara bahan bakar, udara pembakaran, dan gas buang menjadi faktor penentu kinerja thermal boiler. Jika jenis dan kualitas bahan bakar berubah, maka akan mempengaruhi laju aliran massa bahan bakar dan udara yang dibutuhkan untuk mempertahankan kestabilan panas pembakaran.

Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), boiler sudah didesign untuk beroperasi dengan menggunakan bahan bakar dengan kualitas tertentu. Apabila boiler beroperasi menggunakan bahan bakar yang berada dibawah design, maka akan berdampak kepada *performance* peralatan. Beberapa kondisi yang dapat terjadi diantaranya penurunan daya output pembangkit, meningkatkan kebutuhan bahan bakar, meningkatkan kebutuhan energi pemakaian sendiri, serta meningkatkan potensi kerusakan yang akhirnya perlu pemeliharaan rutin komponen mesin PLTU.

2.2.2 Bahan Bakar PLTU

Terdapat beberapa jenis sumber bahan bakar yang biasa digunakan PLTU. Jenis bahan bakar tersebut diantaranya yaitu batubara, minyak, gas alam, dan biomassa. Di Indonesia jenis bahan bakar yang banyak digunakan PLTU adalah jenis batu bara serta Marine Fuel Oil (MFO) yang dipakai pada saat *start up*. PLTU telah lama menggunakan batu bara (C,H,O,N,S) sebagai

bahan bakar utama. Hal ini dikarenakan batu bara memiliki ketersediaan yang melimpah, harga yang murah, dan infrastruktur yang mendukung (Gavrinov et al, 2020). Konsumsi global batu bara untuk pembangkit listrik diperkirakan terus meningkat tiap tahun di negara berkembang (IEA,2021).

Jenis batu bara yang digunakan sebagai bahan bakar PLTU memiliki beberapa jenis antara lain jenis lignit, sub-bituminus, dan bituminous, setiap jenis batu bara tersebut memiliki karakteristik yang berbeda diantaranya nilai kalor dan kandungan sulfur yang dimana kandungan tersebut dapat mempengaruhi efisiensi dan emisi pada saat pembakaran di boiler (Zhou et al.,2019). Pemilihan jenis batu bara di PLTU disesuaikan dengan design boiler serta mempertimbangkan analisis teknis dan ekonomis (Yuan et al.,2020).

2.2.3 Bahan Bakar Batubara

Batubara adalah jenis bahan bakar fosil yang terbentuk dari sisa-sisa tumbuhan purba melalui proses perubahan geologis selama jutaan tahun. Proses ini melibatkan tekanan dan temperatur tinggi di dalam bumi menyebabkan material organik secara bertahap berubah menjadi karbon padat dengan kandungan energi yang tinggi. Gambar 2.2 menunjukkan gambaran batubara sebagai bahan bakar di PLTU.



Gambar 2. 4 Batubara (Sumber : GreenVinci “Biomassa Energy”)

Batubara diperhitungkan masih mempunyai cadangan yang cukup banyak terutama di Indonesia, Dengan biaya produksi yang ekonomis, batubara menjadi salah satu bahan bakar utama dalam sektor pembangkitan listrik. Berdasarkan proses alaminya, tahapan pembentukan batubara dijelaskan yaitu sebagai berikut:

a. Pembentukan gambut

Di tahap awal, sisa-sisa tumbuhan yang terakumulasi di lingkungan rawa mengalami proses dekomposisi biologis, membentuk lapisan gambut.

b. Pembentukan Lignit

Akibat meningkatnya tekanan dan temperatur, gambut mengalami pemadatan dan berubah menjadi lignit dengan kandungan karbon yang lebih tinggi.

c. Pembentukan Sub-bituminus dan bituminus Coal

Proses coalification yang berlanjut menyebabkan kadar karbon meningkat dan kadar air menurun, sehingga menghasilkan batubara dengan kualitas energi yang lebih tinggi.

d. Pembentukan antracit

Pada tahap akhir, batubara mengalami peningkatan kadar karbon yang ekstrem, sehingga menghasilkan batubara antrasit dengan nilai kalor tertinggi.

Proses pembentukan batubara atau *coalification* ini menetapkan kualitas batubara yang dihasilkan, terutama berkaitan dengan kandungan karbon, nilai kalor, dan karakteristik pembakarannya. Batubara dapat dikelompokkan menurut tingkat kematangan (rank) yang berpengaruh terhadap kandungan karbon dan nilai kalornya. Tabel 2.1 menjelaskan jenis-jenis tingkat kematangan batubara beserta karakteristiknya.

