

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Landasan Teori

Pengertian Pembangkit listrik

Pembangkit listrik merupakan sistem yang memiliki fungsi untuk mengubah energi primer menjadi energi listrik. Energi primer yang berasal dari berbagai sumber seperti bahan bakar fosil, panas bumi, angin, air, maupun reaksi tenaga nuklir. Proses perubahan energi melalui beberapa tahapan yang melibatkan komponen termal dan mekanis. Hasil dari proses tersebut ialah energi listrik yang akan dialirkan ke sistem transmisi selanjutnya disalurkan kepada pelanggan masyarakat umum maupun industri.

2.1.1. Pembangkit Listrik Tenaga Uap

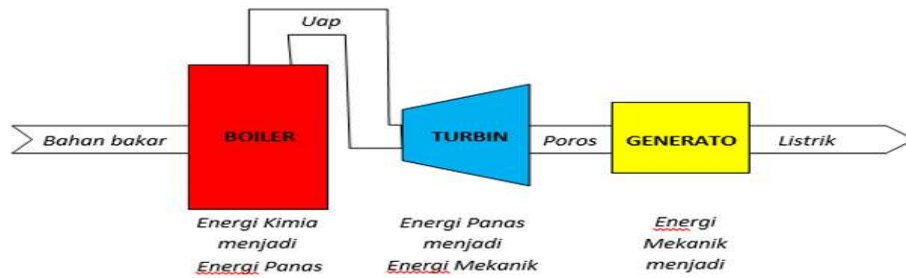
Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu sumber energi utama di Indonesia, PLTU digolongkan sebagai pembangkit Listrik tenaga thermal yang mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi Listrik. Bahan bakar pada PLTU dapat berupa bahan bakar padat (Batubara), cair (BBM).

Uap yang terjadi dari hasil pemanasan boiler/ketel uap pada PLTU digunakan untuk memutar turbin yang kemudian oleh generator diubah menjadi energi Listrik.

PLTU adalah jenis pembangkit tenaga thermal yang banyak digunakan, karena efisiensinya tinggi sehingga menghasilkan energi Listrik yang ekonomis. PLTU merupakan mesin konversi yang mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi Listrik.

Proses konversi energi pada PLTU berlangsung melalui 3 tahapan, yaitu :

1. Pertama, energi kimia dalam bahan bakar diubah menjadi energi panas dalam bentuk uap bertekanan dan temperature tinggi.
2. Kedua, energi panas (uap) diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran .
3. Ketiga, energi mekanik diubah menjadi energi Listrik.



Gambar 2.1 Konversi Energi PLTU

2.1.2. Komponen Utama PLTU

Komponen utama PLTU terdiri dari:

1. Boiler

Boiler merupakan peralatan konversi energi yang berfungsi memanfaatkan panas hasil pembakaran bahan bakar untuk mentransfer energi termal ke air umpan (*feedwater*), sehingga menghasilkan uap superpanas (*superheated steam*) dengan tekanan dan temperatur tinggi.

Panas yang dihasilkan di dalam ruang bakar diserap secara radiasi oleh pipa-pipa *evaporator* yang tersusun membentuk dinding ruang bakar. Air yang mengalir di dalam pipa-pipa tersebut menerima panas, sehingga berubah menjadi uap jenuh (*saturated steam*) yang kemudian ditampung di dalam *drum boiler*.

Di dalam *drum boiler*, uap dipisahkan dari air. Air hasil pemisahan dialirkan menuju *header* bagian bawah *evaporator* bersama dengan air dari *economizer* melalui pipa *downcomer* berpenampang besar yang terpasang di luar boiler. Sementara itu, uap jenuh yang telah terpisah diarahkan ke pipa-pipa *superheater* untuk meningkatkan temperaturnya menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*).

Pemanasan lanjutan ini dilakukan dengan memanfaatkan panas gas buang dari boiler yang ditransfer secara konveksi ke pipa-pipa *superheater*. Uap kering bertekanan dan bertemperatur tinggi tersebut kemudian siap digunakan untuk menggerakkan turbin.

Gas buang dari superheater mengalir melewati bagian luar pipa-pipa economizer, yang di dalamnya dialiri air oleh Boiler Feed Pump (BFP). Proses ini menyebabkan temperatur air meningkat hingga mendekati temperatur air di drum boiler. Setelah melewati economiser, gas buang dialirkan menuju air heater, di mana panasnya dimanfaatkan untuk memanaskan udara primer dan udara sekunder sebelum masuk ke ruang bakar. Selanjutnya, gas buang bergerak ke electrostatic precipitator (ESP) untuk menangkap partikel abu yang terkandung di dalamnya. Gas buang yang sudah bersih kemudian dihisap oleh induced draft fan (IDF) dan didorong keluar ke atmosfer melalui cerobong asap.

2. Turbin Uap

Turbin uap adalah peralatan yang berfungsi untuk mengubah energi yang terkandung dalam uap (*entalpi*) menjadi energi mekanik berupa momen putar pada poros turbin. Saat uap melewati nosel dan sudu stator (sudu diam) yang terpasang pada stator turbin, energi panas dalam uap dikonversi menjadi energi kinetik berupa kecepatan aliran uap. Selanjutnya, uap berkecepatan tinggi mengalir melalui sudu rotor (sudu gerak), sehingga energi kinetik uap diubah menjadi energi mekanik yang memutar poros turbin. Akibat kerja yang dilakukan turbin, tekanan dan temperatur uap menurun hingga menjadi uap basah. Uap ini kemudian dialirkan ke kondensor, sementara energi mekanik yang dihasilkan digunakan untuk memutar generator, sehingga listrik dapat dihasilkan.

3. Kondensor

Kondensor adalah peralatan yang berfungsi untuk mengubah uap keluar turbin menjadi air kondensat, sehingga dapat digunakan kembali sebagai air pengisi boiler. Uap yang mengalir di luar pipa-pipa kondensor mentransfer panasnya ke air pendingin yang mengalir di dalam pipa-pipa kondensor, sehingga terjadi kondensasi dan air hasil kondensasi ditampung di dalam hotwell. Air pendingin biasanya berasal dari sungai atau laut. Proses kondensasi berlangsung pada tekanan dan temperatur yang relatif tetap. Adanya vakum di dalam ruang kondensor memungkinkan uap dapat mengembun pada temperatur di bawah

100°C dalam ruang tertutup. Kondensor memiliki peran penting terhadap efisiensi PLTU, karena hampir 50% panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar diserap oleh air pendingin dalam kondensor sebelum dibuang ke laut. Perubahan kecil pada vakum kondensor dapat berdampak signifikan terhadap efisiensi PLTU. Oleh karena itu, menjaga kondensor agar selalu beroperasi dengan kondisi optimal sangatlah penting.

4. Generator

Tujuan utama dari proses di PLTU adalah menghasilkan energi listrik. Generator berfungsi mengubah energi mekanik berupa putaran poros menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnetik.

Generator terdiri dari dua bagian utama: bagian yang diam disebut stator, dan bagian yang berputar disebut rotor. Stator terdiri dari casing yang di dalamnya terdapat kumparan tiga fasa, sedangkan rotor, sebagai sumber medan magnet, terdiri dari inti yang dililit kumparan. Kumparan rotor dialiri arus eksitasi sehingga terbentuk garis-garis medan magnet. Saat rotor diputar, garis-garis medan magnet ikut berputar dan memotong kumparan stator, sehingga timbul gaya gerak listrik (ggl) pada kumparan stator. Jika ujung-ujung kumparan stator dihubungkan dengan beban listrik, akan mengalir arus bolak-balik tiga fasa, sehingga generator dapat menghasilkan energi listrik.