Tabel 2. 1 Jenis Batubara (Sumber : Website PLN Energi Primer Indonesia)

Jenis Batubara	Karakteristik
Lignite	Nilai kalor rendah, moisture tinggi
Sub-bituminous	Nilai kalor menengah
Bituminous	Nilai kalor tinggi
Anthracite	Kandungan karbon sangat tinggi

Di Indonesia, jenis batubara yang banyak digunakan pada pembangkit listrik adalah batubara dari kategori sub-bituminous hingga bituminous. Dalam penelitian ini, batubara yang digunakan adalah batubara pemasok dari PT Adaro Indonesia. Karakteristik dari batubara sebagai bahan bakar diketahui melalui pengujian proximate yang tersaji pada table 2.2 untuk sifat fisika, pengujian ultimate yang tersaji pada table 2.3 untuk sifat kimia, dan pengujian panas untuk mengetahui nilai kalornya. Batubara yang digunakan di PLTU XXX diketahui memiliki nilai kalor HHV sebesar 4.653 kcal/kg. Di era transisi energi saat ini, bahan bakar batu bara di PLTU diarahkan untuk dilakukan campuran dengan bahan bakar yang bersifat terbarukan seperti bahan bakar biomassa.

Tabel 2. 2 Proximate Analysis Batubara (Sumber : COA Sucofindo MV Maria Nashwah)

Parameter	Nilai
Gross Calorific Value	4.653 kcal/kg
Total Moisture	29,42 %
Moisture in Analysis	15,65 %
Ash Content	2,72 %
Volatile Matter	40,44 %
Fixed Carbon	41,15 %

Tabel 2. 3 Ultimate analysis Batubara (Sumber : COA Sucofindo MV Maria Nashwah)

Parameter	Nilai
Carbon (C)	59,10 %
Hydrogen (H)	4,35 %
Oxygen (O)	17,02 %
Nitrogen (N)	0,88 %
Sulfur (S)	0,10 %

2.3 Konsep Cofiring Biomassa pada PLTU

Cofiring biomassa merupakan metode pencampuran batubara dengan biomassa pada sistem pembakaran PLTU eksisting. Biomassa seperti *sawdust*, sekam padi, atau *wood pelet* umumnya mempunyai nilai kalor yang lebih rendah dan kandungan oksigen serta kelembaban yang lebih tinggi dibandingkan dengan batubara. Pencampuran biomassa dengan batubara akan menurunkan nilai kalor campuran dan mengubah karakteristik pembakaran.

Penelitian yang diterapkan pada PLTU tipe *pulverized coal* dengan campuran biomassa 1-10% (basis energi) banyak dilakukan karena cukup stabil diimplementasikan tanpa modifikasi besar pada peralatan utama. Namun tindakan pencampuran bahan bakar batubara dengan biomassa tetap berdampak secara teknis dan operasional PLTU, seperti terjadi peningkatan kebutuhan bahan bakar, kebutuhan udara pembakaran, serta perubahan temperatur dan komposisi gas buang (Arifin et al., 2023; ilham & Suedy, 2022).

2.3.1 Biomassa

Biomassa adalah bahan organik yang berasal dari organisme hidup, seperti hewan, tanaman serta produk sampingannya seperti limbah kebun, limbah kota, limbah kehutanan, limbah industri dan lain lain. Biomassa dapat dibakar langsung untuk menghasilkan panas atau diubah menjadi bahan bakar cair dan gas setelah melalui beberapa proses. Jenis biomassa yang digunakan sebagai cofiring di PLTU khususnya di Indonesia yaitu limbah pertanian seperti sekampadi, limbah industry seperti serbuk kayu dan wood chip, serta limbah padat kota. Biomassa jenis ini dipilih sebagai campuran bahan bakar PLTU di Indonesia karena ketersediaannya sesuai dengan sumber lokal dan dapat mengurangi potensi pengurangan emisi (chen at al., 2021). Jenis jenis biomassa yang digunakan untuk campuran bahan bakar PLTU dijelaskan sebagai berikut:

a) Limbah pertanian

Limbah pertanian yang biasa digunakan sebagai campuran bahan bakar untuk PLTU antara lain sekam padi, Jerami, tongkol jagung, dan ampas tebu. Limbah ini diolah menjadi pellet atau briket sebelum digunakan untuk campuran bahan bakar PLTU.



Gambar 2. 5 Sekam Pertanian (Sumber : GreenVinci “Biomassa Energy”)

b) Limbah Kehutanan dan Industri Kayu

Limbah kehutanan dan industri kayu yang digunakan sebagai campuran bahan bakar untuk PLTU antara lain serbuk gergaji, potongan kayu, dan kulit kayu. Limbah diolah menjadi pellet atau briket sebelum digunakan untuk campuran bahan bakar PLTU.

Gambar 2.6 menunjukkan gambaran bentuk limbah kayu dari kehutanan



Gambar 2. 6 Limbah Kehutanan dan Industri Kayu (Sumber : GreenVinci “Biomassa Energy”)

c) Limbah Padat Kota

Limbah padat kota yang digunakan sebagai campuran bahan bakar untuk PLTU antara lain kerta termasuk limbah uang kertas Bank Indonesia, karton, dan sisa makanan. Limbah ini diolah menjadi bahan bakar padat yang disebut Refuse-Derives Fuel (RDF) sebelum digunakan untuk campuran bahan bakar PLTU. Gambar 2.7 menunjukkan proses pemilihan sampah dalam proses produksi RDF.



Gambar 2. 7 Limbah padat kota (Sumber : Website PLN Indonesia Power)

d) Limbah Industri

Limbah industri yang digunakan sebagai campuran bahan bakar untuk PLTU antara lain pengolahan makanan dan minuman, seperti ampas kopi, ampas tebu, dan limbah minyak nabati, limbah ini biasanya dibakar langsung atau diolah menjadi bahan bakar cair atau gas.

e) Tanaman Energi

Tanaman energi yang digunakan sebagai campuran bahan bakar untuk PLTU adalah tanaman yang ditanam khusus untuk produksi energi, antara lain miscanthus, switchgrass, dan poplar. Tanaman energi harus memiliki pertumbuhan yang cepat dan kandungan energi yang cukup tinggi untuk mensuplai kebutuhan cofiring PLTU.

Dalam penelitian ini jenis bahan bakar biomassa yang digunakan cofiring di PLTU XXX yaitu biomassa dalam bentuk *sawdust* atau serbuk kayu. Tantangan utama co-firing tidak hanya pasokan biomassa yang belum stabil, dari sisi operasional memiliki tantangan pada saat pengoperasian pembangkit, karena karakteristik pembakaran yang bervariasi, sedangkan dari sisi teknis implementasi co-firing biomassa untuk PLTU mempunyai potensi menyebabkan *fouling* di boiler. Dari tantangan tersebut perlu manajemen teknis dan logistik yang baik sehingga implementasi cofiring biomassa dapat berjalan dengan optimal (Ma et al., 2022).

2.3.2 Biomassa Sawdust

Serbuk kayu (*sawdust*) merupakan salah satu bentuk biomassa kayu yang biasa digunakan dalam program cofiring. Sawdust adalah limbah padat yang dihasilkan dari proses penggergajian, pemotongan, dan pengolahan kayu di industri perkayuan seperti pabrik kayu lapis, industri furnitur, dan industri pengolahan kayu lainnya. Limbah ini umumnya terdiri dari partikel halus dengan ukuran bervariasi antara beberapa mikrometer hingga beberapa milimeter, sehingga secara fisik relatif mudah dicampurkan dengan batubara dalam sistem pembakaran pulverized coal boiler.



Gambar 2. 8 Sawdust (Sumber : GreenVinci “Biomassa Energy”)

Ada beberapa keunggulan dari penggunaan sawdust sebagai bahan cofiring, di antaranya adalah ketersediaannya yang melimpah sebagai limbah industri, sifatnya yang terbarukan, serta kandungan karbon yang dari proses fotosintesis sehingga dianggap memiliki kontribusi penyerapan emisi CO₂. Sawdust biasanya dihasilkan dari berbagai kegiatan dalam industri pengolahan kayu. Di Indonesia, sawdust tersedia dalam jumlah besar terutama di daerah yang memiliki industri kehutanan dan perkayuan yang berkembang, seperti Sumatera, Kalimantan, dan Jawa. Karena itu, penggunaan sawdust sebagai bahan cofiring di PLTU dianggap memiliki potensi yang cukup baik dalam hal keberlanjutan pasokan bahan bakar. Proses produksi yang menghasilkan serbuk gergaji antara lain :

- a. Proses penggergajian bahan kayu (*sawmill*)
Batang kayu dipotong menjadi papan atau balok kayu, sehingga menghasilkan residu serbuk kayu dalam jumlah yang cukup besar.
- b. Sektor industri pengolahan plywood dan kayu lapis
Proses pemotongan dan perataan permukaan kayu menghasilkan limbah serbuk kayu yang halus.
- c. Sektor furnitur dan kerajinan kayu
Aktivitas pemotongan, pengamplasan, dan pembentukan kayu menghasilkan sawdust yang cukup banyak sebagai limbah.
- d. Sektor pengolahan biomassa dan pelet kayu
Sawdust menjadi bahan baku utama untuk produksi wood pellet. Sebagian residunya dapat digunakan sebagai biomassa fuel.