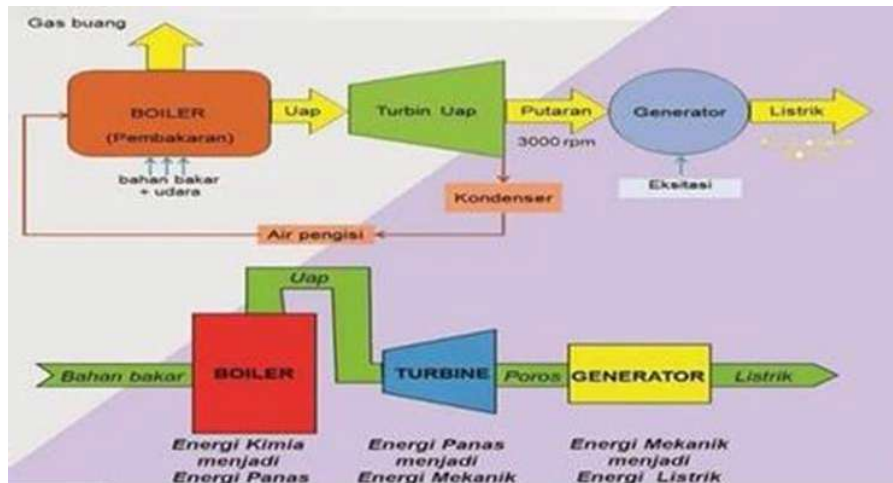
2.1.3. Pengenalan Peralatan Boiler CFB dari PLTU Labuhan Angin

PLTU Labuhan angin memiliki sistem kerja pembangkitan yang menggunakan mesin boiler tipe CFB (*Circulating Fluidized Bed*). Konsep dasar dari boiler CFB (*Circulating Fluidized Bed*) berawal dari boiler stroker (unggun fluidisasi) dimana batu bara dibakar diatas rantai berjalan (*belt conveyor*) dan diberi hembusan udara dari sisi bawah sehingga batu bara membara diatas rantai berjalan tersebut. Setelah dilakukan repowering dan redesigning maka didapatkanlah jenis boiler dengan tipe CFB (*Circulating Fluidized Bed*)

Secara sederhana prinsip kerja boiler CFB (*Circulating Fluidized Bed*) yaitu dengan mensirkulasikan bed material ke furnace secara kontinyu selama boiler beroperasi yang dibantu oleh udara bertekanan tinggi dari nozzle yang berada di dasar furnace. Berdasarkan penamaannya, *Circulating Fluidized Bed* dapat diartikan sebagai berikut :

- a. *CIRCULATING* : Terjadinya sirkulasi batu bara yang belum habis terbakar dari furnace ke Compact separator kemudian masuk ke return leg dan kembali ke furnace.
- b. *FLUIDIZED* : Penghambusan udara primer untuk menjaga bed material dan batu bara tetap melayang dalam furnace.
- c. *BED* : Material berupa partikel-partikel kecil (pasir, kuarsa, bottom ash) yang digunakan sebagai media awal transfer panas dari pembakaran HSD (High Speed Diesel) ke pembakaran batu bara.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama dari pembangkit listrik jenis ini adalah generator yang seporos dengan turbin yang digerakkan oleh tenaga kinetik dari uap panas/kering. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan berbagai macam bahan bakar terutama batu bara dan minyak bakar serta MFO untuk start up awal.



PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) merupakan pembangkit yang paling banyak digunakan di Indonesia. Hal ini karena dalam pengoperasiannya dapat menggunakan berbagai jenis bahan bakar, usia pakai yang relatif lama dan dapat menghasilkan daya yang lebih besar.

2.1.4. Sistem Operasional PLTU

Sistem operasional pada PLTU terbagi menjadi tiga bagian utama. Pertama, proses pengambilan dan pengolahan air laut hingga menjadi air demineralisasi (Demin) disebut *Water treatment plant*. Kedua, air Demin yang diolah menjadi uap untuk memutar turbin, kemudian mengalami kondensasi kembali menjadi air, disebut Siklus Turbin. Ketiga, proses dari bahan bakar, baik batu bara (*coal*) maupun HSD (*High-Speed Diesel*), yang digunakan dalam pembakaran hingga menghasilkan gas buang yang dikeluarkan melalui cerobong, disebut Sistem Boiler.

1. WTP (Water Treatment Plant)

Water treatment plant adalah sistem pada PLTU yang berfungsi sebagai fasilitas pengolahan air, mulai dari mengubah air laut menjadi air tawar hingga menghasilkan air demineralisasi yang digunakan dalam proses pembangkitan listrik.

Dalam proses pengolahan air laut menjadi air demineralisasi, dimulai dari pengambilan air laut dengan menggunakan Pompa air laut (Sea Water Feed Pump).

Proses pertama pengolahan air adalah dengan disaring terlebih dahulu untuk menghilangkan kotoran-kotoran atau sampah yang berukuran cukup besar, menggunakan Traveling Bar Screen (TBS). Lalu air diinjeksikan menuju Multimedia Filter untuk menyaring partikel besar dan kotoran yang terdapat pada air laut, sebelum menuju proses penyaringan selanjutnya di Cartridge Filter yang berfungsi untuk menghilangkan partikel padat dan memastikan kualitas fluida agar tidak merusak peralatan sebelum masuk ke Sea Water Reverse Osmosis (SWRO).

Di *desalination plant* ini air laut diolah untuk menghilangkan kadar garam dari air laut.

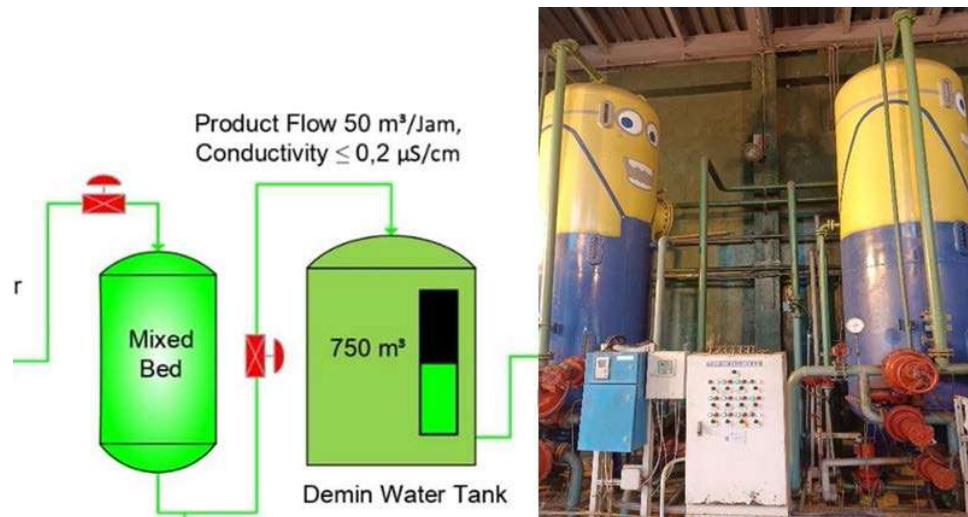


Prosesnya adalah dengan memompakan air laut dengan tekanan tinggi untuk masuk kedalam vessel– vessel yang di dalam terdapat membran semipermeable. Pada proses ini molekul garam tidak dapat menembus membran sehingga yang mengalir hanyalah molekul air saja. Sehingga setelah melewati proses RO air laut akan berubah menjadi air tawar dan ditampung pada Bitterish Water Tank.

Proses selanjutnya adalah proses penghilangan mineral - mineral yang terkandung di air tawar yang terjadi di Mixed Bed pada Water treatment plant. Proses yang terjadi di Mixed Bed adalah peningkatan ion – ion positif dan negatif dari raw water dengan menggunakan resin. Resin yang digunakan bermuatan positif dan negatif, jadi ion

positif yang terkandung dalam air akan terikat oleh resin bermuatan negatif, sementara ion negatif yang terkandung dalam air akan terikat oleh resin bermuatan positif.

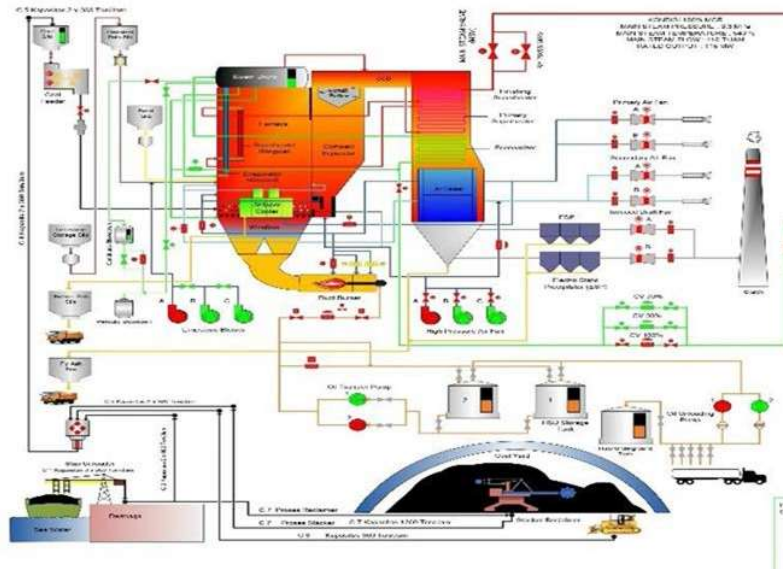
Hasil dari Mixed Bed adalah Demin Water (air bebas mineral) yang ditampung di Demin Water Tank.