2.3.3 Karakteristik Sawdust

Karakteristik sawdust sebagai bahan bakar biomassa berbeda dari batubara, terutama dalam hal nilai kalor, komposisi kimia, dan kandungan kelembaban. Nilai kalor dari sawdust pada HHV nilainya berkisar 2800–3500 kcal/kg. Biomassa sawdust yang dimanfaatkan yaitu yang memiliki nilai kalor HHV sebesar 2988 kcal/kg, jauh lebih rendah dari nilai kalor HHV batubara. Perbedaan nilai kalor ini mengakibatkan peningkatan kebutuhan bahan bakar saat biomassa digunakan dalam proses cofiring. Biomassa sawdust mengandung volatile matter dalam jumlah besar, sehingga lebih mudah terbakar dari pada batubara. Namun, kandungan moisture yang tinggi dapat menyebabkan penurunan nilai kalor efektif, kenaikan rugi panas akibat penguapan air, dan penurunan tingkat efisiensi boiler. Oleh karena itu pengendalian kelembaban perlu dilakukan di tempat penyimpanan untuk mempertahankan kualitas biomassa sebagai bahan bakar. Komposisi dan karakteristik fisik tersaji pada tabel 2.4 dan tabel 2.5.

Tabel 2. 4 Unsur karbon Biomassa (Sumber : Website PLN Energi Primer Indonesia)

Unsur	Kandungan (%)
Carbon (C)	45 – 52
Hydrogen (H)	5 – 6
Oxygen (O)	40 – 45
Nitrogen (N)	<1
Sulfur (S)	sangat rendah (<0.1)

Tabel 2. 5 Karakteristik Fisik Biomassa (Sumber : Website PLN Energi Primer Indonesia)

Parameter	Karakteristik
Bentuk partikel	Serbuk halus
Bulk density	150 – 250 kg/m ³
Volatile matter	tinggi
Fixed carbon	relatif rendah
Ash content	rendah

2.4 Manajemen Stok Bahan Bakar Biomassa

Sistem zonasi di coal yard untuk cofiring biomassa dimaksudkan untuk menjaga konsistensi kualitas bahan bakar, terutama nilai kalor dan kadar air, sehingga pembakaran di boiler dapat berjalan dengan stabil. Selain itu, zonasi memungkinkan pengaturan komposisi bahan bakar yang lebih terkendali sehingga memudahkan operator dalam mengatur rasio cofiring sesuai dengan kondisi beban pembangkit. Dari segi operasional, sistem ini turut menjaga keandalan alat-alat, mengurangi fluktuasi pembakaran, serta meningkatkan aspek keselamatan dengan meminimalkan risiko kebakaran karena sifat biomassa yang mudah terbakar. Dibawah ini disampaikan manfaat dari strategi zonasi penyimpanan di area coal yard.

- Konsistensi dalam mengontrol kualitas bahan bakar dikarenakan dengan system zonasi akan mendapatkan HHV yang stabil dan moisture yang terkendali
- Menjaga stabilitas operasi boiler karena dengan system zonasi operator dapat mengetahui AFR yang dibutuhkan, sehingga dapat membuat pembakaran stabil dan flame tidak fluktuatif
- Dapat menjaga kehandalan peralatan karena dengan strategi zonasi operator dapat mengontrol lebih mudah pengatuhan bahan bakar yang masuk ke pulverizer agar tidak overload dan mengurangi gangguan system handling
- Dapat membuat fleksibilitas operasi karena dengan zonasi operator dapat dengan mudah mengatur % cofiring sehingga dapat adaptif terhadap perubahan beban
- Keamanan operasi menjadi sangat penting didapatkan Ketika dilaksanakan strategi zonasi karena dapat mengurangi resiko kebakaran dan mempermudah operator untuk melaksanakan monitoring.

Gambaran clusterisasi atau zonasi tersaji pada gambar 2.9 dibawah ini.