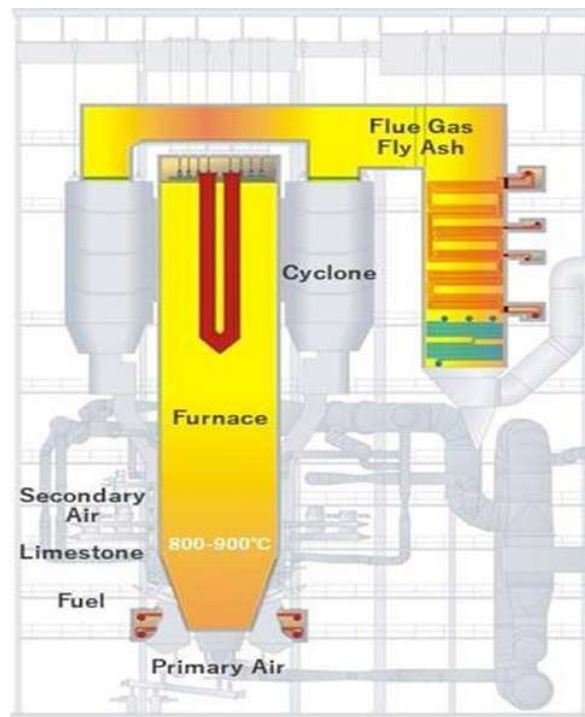
2. Siklus Boiler PLTU Labuhan Angin

Siklus boiler adalah rangkaian proses yang terjadi dalam sistem pembangkit uap untuk menghasilkan tenaga atau panas, di mana air dipanaskan untuk menghasilkan uap, yang kemudian digunakan untuk memutar turbin dan menghasilkan energi. Air dipanaskan dalam boiler hingga berubah menjadi uap bertekanan tinggi, kemudian digunakan untuk memutar turbin guna menghasilkan energi mekanik yang dikonversi menjadi listrik.

Setelah melewati turbin, uap masuk ke kondensor untuk didinginkan dan kembali menjadi air. Air hasil kondensasi ini kemudian dipompa kembali ke boiler untuk mengulang siklusnya. Siklus ini umumnya menggunakan prinsip Siklus Rankine dan dapat ditingkatkan efisiensinya dengan teknik regeneratif atau pemanasan ulang.



Siklus boiler CFB di PLTU Labuhan Angin dimulai dengan penggunaan HSD (*High-Speed Diesel*) sebagai bahan bakar *start-up*. HSD digunakan pada tahap awal pemanasan boiler melalui burner hingga suhu boiler mencapai 450°C , yang merupakan suhu minimum agar proses pembakaran dapat berlangsung optimal. Setelah suhu ini tercapai, bahan bakar utama, yaitu batu bara jenis low-calorie dengan nilai kalor berkisar antara 4.054 - 5.260 kCal/kg, mulai digunakan. Batu bara ini dipasok melalui coal feeder ke dalam furnace, di mana pembakaran terjadi dengan bantuan udara dari primary air fan (PAF) dan secondary air fan (SAF) untuk memastikan efisiensi pembakaran yang tinggi.



Batu bara sebagai bahan bakar utama pertama-tama diangkut dari tongkang menuju coal yard menggunakan unloader. Setelah itu, batu bara dikirim ke crusher untuk dihancurkan hingga mencapai ukuran yang sesuai dengan spesifikasi boiler CFB, yaitu 6 mm. Setelah melalui proses penghancuran, batu bara disimpan di coal silo sebagai stok bahan bakar siap pakai. Dari coal silo, batu bara kemudian didorong oleh coal feeder dan dialirkan menuju ruang furnace, di mana proses pembakaran berlangsung. Fan furnace, terdapat bed material dan batu bara. Bed material, yang berupa pasir, berfungsi untuk menjaga kestabilan temperatur Fan furnace, memastikan pembakaran berlangsung dengan efisiensi tinggi. Kedua material tersebut kemudian dibakar Fan furnace dengan bantuan Primary Air Fan (PA Fan), yang berperan sebagai suplai udara utama dalam proses pembakaran. Udara primer ini membantu mengambangkan batu bara dan bed material, menciptakan efek fluidisasi yang khas pada boiler CFB. Selanjutnya, Secondary Air Fan (SA Fan) berfungsi untuk menyempurnakan pembakaran dengan memasok udara tambahan sekaligus membantu menjaga pergerakan serta distribusi bed material dan batu bara dalam area furnace, sehingga pembakaran menjadi lebih optimal dan emisi yang Cyclone

Separator (*Compact separator*) berfungsi untuk memisahkan abu, bed material, dan sisa batu bara dari gas hasil pembakaran di *furnace*. Proses ini bekerja dengan prinsip gaya sentrifugal, di mana gas panas yang membawa material akan berputarFan separator. Partikel yang lebih berat, seperti bed material dan sisa batu bara, akan jatuh kembali ke *furnace* untuk mengalami pembakaran ulang, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar. Sementara itu, gas hasil pembakaran yang lebih bersih akan mengalir menuju Heat Recovery Area (HRA). Di HRA, gas panas hasil pembakaran dimanfaatkan untuk memanaskan beberapa komponen utama, yaitu *Primary Superheater*, *Finishing Superheater*, *Economizer*, dan *Air heater*. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi termal boiler.

Selanjutnya, batu bara dan bed material yang telah dipisahkan akan disirkulasikan kembali ke dalam *furnace* dengan bantuan HPA(*High-Pressure Air*) *Fan*, memastikan proses pembakaran berlangsung secara optimal dan berkelanjutan.

PLTU Labuhan Angin dengan tipe CFB terdiri dari tiga komponen pokok, yaitu:

1. Furnace

Berfungsi sebagai tempat terjadinya proses pembakaran bahan bakar. Komponen utama yang terdapat di dalam *furnace* meliputi *wall tube*, *panel evaporator*, dan *panel superheater*.

2. Compact Separator

Komponen ini berfungsi untuk memisahkan partikel batubara yang belum terbakar dari abu sisa pembakaran (*ash*), kemudian mengembalikan partikel batubara tersebut ke *furnace* untuk dibakar kembali.

3. Backpass

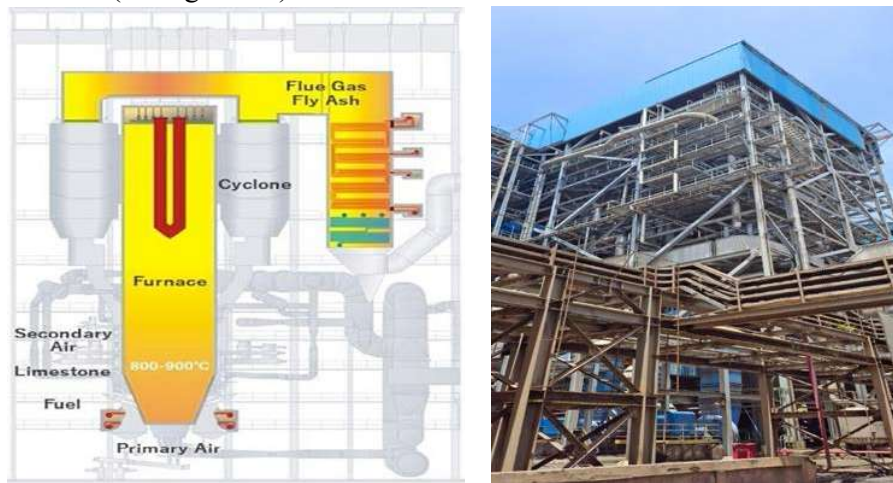
Berfungsi sebagai ruang untuk memanfaatkan panas yang masih terkandung dalam gas buang (*flue gas*). Bagian utama dari backpass meliputi *finishing superheater*, *primary superheater*, *economizer*, dan *tubular air heater*.

Proses pembakaran pada boiler tipe CFB memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan jenis boiler lainnya. Konsep utama pembakaran pada boiler ini adalah sebagai berikut:

1. Boiler CFB mampu beroperasi dengan tingkat emisi gas buang yang sangat rendah, khususnya emisi **SO_x** dan **NO_x**.)
2. Batubara dibakar di dalam *bed of hot material* yang berputar dan tersuspensi di dalam furnace akibat tingginya kecepatan aliran udara, sehingga tercipta kondisi *fluidisasi* pada material bed.
3. Material yang terdapat di dalam *bed inventory* terdiri atas bahan bakar batubara (*coal fuel*), sorben, pasir inert (*inert sand*), serta partikel batubara yang disirkulasikan kembali dari *compact separator*.