SISI UTARA				
1% Biomassa	2% Biomassa	3% Biomassa	4% Biomassa	5% Biomassa
6% Biomassa	7% Biomassa	8% Biomassa	9% Biomassa	10% Biomassa
SISI SELATAN				

Gambar 2. 9 Blending Zonasi Coal Yard Area

Dari cluster yang sudah dipetakan tersebut, selanjutnya dilakukan pemetaan skenario komposisi campuran biomassa pada setiap pembebanan dan persentase yang digunakan, skenario pembebanan dalam kegiatan cofiring berlangsung adalah sebagai berikut.

a. Skenario 1

Pembebanan pada skenario 1 adalah beban 70% dari total DMN PLTU XXX unit 5 yaitu 378 MW, skenario ini digunakan untuk mengakomodir permintaan dispatch pembangkit apabila tidak diminta beban maksimum. Pada skenario ini akan mencari Batasan maksimal persentase biomassa yang diijinkan menyesuaikan dengan Batasan perubahan parameter operasi.

b. Skenario 2

Pembebanan pada skenario 2 adalah beban 80% dari total DMN PLTU XXX unit 5 yaitu 432 MW, skenario ini digunakan untuk mengakomodir permintaan dispatch pembangkit apabila tidak diminta beban maksimum. Pada skenario ini akan mencari Batasan maksimal persentase biomassa yang diijinkan menyesuaikan dengan Batasan perubahan parameter operasi.

c. Skenario 3

Pembebanan pada skenario 3 adalah beban 90% dari total DMN PLTU XXX unit 5 yaitu 486 MW, skenario ini digunakan untuk mengakomodir permintaan dispatch pembangkit apabila tidak diminta beban maksimum. Pada skenario ini akan mencari Batasan maksimal persentase biomassa yang diijinkan menyesuaikan dengan Batasan perubahan parameter operasi.

d. Skenario 4

Pembebanan pada skenario 4 adalah beban 100% PLTU XXX unit 5 yaitu 540 MW, skenario ini digunakan untuk mengakomodir permintaan dispatch pembangkit apabila diminta beban maksimum. Pada skenario ini akan mencari Batasan maksimal persentase biomassa yang diijinkan menyesuaikan dengan Batasan perubahan parameter operasi.

Implementasi cofiring yang dilakukan dengan skenario penyimpanan pada area coal yard, diperlukan data spesifikasi bahan bakar terkait baik untuk batubara ataupun biomass. Pada penelitian ini batubara yang digunakan dari PT Adaro Indonesia dengan nilai kalor rata rata 4.653 kcal/kg dan biomassa jenis sawdust rata rata nilai kalor 2988 kcal/kg dengan spesifikasi bahan bakar di bawah ini.

Tabel 2. 6 Spesifikasi Bahan Bakar (Sumber: COA Bahan Bakar PLTU XXX)

Ultimate Analysis Component	Coal (%)	Biomass (%)
Carbon	49.45	29.54
Hydrogen	3.64	3.54
Oxygen	14.24	25.40
Nitrogen	0.88	0.30
Sulfur	0.10	0.00
Ash	2.27	0.30
TM	29.42	40.92
HHV (kcal/kg)	4653	2988

Tabel 2. 7 Spesifikasi Biomass (Sumber: COA Biomass PLTU XXX)

Bahan Bakar	Nilai Kalor (kkal/kg)	Ultimate Analysis (%)			
		TM	Retained mesh 5mm	Retained mesh 2.38mm	Passing mesh 2.38mm
Biomass	2988	40.92	11.67	30.33	69.67

Dalam proses simulasi dari permodelan yang sudah dilakukan, selanjutnya dicari data karakteristik bahan bakar sesuai dengan hasil skenario blending dengan menggunakan persamaan prinsip dasar mass balance dimana setiap properti yang bersifat intensif linier dapat dihitung dari rata rata berbobot massa masing masing bahan, maka dapat dilihat pada persamaan 2.1 dan 2.2 berikut: (Sumber : *Elementary Principles of Chemical Processes* oleh Felder & Rousseau)

$$\text{Material Properti} = \frac{(\text{Massa1} \times \text{Properti}) + (\text{Massa2} \times \text{Properti 2})}{\text{Massa total}} \quad (2.1)$$

Karena massa total = massa 1 + massa 2, maka :

Fraksi massa bahan 1 (Batubara) = $1 - x$

Fraksi massa bahan 2 (biomassa) = x

$$\text{Maka: } P_{\text{blend}} = (1-x) P_{\text{coal}} + x P_{\text{bio}} \quad (2.2)$$

2.5 Neraca Massa (Mass Balance) pada Sistem Boiler

2.5.1 Prinsip Neraca Massa

Neraca massa pada sistem boiler didasarkan pada hukum kekekalan massa, dimana dinyatakan bahwa pada kondisi tunak (*steady state*), jumlah massa yang masuk ke dalam suatu sistem sama

dengan jumlah massa yang keluar dari sistem tersebut. Sehingga secara umum, neraca massa dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\sum \dot{m}_{\text{masuk}} = \sum \dot{m}_{\text{keluar}} \quad (2.5)$$

$$\text{Bahan Bakar Campuran} = (1 - X) P_{\text{Batubara}} + X P_{\text{biomass}}$$