2.1.4 Bagian Boiler dan Alat Bantunya

1. Furnace (Ruang Bakar)



Gambar 2.3 Furnace

(Dokumentasi Pribadi)

Ruang bakar ialah bagian dari boiler yang berfungsi sebagai tempat terjadinya proses pembakaran antara udara dan bahan bakar. Tekanan gas panas di dalam ruang bakar (furnace) memiliki nilai yang berbeda dibandingkan tekanan udara di

luar, yaitu bisa lebih tinggi (tekanan positif), lebih rendah (tekanan negatif), ataupun seimbang (balance draught). Secara umum, boiler dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan tekanan ruang bakarnya, yaitu:

A. Tekanan Positif

Pada boiler dengan tekanan ruang bakar positif, udara luar dipaksa masuk ke ruang bakar menggunakan *forced draft fan* (kipas tekan paksa). Kipas berfungsi untuk memasok udara pembakaran dan juga mendorong gas panas hasil pembakaran menuju cerobong asap.

B. Tekanan Negatif

Sementara itu, pada boiler dengan tekanan ruang bakar negatif, gas panas hasil pembakaran dihisap keluar oleh *induced draft fan*. Hisapan ini juga menyebabkan udara luar tertarik masuk ke ruang bakar. Kombinasi antara sistem forced draught fan dan induced draft fan dikenal dengan istilah balanced draught, yaitu sistem di mana tekanan ruang bakar dijaga sedikit negatif, sekitar -10 mmWg (0,001 bar).

Boiler dengan tekanan negatif jarang digunakan karena kurang efisien secara ekonomi. Sebaliknya, sistem balanced draught lebih banyak diterapkan, terutama pada boiler yang menggunakan bahan bakar batubara..

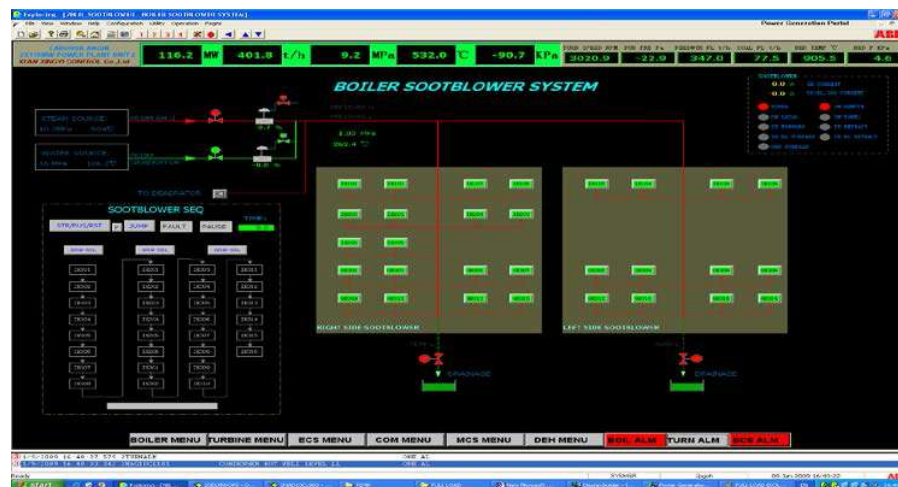
2. Sootblower (Pembersih Jelaga)

Boiler modern umumnya dilengkapi dengan sootblower atau alat pembersih jelaga yang dapat dioperasikan dari jarak jauh (remotely operated) dan dikendalikan secara bergantian maupun berurutan. Fungsi utama sootblower adalah membersihkan abu, debu, atau jelaga yang menempel pada pipa-pipa boiler, superheater, economizer, maupun elemen air heater. Pembersihan ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi boiler sekaligus mencegah kerusakan pada pipa-pipa di boiler dan superheater. Biasanya, proses pembersihan menggunakan uap.

Uap yang dipakai untuk membersihkan jelaga biasanya diambil langsung dari boiler, baik dari sisi keluar pemanas lanjut primer maupun dari sisi masuk cold reheater. Selain itu, uap dari boiler bantu (auxiliary boiler) juga dapat digunakan.

Tekanan uap yang menuju setiap sootblower dikontrol dan diturunkan sesuai kebutuhan menggunakan plat-orifis (orifice plate).

Namun, sistem pembersihan menggunakan udara ini membutuhkan investasi tambahan untuk compressor berkapasitas besar, sehingga memerlukan biaya lebih tinggi dibandingkan sistem berbasis uap.



Gambar 2. 4 Display DCS boiler sootblower system

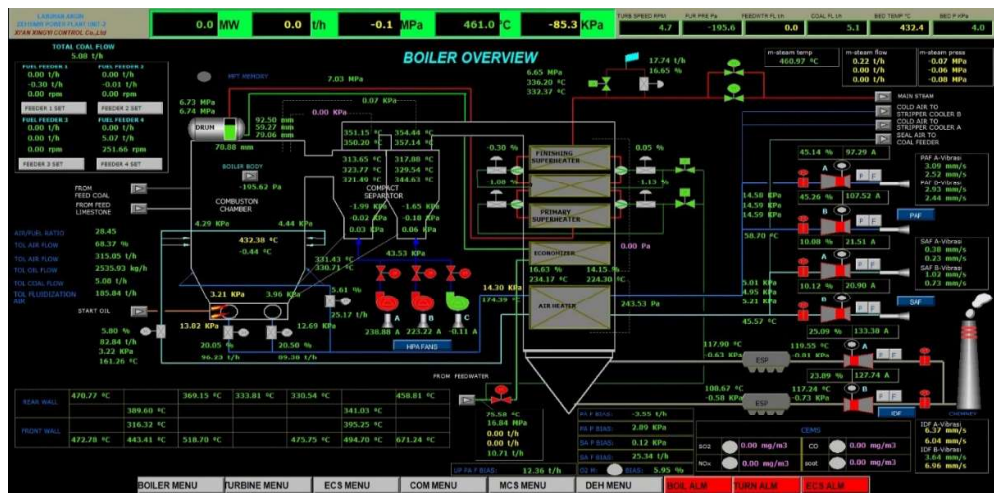
3. Burner



Gambar 2. 5 Burner (Dokumentasi pribadi)

Burner adalah alat yang digunakan untuk memasukkan bahan bakar ke dalam ruang bakar sekaligus menghasilkan pengabutan yang mempermudah terjadinya reaksi pembakaran. Secara umum, terdapat tiga jenis burner minyak, yang masing-masing menggunakan metode berbeda untuk mengatomisasi minyak, yaitu:

- Boiler CFB di Labuhan Angin menggunakan burner dengan atomisasi udara. Pada tipe ini, atomisasi dilakukan menggunakan udara bertekanan tinggi, serupa dengan prinsip atomisasi menggunakan uap. Meskipun efektif, jenis pembakaran ini jarang dipilih oleh perancang boiler karena memerlukan *compressor* udara tambahan, yang biaya pemasangan dan perawatannya relatif mahal.
4. Primary Air Fan, Secondary Air Fan, Induced Draft Fan, dan High Pressure Air Fan



Gambar 2. 6 *Tampilan DCS Boiler Overview*



Gambar 2. 7 Primary Air Fan
Dokumentasi pribadi



Gambar 2. 8 Secondary Air Fan
Domumentasi pribadi



Gambar 2. 9 HPA Fan

Dokumentasi pribadi



Gambar 2. 10 ID Fan

Dokumentasi pribadi

Penggunaan fan pada PLTU batubara lebih dari satu jenis, yaitu PA fan, SA fan, ID fan dan HPA fan. PA fan berfungsi sebagai pemasok udara fluidisasi dan pembakaran kedalam ruang bakar. SA fan berfungsi sebagai excess air (udara fan berfungsi untuk mempertahankan tekanan diruang bakar dan menarik udara sisa

pembakaran untuk dibuang melalui stack (cerobong). HPA fan berfungsi untuk udara seal di daerah return leg agar tekanan menjadi vakum dan sirkulasi batubara kembali ke furnace.

5. Air Heater

Adalah pemanas udara sehingga temperatur udara pembakaran dapat mencapai + 300 C menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna. Air heater terpasang dari jenis elemen-elemen plat yang berfungsi mengambil panas dari gas bekas dan kemudian ditransfer ke udara pembakaran dengan mekanisme perpindahan panas konveksi.



2.1.5 Sirkulasi Air dan Uap

Air pengisi dialirkan ke dalam boiler menggunakan Boiler Feed Pump (BFP) melalui sebuah katup pengatur aliran. Sebelum masuk ke *drum boiler*, air tersebut terlebih dahulu dipanaskan secara bertahap di Low Pressure Heater (LPH), High Pressure Heater (HPH), dan terakhir di Economizer, hingga mencapai suhu yang mendekati titik didihnya. Dari *drum*, air kemudian bersirkulasi melalui pipa *downcomer* dan *riser*. Ketika air dalam *riser* menerima panas dari ruang bakar, terbentuklah campuran uap dan air. Proses sirkulasi ini dapat terjadi secara alami (*natural circulation*) atau dibantu (*assisted circulation*) dengan menggunakan pompa sirkulasi.