Jika dua bahan dicampur, maka setiap properti yang bersifat intensif linear (seperti kadar unsur, persentase komponen, HHV per kg, kadar air, dll.) bisa dihitung dari rata-rata berbobot massa masing-masing bahan. Pada sistem pembakaran boiler di PLTU, massa yang masuk terdiri dari bahan bakar (batubara dan biomassa) serta udara pembakaran, sedangkan massa yang keluar berupa gas buang (*flue gas*) dan residu padat (abu).

2.5.2 Neraca Massa Bahan Bakar dan Udara

Untuk sistem cofiring, laju alir massa bahan bakar campuran dinyatakan dalam Persamaan berikut :

$$\dot{m}_{\text{fuel}} = \dot{m}_{\text{coal}} + \dot{m}_{\text{biomassa}} \quad (2.6)$$

Udara pembakaran pada PLTU untuk suplai ke boiler dibagi menjadi dua, yaitu *primary air* dan *secondary air*. Kebutuhan udara teoritis ditentukan berdasarkan komposisi unsur bahan bakar diantaranya Carbon, Hydrogen, Oksigen dan Sulfur (C,H,O dan S) unsur tersebut diperoleh dari *ultimate analysis* atau *Certificate of Analysis (COA)*. kebutuhan udara aktual kemudian ditentukan dengan menambahkan excess air untuk menjamin pembakaran sempurna, berikut merupakan persamaan yang dapat digunakan untuk mendapatkan laju air *air fuel ratio* (AFR).

Reaksi dasar :

- Karbon : $C + O_2 = CO_2$
- Hidrogen : $H_2 + 1/2O_2 = H_2O$
- Sulfur : $S + O_2 = SO_2$

Pada reaksi diatas untuk :

- 1 Kg C membutuhkan 2,67 Kg O₂
- 1 Kg H membutuhkan 8 Kg O₂
- 1 Kg S membutuhkan 1 Kg O₂

Kandungan oksigen dalam udara adalah sebesar 23,2% sehingga kebutuhan udara stoikiometri sehingga diperoleh:

$$AFR = \frac{2,67C+8H+S-O}{0,232} \quad (2.7)$$

$$AFR = 11,51C + 34,48H + 4,31S - 4,31O$$

$$AFR = 11,51 \frac{\%C}{100} + 34,48 \frac{\%H}{100} + 4,31 \frac{\%S}{100} - 4,31 \frac{\%O}{100}$$

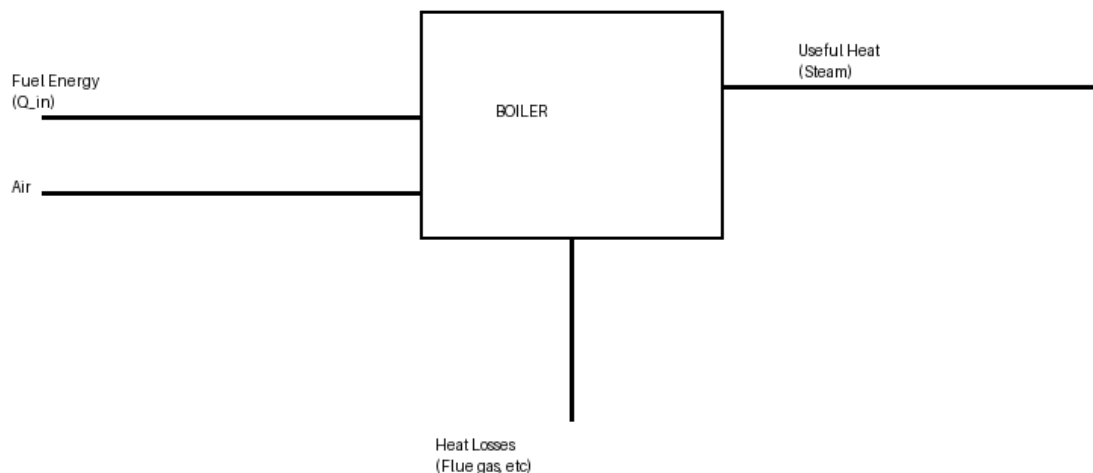
$$AFR = 0.1151 \times \%C + 0.3448 \times \%H + 0.0431 \times \%S - 0.0432 \times \%O$$

Pada proses pembakaran di PLTU, dengan mengatur nilai *excess air* sesuai dengan kebutuhan stoikiometrik akan meningkatkan nilai efisiensi boiler (Alfarisyi et al., 2022). Namun apabila nilai *excess air* terlalu tinggi, maka nilai *losses* pada boiler juga akan semakin tinggi. Dalam pelaksanaan cofiring biomassa, peningkatan fraksi biomassa dapat menyebabkan peningkatan kebutuhan udara aktual, hal ini dikarenakan kandungan oksigen internal dan volatil biomassa yang lebih tinggi memerlukan pengendalian pembakaran dengan rasio udara dan bahan bakar yang lebih besar.