Salah satu komponen penting dalam sistem ini adalah *downcomer*, yaitu pipa yang terletak di luar ruang bakar dan berfungsi menghubungkan *drum* dengan bagian bawah *tube wall (riser)*. Karena letaknya di luar ruang bakar, *downcomer* tidak menerima panas langsung dari pembakaran. Sebaliknya, pipa *riser* menerima pemanasan dari ruang bakar sehingga di dalamnya terbentuk uap air. Uap yang dihasilkan selanjutnya ditampung di *drum* dan dialirkan menuju turbin melalui *superheater*. Komponen utama yang berperan dalam sistem sirkulasi air pada boiler meliputi economizer, drum, heater, riser, dan downcomer.

1. Economizer

Economizer merupakan sebuah penukar kalor (*heat exchanger*) yang dipasang pada jalur air pengisi sebelum masuk ke *drum boiler*. Komponen ini terdiri dari sekumpulan pipa berukuran kecil yang tersusun secara berlapis. Di dalam pipa-pipa tersebut mengalir air pengisi yang dipompakan oleh *Boiler Feed Pump (BFP)*, sedangkan di bagian luarnya mengalir gas panas hasil pembakaran dari ruang bakar. Karena suhu gas buang lebih tinggi daripada suhu air pengisi, maka terjadi perpindahan panas dari gas ke air. Proses ini menyebabkan temperatur air pengisi meningkat hingga mendekati titik didihnya. Namun, kenaikan temperatur tersebut tidak boleh melebihi titik didih, karena dapat

menyebabkan terbentuknya uap di dalam pipa *economizer*, yang berpotensi menimbulkan overheating dan kerusakan pada pipa..

2. Boiler Drum

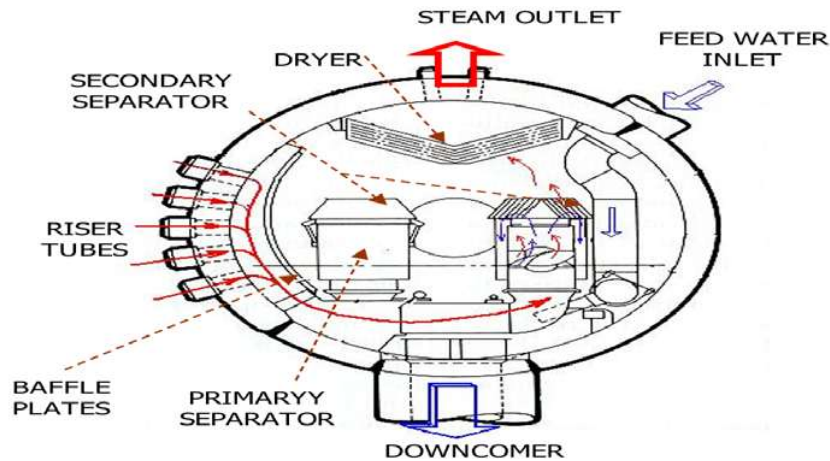
Boiler Drum merupakan bejana bertekanan yang berfungsi menampung air dari *economizer* serta uap hasil penguapan dari *tube wall (riser)*. Sekitar separuh volume *drum* berisi air, sementara separuh lainnya berisi uap. Drum ini dibuat dari plat baja yang dilas dan dilengkapi dengan berbagai komponen penting, antara lain: *manhole*, saluran menuju *superheater*, *feedwater inlet*, *blowdown line*, *downcomer*, *safety valve*, pipa injeksi bahan kimia, pipa pengambilan sampel, serta pipa untuk alat ukur dan kontrol.

Ketinggian atau level air di dalam *drum* harus dijaga agar tetap stabil, yaitu sekitar setengah dari tinggi *drum*. Volume air pengisi yang masuk harus seimbang dengan jumlah uap yang keluar, sehingga tingkat air tetap konstan. Pengaturan level air dilakukan melalui pengendalian bukaan *flow control valve*..

Apabila level air di dalam *drum* terlalu rendah, maka dapat menyebabkan overheating pada pipa-pipa boiler. Sebaliknya, jika level air terlalu tinggi, sebagian air dapat terbawa bersama uap menuju turbin dan berpotensi menimbulkan kerusakan pada sudu turbin.

Untuk mencegah kondisi berbahaya tersebut, *drum* dilengkapi dengan sistem pengaman berupa alarm untuk kondisi *high level* dan *low level*, serta *trip system* untuk kondisi ekstrem seperti *very high* dan *very low level*. Ketinggian air dalam *drum* dapat dipantau secara langsung menggunakan level gauge di dekat *drum* (lokal), maupun secara jarak jauh dari control room, dan data pengukurannya direkam melalui level recorder.

Uap yang terbentuk di dalam *riser* akan mengalir ke bagian atas *drum*, kemudian melewati steam separator dan screen dryer agar uap yang keluar dalam keadaan kering sebelum diteruskan ke *superheater* dan akhirnya ke turbin. Sementara itu, butiran air yang terpisah dari uap akan turun kembali dan bersirkulasi bersama air pengisi yang baru masuk ke *drum*.



Gambar 2. 11 Steam Drum

3. Header

Dari header air akan masuk ke tube wall (riser) untuk diubah menjadi uap dan kembali ke boiler. Header (low header) merupakan tempat penampungan air yang berasal dari down comer.

4. Riser (Tube Wall)

Didalam tube wall terdapat air yang bersirkulasi dari drum melalui down comer dan low header. Panas yang dihasilkan dari proses pembakaran didalam furnace sebagian diberikan kepada air yang ada didalam tube wall sehingga air berubah menjadi uap. Selain berfungsi untuk membuat air menjadi uap, tube wall juga mencegah penyebaran panas dari dalam furnace ke udara luar dan untuk lebih menjamin agar panas tersebut tidak terbang ke udara luar melewati tube wall, maka dibalik tube wall (arah udara luar) dipasang dinding isolasi yang terbuat dari mineral fiber.

5. Down Comer

Down comer merupakan pipa yang berukuran besar, menghubungkan bagian bawah drum dengan lower header. Down comer (pipa turun) tidak terkena panas secara langsung dari ruang bakar. Dan untuk menghindari kerugian panas yang terbang pada down comer, maka down comer diberi isolasi.

6. Superheater

Proses sirkulasi uap di dalam boiler berlangsung melalui tahapan berikut:

1. Uap jenuh yang terbentuk di *steam drum* dialirkan terlebih dahulu menuju *primary superheater*. Komponen ini terletak di bagian belakang boiler dan menerima aliran gas buang dengan temperatur relatif lebih rendah. Pipa-pipa pada *primary superheater* umumnya tersusun dalam konfigurasi horizontal untuk memaksimalkan perpindahan panas secara konveksi.
2. Selanjutnya, uap yang telah dipanaskan di *primary superheater* dialirkan menuju *secondary superheater*, yang berada pada area dengan gas buang bertemperatur tinggi. Sebagian elemen *secondary superheater* ditempatkan tepat di atas ruang bakar sehingga menerima panas radiasi langsung dari proses pembakaran.
3. Dari *secondary superheater*, uap superpanas (*superheated steam*) kemudian dialirkan ke turbin tekanan tinggi, di mana energi termalnya dikonversi menjadi energi mekanik untuk memutar poros turbin.

2.1.5 Sistem Bahan Bakar

1. Bahan Bakar Minyak

Proses pembongkaran minyak dari kapal dapat dilakukan dengan menggunakan pompa yang berada di kapal (*unloading pump*) ataupun pompa yang terpasang di darat. Jumlah minyak yang dibongkar dapat dipantau melalui flowmeter atau berdasarkan kenaikan level pada tangki penyimpanan (*bunker*). Tangki persediaan (*storage tank*) atau *bunker* berfungsi sebagai tempat penampungan minyak yang diturunkan dari kapal. Pada dermaga (*jetty*) yang dapat disandari kapal tanker, biasanya dipasang *unloading arm* sebagai penghubung antara pipa di kapal dan sistem perpipaan di darat. Namun, apabila dermaga tidak dapat disandari kapal karena kedalaman perairan yang tidak mencukupi, maka penyaluran minyak dilakukan melalui pipa bawah laut, dan petugas PLTU wajib melakukan pengecekan langsung ke kapal tanker. Untuk

minyak jenis High Speed Diesel (HSD), yang jumlahnya relatif lebih sedikit dibandingkan dengan minyak residu, pengirimannya biasanya menggunakan tongkang atau truk tangki. Minyak HSD kemudian ditampung pada tangki HSD, yang berfungsi ganda sebagai tangki persediaan sekaligus tangki harian (day tank). Sementara itu, minyak residu (MFO) yang disimpan pada tangki persediaan akan dipindahkan ke tangki harian apabila akan digunakan sebagai bahan bakar pada PLTU. Kapasitas tangki harian umumnya lebih kecil dibandingkan tangki persediaan. Selama sistem bahan bakar minyak beroperasi, sebagian minyak yang telah bersirkulasi akan kembali ke tangki harian untuk proses resirkulasi, guna menjaga kestabilan tekanan dan suhu bahan bakar.

2. Bahan Bakar Batubara

Pada PLTU berbahan bakar batubara, batubara berperan sebagai bahan bakar utama dalam proses pembangkitan listrik. Persediaan batubara disimpan di area terbuka yang disebut coal stock area. Proses penyaluran batubara dari bunker menuju furnace (ruang bakar) dilakukan melalui dua komponen utama, yaitu coal feeder dan coal pipe. Aliran batubara dari bunker diatur secara terukur oleh *coal feeder*, yang berfungsi tidak hanya untuk mengatur laju aliran batubara ke ruang bakar, tetapi juga untuk mencatat jumlah bahan bakar yang disuplai ke boiler.

2.1.6 Sistem Udara Pembakaran dan Gas Buang

Udara memiliki peran penting dalam proses pembakaran bersama dengan bahan bakar. Selain berfungsi sebagai media untuk mendukung terjadinya pembakaran, udara juga berperan dalam mengatur bentuk dan stabilitas nyala api, serta berfungsi sebagai pendingin pada beberapa bagian sistem pembakaran. Pada boiler berbahan bakar batubara, udara dibedakan menjadi dua jenis, yaitu udara primer (primary air) dan udara sekunder (secondary air). Udara primer berfungsi untuk mengeringkan serta mengangkut batubara halus (pulverized coal) menuju ruang bakar. Sementara itu, udara sekunder berfungsi sebagai udara utama untuk proses pembakaran. Hasil dari proses pembakaran menghasilkan panas sebagai produk utama, sedangkan produk sampingnya berupa gas

buang dan abu sisa pembakaran. Gas buang yang tidak lagi dimanfaatkan kemudian dialirkan keluar menuju atmosfer melalui cerobong asap (stack).

1. Sirkulasi Udara dan Gas

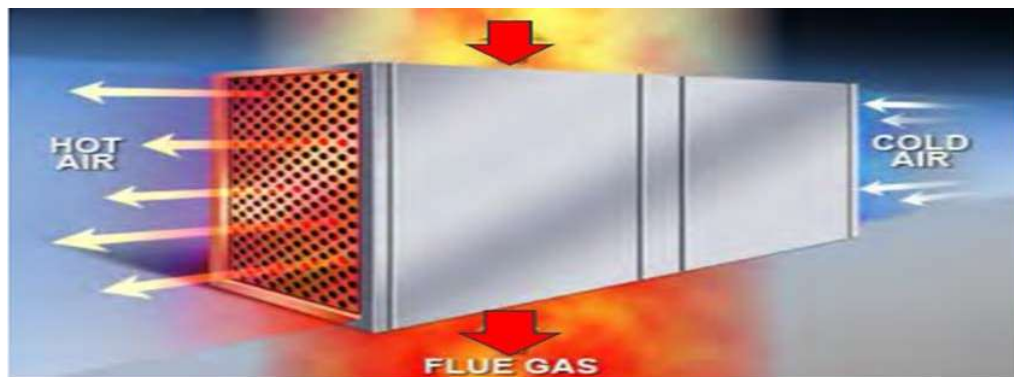
Udara untuk proses pembakaran diambil dari atmosfer menggunakan primary air fan (PA fan). Pada ketel berkapasitas besar, biasanya digunakan dua buah fan, masing-masing dengan kapasitas 60% dari beban penuh, sedangkan pada ketel yang lebih kecil cukup menggunakan satu fan dengan kapasitas 100% beban penuh. Udara dari PA fan dialirkan menuju ruang bakar melalui air heater dan wind box (kotak udara). Pengaturan laju aliran udara dilakukan dengan mengatur putaran fan atau melalui damper yang dipasang di sisi masuk PA fan. Di dalam air heater, udara pembakaran dipanaskan menggunakan panas gas buang sebelum masuk ke ruang bakar. Udara panas tersebut kemudian ditampung dan didistribusikan secara merata oleh wind box. Setelah proses pembakaran, gas buang mengalir keluar dari ruang bakar menuju cerobong, melewati berbagai komponen penukar panas seperti superheater, reheater, economizer, air heater, serta electrostatic precipitator dan akhirnya dihisap oleh induced draft fan pada ketel batubara.

2. Penanganan Gas Buang

Gas buang yang dihasilkan selama proses pembakaran mengandung senyawa kimia yang dapat mencemari lingkungan, serta partikel abu atau debu. Untuk mengurangi dampak pencemaran, cerobong dibuat dengan ketinggian yang memadai agar gas buang dapat tersebar lebih aman ke atmosfer. Komponen utama dalam gas buang meliputi karbon dioksida (CO_2), nitrogen dioksida (NO_2), dan asam sulfat (H_2SO_4). Pada boiler berbahan bakar batubara, gas buang melewati electrostatic precipitator (ESP) untuk menangkap partikel abu. Sedangkan pada boiler berbahan bakar minyak, digunakan dust collector untuk mengurangi kandungan debu dalam gas buang sebelum dilepas ke udara.

2.2 Air Heater

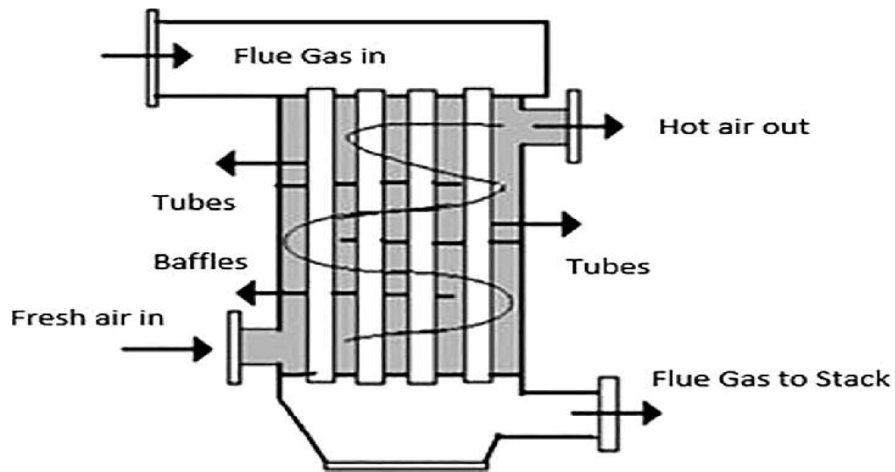
Air heater merupakan salah satu komponen penting dalam PLTU yang berfungsi memanaskan udara pembakaran dengan memanfaatkan gas buang (flue gas) sisa pembakaran dari boiler, sebelum udara tersebut dialirkan kembali ke boiler untuk mendukung proses pembakaran. Fungsi air heater sangat vital dalam meningkatkan efisiensi siklus perpindahan panas, karena dengan memanaskan udara pembakaran terlebih dahulu, konsumsi energi untuk mengubah air menjadi uap dapat dikurangi. Hal ini sekaligus mendukung tercapainya pembakaran yang lebih sempurna di ruang bakar. Oleh karena itu, analisis terhadap perpindahan energi dan efisiensi kinerja air heater perlu dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan koefisien perpindahan panas secara menyeluruh, efektivitas, serta faktor-faktor penghambat kinerja air heater. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi analisis dan pengolahan data dari commissioning.



Gambar 2. 12 Air Heater Tubular



Gambar 2. 13 Air Heater



Gambar 2. 14 Air Heater Layout



Gambar 2. 15 Pekerjaan Air Heater

Ada tiga jenis alat pra-pemanasan udara (*air heater/APH*) yang biasa digunakan dalam pembangkit tenaga uap thermal, yang pertama adalah tipe tubular (*tubular type*) yang dibuat ke *ducting boiler flue gas* dan yang kedua adalah pra-pemanasan udara regeneratif (*regenerative air heater*). *Regenerative air heater* ini dapat mengatur arah aliran secara horizontal atau vertikal melintang dari arah rotasi.

Sedangkan tipe *air heater* yang terakhir yaitu tipe regenerator. Regenerative *Air heater* (*Rotary Air heater*) *air heater* ini menggunakan elemen penyimpanan panas yang berputar secara kontinu. Udara dingin dan gas panas melewati elemen ini secara bergantian, sehingga panas disimpan dan dilepaskan secara berulang.