2.6 Neraca Energi (Energy Balance) pada Boiler

2.6.1 Prinsip Neraca Energi

Neraca energi pada boiler didasarkan pada hukum kekekalan energi, yang dimana bahwa energi yang masuk ke dalam sistem harus sama dengan energi yang keluar dari sistem ditambah dengan energi yang tersimpan. Pada kondisi operasi normal, neraca energi boiler dapat dibuat dengan persamaan sebagai berikut :



Gambar 2. 10 Blok diagram neraca energi boiler (Sumber : Research Gate "exergy destruction analysis)

Dimana :

Fuel Energy (Qin) : energi yang masuk ke dalam system dari bahan bakar yang Dibakar

Air : udara yang digunakan dalam proses pembakaran

Boiler : proses konversi dari bahan bakar menjadi uap
 Useful heat : energi yang dihasilkan dalam bentuk uap
 Heat losses : energi yang hilang pada gas buang dan lain lain.

$$Q_{in} = Q_{useful} + Q_{Losses} \quad (2.8)$$

$$\dot{m}_{fuel} \cdot HHV_{mix} = \dot{m}_{steam} (h_{steam} - h_{fw}) + \sum \dot{Q}_{loss} \quad (2.9)$$

dimana $\sum \dot{Q}_{loss}$ meliputi kehilangan panas melalui gas buang, kelembaban bahan bakar, bahan bakar yang tidak terbakar, serta rugi rugi perpindahan panas.

2.6.2 Efisiensi Boiler

Efisiensi boiler merupakan parameter utama untuk menilai kinerja termal pada sistem pembakaran. Efisiensi dapat dihitung menggunakan dua cara, pertama menggunakan metode langsung atau disebut sebagai *direct method* dan juga dengan metode tidak langsung atau disebut sebagai *indirect method*. Pada PLTU metode yang digunakan untuk evaluasi performa yaitu menggunakan metode tidak langsung atau *heat loss method*, metode ini dapat mengidentifikasi kontribusi masing masing rugi panas secara terpisah, sehingga menurut standar ASME PTC 4, energi panas yang masuk dari bahan bakar sama dengan energi yang dimanfaatkan untuk membangkitkan ditambah total rugi panas yang dinyatakan sebagai berikut

$$Q_{in} = Q_{useful} + Q_{Losses} \quad (2.10)$$

Efisiensi boiler adalah perbandingan antara energi yang dimanfaatkan terhadap energi masuk bahan bakar, dinyatakan sebagai berikut :

$$\eta_{boiler} = \frac{Q_{useful}}{Q_{in}} \quad (2.11)$$

Dengan mensubstitusikan $Q_{useful} = Q_{in} - Q_{Losses}$, maka :

$$\eta_{boiler} = 1 - \frac{Q_{loss}}{Q_{in}} \quad (2.12)$$

Dalam metode heat loss dinyatakan bahwa total rugi panas boiler itu terdiri dari rugi panas karena gas buang kering, moisture, unburn carbon, radiasi dan konveksi pada saat proses pembakaran. efisiensi boiler dengan metode tidak langsung disampaikan dengan persamaan sebagai berikut dimana masing masing rugi panas dinyatakan sebagai fraksi terhadap energi masuk bahan bakar: (Sumber : ASME PTC 4 "Performance Test Code for Fired Steam Generators American Society of Mechanical Engineers")

$$\eta_{boiler} = 1 - (L_{dry flue gas} + L_{moisture} + L_{unburn} + L_{radiation}) \quad (2.13)$$

$$(\%) \eta_{\text{boiler}} = 100 - (L_{\text{dry flue gas}} + L_{\text{moisture}} + L_{\text{unburn}} + L_{\text{radiation}}) \quad (2.14)$$

Pada persamaan diatas menunjukan bahwa semakin besar total rugi panas yang terjadi maka efisiensi boiler akan semakin rendah. Pada cofiring biomassa, rugi panas akibat gas buang dan kelembaban cenderung meningkat seiring bertambahnya fraksi biomassa, sehingga efisiensi boiler berpotensi menurun meskipun daya keluaran pembangkit dipertahankan.