Luar *Tube* / Dalam *Tube* (*Tubular Air heater*) prinsip kerja *air heater* ini menggunakan pipa (*tube*) sebagai media perpindahan panas. Gas panas dari hasil pembakaran mengalir di dalam pipa, sedangkan udara dingin mengalir di sisi lainnya.

Regenerator *Air heater* regenerator dan regeneratif memiliki prinsip kerja yang sama dalam memanfaatkan kembali panas dari gas buang untuk memanaskan udara masuk, tetapi berbeda dalam cara penyimpanan dan transfer panasnya. *Air heater* regenerator bekerja secara siklik, di mana elemen penyimpan panas secara bergantian menyerap dan melepaskan panas, sehingga efisiensinya lebih tinggi tetapi responsnya lebih lambat.

Tipe Air Heater di PLTU UBP Labuhan Angin sendiri memiliki jenis air heater tipe tubular.

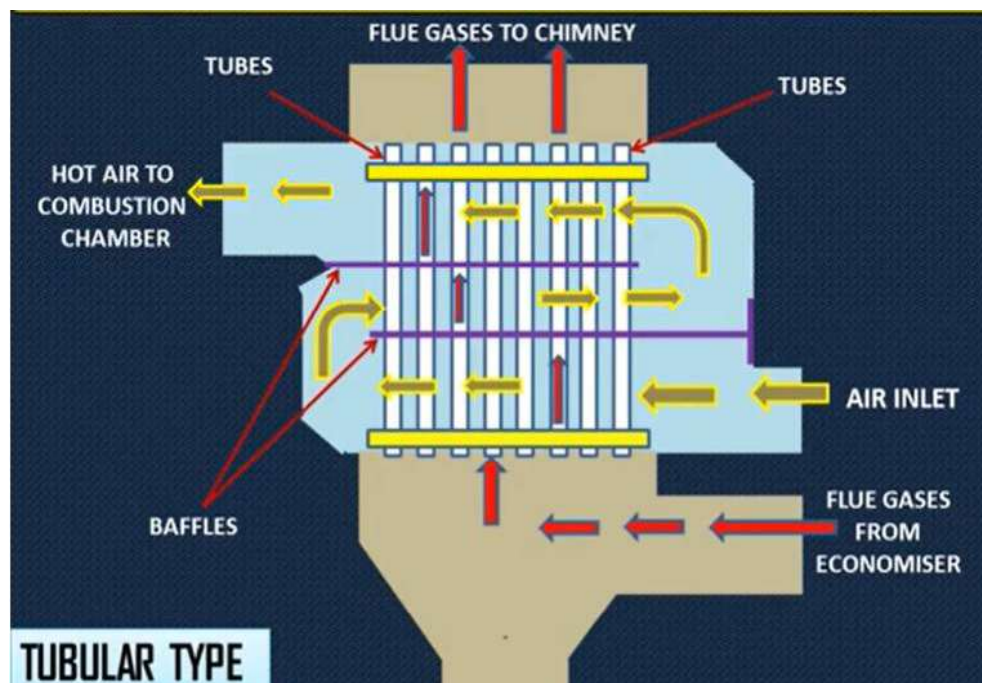
2.2.1 Sistem Kerja Air Heater Tipe Tubular

Air heater tipe *tubular* adalah sebuah komponen dalam sistem pembangkit tenaga uap yang berfungsi memanaskan udara pembakaran dalam boiler, yaitu dengan memanfaatkan flue gas dari *furnace*.

Prinsip kerja *air heater* tipe *tubular* yaitu bekerja sesuai dengan prinsip perpindahan panas antara flue gas (gas buang) dan udara yang akan dipanaskan. Dengan menggunakan flue gas untuk memanaskan *tube-tube* yang akan dilalui oleh udara pembakaran. *Tube-tube* ini tersusun dalam HRA (*High Recovery Area*) flue gas dari *furnace* akan melalui *tube-tube* sehingga akan terjadi perpindahan panas.

Proses kerjanya yaitu gas buang dari *furnace* masuk ke dalam *air heater* melalui saluran masuk (*inlet*), gas ini akan melalui *tube-tube* pemanas di dalam *air heater*,

udara pembakaran yang masih dingin akan dipaksa melewati *tube-tube* pemanas menggunakan PA Fan dan juga SA Fan, udara yang masih dingin akan mengalami kenaikan temperatur karena menyerap panas dari dinding *tube* yang dipanaskan gas buang setelah melalui proses perpindahan panas tersebut udara akan masuk ke ruang bakar pada boiler, sedangkan gas panas akan mengalami penurunan temperatur setelah melalui *air heater* gas buang akan masuk ke ESP untuk membersihkan gas buang dari debu dan carbon agar tidak mencemari lingkungan.



Gambar 2. 16 Siklus air heater Tubular

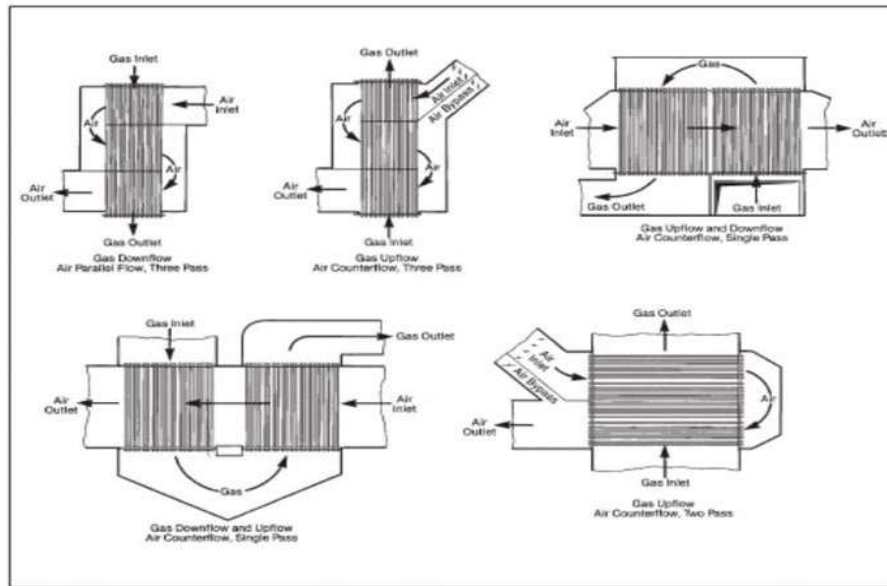
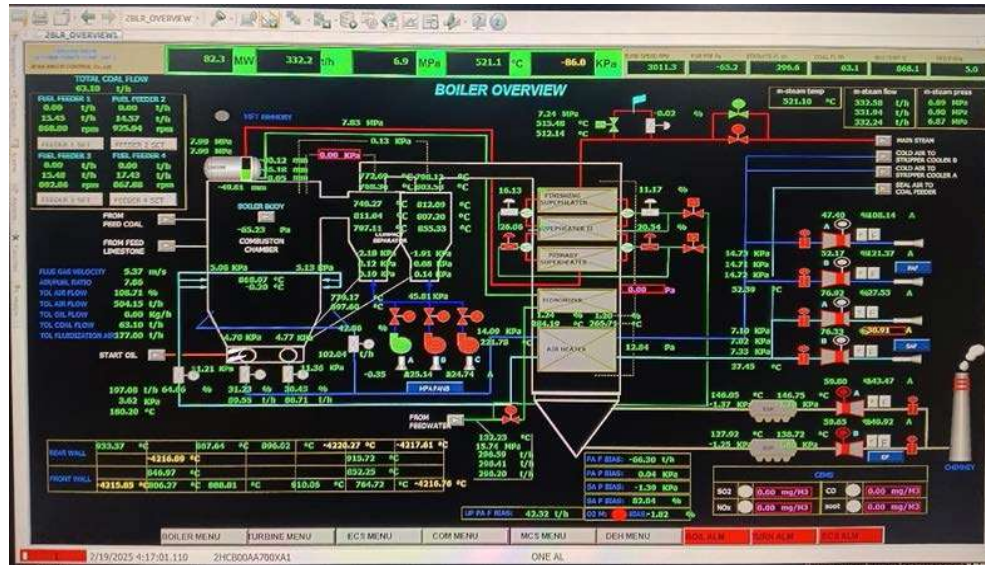


Fig. 1 Various tubular air heater arrangements

Gambar 2. 17 Siklus Air Heater

2.2.2 Data Operasional



Gambar 2. 18 Data Operasional

Waktu	Temp Keluar PA Air Fan	Temp Keluar SA Fan	Temp Gas Masuk AH	Temp Gas Keluar AH	GAH Inlet O2	O2 Analy zer	Aktual Load
Parameter	°C	°C	°C	°C	%	%	MW
Jam 15:29	52,75	37,96	266,22	146,55	1,04	-1,98	82.3
Jam 15:48	52,55	37,58	265,65	146,16	1,24	-1,79	82,6
Jam 16:00	59,39	37,45	265,71	146,05	1,20	-1,82	82,3

Tabel 2. 1 Data Operasional

2.2.3 Sulfidasi

Sulfidasi adalah salah satu bentuk korosi pada suhu tinggi yang terjadi akibat difusi sulfur ke dalam logam atau paduan, sehingga terbentuk sulfida. Pada logam atau paduan yang mengandung kromium, sulfur akan bereaksi membentuk kromium sulfida, yang menyebabkan kandungan kromium pada logam berkurang. Penurunan

kandungan kromium ini membuat logam lebih rentan terhadap oksidasi. Proses oksidasi tersebut menghasilkan lapisan oksida yang tidak murni, karena sudah tercampur dengan sulfida. Jika distribusi sulfida pada lapisan logam terjadi secara kontinyu, lapisan oksida yang terbentuk tidak bersifat protektif. Akibatnya, logam mengalami kerusakan lebih cepat karena permukaannya tidak terlindungi secara efektif.