2.7 Pemodelan Pembangkit

Untuk mengetahui performance pembangkit, salah satu hal yang bisa dilakukan tanpa harus melakukan pengujian adalah dengan membuat suatu simulasi permodelan. Terdapat beberapa *software* yang dapat digunakan sebagai tool dalam pembuatan simulasi pembangkit thermal seperti cycle tempo, thermoflow, Gatecycle, DWSim, Aspen Hysys, Dll. Untuk penelitian ini penulis akan menggunakan Gate Cycle karena cenderung lebih detail dan lebih cocok digunakan untuk sistem pembangkit thermal.

GateCycle adalah merupakan suatu program komputer yang digunakan untuk melakukan perencanaan, design dan mengevaluasi sesuatu performance sistem termal PLTU baik secara design maupun secara off-design. Aplikasi ini dapat mensimulasikan dan mengevaluasi kinerja operasional dengan berbagai kondisi, termasuk dapat diintegrasikan dengan teknologi baru ataupun perubahan beban. (Vidian, F.M. & Tomi, A. 2019). GateCycle dapat digunakan untuk melakukan Analisa seperti :

- a) Melakukan Analisa siklus secara keseluruhan, Analisa ini dapat menghasilkan informasi terkait performance peralatan, parameter operasi termasuk efisiensi siklus dan daya output.
- b) Melakukan evaluasi terkait pengecekan claim yang sudah di sepakati dengan vendor terkait performance dari total output daya yang sudah di atur dalam kontrak.
- c) Mensimulasikan performance operasi melalui kondisi operasi off-design
- d) Mensimulasikan dan memprediksi pengaruh perubahan operasi pembangkit baik perubahan bahan bakar ataupun perubahan pada peralatan.

GateCycle merupakan aplikasi yang sangat efektif untuk mensimulasi dan mengevaluasi sistem PLTU berbahan bakar batu bara, karena dapat digunakan untuk mengevaluasi penggunaan bahan bakar alternatif seperti biomassa atau limbah. Beberapa studi menunjukan adanya efek perubahan efisiensi dan perubahan pada parameter kerja turbin. (Emmanuel,M., et al., 2017). Gambar 2.11 menunjukan terkait siklus pembangkit listrik tenaga uap yang dimodelkan pada aplikasi gatecycle. Pada aplikasi tersebut setiap komponen utama PLTU

mulai dari boiler, turbin, kondensor, generator sampai menghasilkan listrik dipresentasikan sebagai blok yang saling terhubung satu sama lain, sehingga dapat menganalisa performanya



Gambar 2. 11 Alur proses PLTU

2.8 Perubahan Emisi CO₂ Fosil

Pencampuran bahan bakar antara batu bara dengan biomassa yang dibakar di dalam boiler berpengaruh terhadap emisi CO₂ yang di hasilkan , karena pada penelitian ini tidak membahas secara mendalam terkait kegiatan cofiring terhadap perubahan CO₂ , hanya disimulasikan pada Persentase pengurangan CO₂ fosil ketika cofiring sawdust dengan HHV 2.988 kcal/kg pada PLTU XXX Unit 5, perubahan fuel flow dan disimulasikan bahwa CO₂ biogenik dari biomassa yang dihitung 0 (net-zero at stack). Komponen yang menghasilkan CO₂ adalah karbon sehingga reaksi stoikiometrinya Adalah :



Perubahan Emisi CO₂ Fosil adalah hasil dari pengurangan CO₂ fosil yang dihitung dari fraksi biomassa dan laju alir bahan bakar. Pendekatan ini merujuk pada prinsip stoikiometri pembakaran karbon dan konsep emisi faktor berbasis energi dengan asumsi bahwa CO₂ dari biomassa adalah netral (biogenic carbon). Rumus dari stoikiometri disajikan dalam persamaan 2.3 dan 2.4 berikut: (Sumber : IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2 Energy, Chapter 2 Stationary Combustion*)

$$\Delta CO_{2\text{ fosil}} = CO_{2\text{ before}} - CO_{2\text{ after}} \quad (2.3)$$

$$CO_{2\text{ fosil}} = m_{\text{fuel}} \times EF_{\text{fosil}} \times (1 - x_{\text{biomassa}}) \quad (2.4)$$

Dengan:

m_{fuel} = laju alir bahan bakar

EF_{fosil} = emission factor (kg CO₂/GJ atau kg CO₂ kg fuel)

x_{biomassa} = fraksi energi biomassa