Selama pembakaran dan di sepanjang jalur flue gas, SO₃ terbentuk menjadi SO₂ dalam reaksi :

$\text{SO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{SO}_3$ yang berpengaruh secara signifikan terhadap konsentrasi SO₃, yaitu :

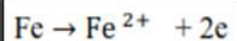
- a. Kandungan sulfur pada Batubara
- b. Tekanan parsial oksigen
- c. Senyawa abu seperti Fe₂O₃

2.2.2 Mekanisme Terjadinya Korosi sulfur

Kerusakan yang terjadi pada elemen air preheater adalah terjadinya korosi yang parah, korosi tersebut terjadi karena elemen pada air preheater tersebut dialiri oleh gas buang atau flue gas dari boiler sehingga terjadi reaksi kimia antara flue gas dan permukaan elemen pemanas, flue gas mengandung sulfur yang berasal dari batu bara yang kemudian dibakar dan menghasilkan gas buang yang mengandung senyawa asam SO₂. Proses korosi pada logam tidak lepas dari reaksi elektrokimia, yang melibatkan perpindahan elektron antara daerah anodik dan katodik pada permukaan logam. Reaksi yang terjadi di daerah anodik disebut reaksi anodic (oksidasi), ditandai dengan peningkatan bilangan oksidasi logam dan pelepasan elektron. Dalam konteks korosi logam, reaksi anodic yang berlangsung mencakup oksidasi logam menjadi ion logam, yang kemudian berinteraksi dengan lingkungan sekitar, membentuk produk korosi seperti oksida, hidroksida, atau garam logam tergantung kondisi medium yaitu :

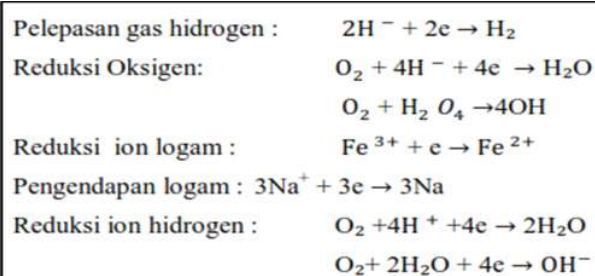


Proses korosi pada logam M melibatkan oksidasi logam menjadi ion (M^{n+}) disertai dengan pelepasan n elektron. Nilai n bergantung pada sifat masing-masing logam. Sebagai contoh, logam tertentu memiliki kecenderungan membentuk ion dengan valensi tertentu yang menentukan jumlah elektron yang dilepaskan selama proses korosi.



Gambar 2. 19 Korosi pada Tube Air Heater

Reaksi katodik juga berlangsung diproses korosi. Reaksi katodik diindikasikan melalui penurunan nilai valensi atau konsumsi electron-electron yang dihasilkan dari reaksi anodic. Reaksi katodik terletak di daerah katoda. Beberapa jenis reaksi katodik yang terjadi selama proses korosi logam, yaitu :



2.3 Penelitian yang Relevan

Beberapa penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa permasalahan yang sering muncul pada air heater meliputi korosi, kebocoran pipa (*tube leak*), fouling, dan kebocoran udara (*air leakage*). Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut:

1. Menurut Khoirunnisa dan Basri (2021) di PLTU Sumatera Selatan V menunjukkan bahwa kegagalan utama pada tubular air heater disebabkan oleh korosi akibat kondensasi asam sulfat yang terbentuk dari interaksi gas SO_3 dengan uap air pada suhu rendah. Fenomena ini menyebabkan sulphidation corrosion dan retak pada pipa sisi inlet, yang akhirnya menurunkan efisiensi perpindahan panas dan meningkatkan kebocoran udara. Perbaikan yang disarankan meliputi penggantian material tahan korosi dan pengendalian suhu operasi untuk menghindari titik embun asam.
2. Menurut Suwarno dkk. (2021) melakukan analisis kegagalan pipa *air preheater* pada boiler tipe *circulating fluidized bed (CFB)*. Hasil studi memperlihatkan bahwa kerusakan disebabkan oleh kombinasi antara erosi partikel abu dan korosi asam, terutama pada bagian *cold end*. Uji metalografi dan simulasi CFD menunjukkan distribusi temperatur yang tidak merata mempercepat penipisan dinding pipa. Pengendalian suhu gas buang dan pembersihan rutin diidentifikasi sebagai langkah efektif untuk mencegah kerusakan dini.
3. Dari sisi operasional, menurut Prabowo (2020) meneliti pengaruh kebocoran udara terhadap unjuk kerja *air preheater*. Ia menemukan bahwa peningkatan *air leakage* sebesar 10% dapat menurunkan efisiensi pemanfaatan panas hingga 5%. Kebocoran udara juga menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar dan penurunan temperatur udara masuk ke ruang bakar. Oleh karena itu, pemeliharaan rutin terhadap *seal* dan *gasket* air preheater sangat penting untuk menjaga efisiensi pembakaran.
4. Menurut penelitian oleh Irawan dkk. (2019) di PLTU Asam-Asam Unit 2 menunjukkan bahwa efisiensi rata-rata air heater berada pada kisaran 68%, dengan potensi peningkatan hingga 75% melalui pengurangan *fouling* dan peningkatan sistem pembersihan. Penelitian ini menegaskan bahwa kebersihan

permukaan tube berpengaruh langsung terhadap efisiensi termal dan performa keseluruhan boiler.

5. Pendekatan yang lebih termodinamika dilakukan oleh Thullah (2022) melalui analisis eksergi pada PLTU berkapasitas 65 MW. Hasilnya menunjukkan efisiensi eksergi air heater sebesar 70,45%, dengan kehilangan eksergi terbesar terjadi pada sisi gas buang akibat perbedaan temperatur yang tinggi. Optimalisasi laju perpindahan panas dan pengaturan rasio udara pembakaran direkomendasikan untuk mengurangi kerugian tersebut.

Judul dan Tahun	Masalah	Metode	Hasil	Riset Gap
Failure Analysis and Performance Assessment of Tubular Air Heater at PLTU South Sumatra V 2021	Terjadinya korosi dan kebocoran pipa (tube leak) pada sisi inlet air heater akibat kondensasi asam sulfat dan suhu operasi rendah.	Inspeksi visual, uji material (komposisi dan struktur), pengukuran temperatur operasi.	Korosi disebabkan oleh sulphidation dari gas SO ₃ ; menyebabkan penurunan efisiensi dan peningkatan air leakage. Rekomendasi: penggantian material tahan korosi dan kontrol suhu gas buang.	Belum meneliti secara spesifik solusi desain atau modifikasi fisik pada inlet air heater untuk memperpanjang umur pipa.
Failure Analysis of Air Preheater	Kegagalan pipa air preheater	Analisis metalografi, uji SEM-	Kerusakan disebabkan interaksi	Belum mengevaluasi dampak

Tubes in a Circulating Fluidized Bed Boiler 2021	akibat kombinasi korosi dan erosi pada bagian cold end.	EDS, simulasi distribusi temperatur menggunakan CFD.	partikel abu dan lapisan asam; ketidakseimbangan distribusi panas mempercepat penipisan pipa.	operasional dan strategi modifikasi untuk mencegah kegagalan berulang.
Analisis Air Leakage Terhadap Unjuk Kerja Air Preheater A 2020	Kebocoran udara (air leakage) menurunkan efisiensi perpindahan panas dan meningkatkan konsumsi bahan bakar.	Analisis data operasi aktual (perbandingan sebelum dan sesudah kebocoran).	Kenaikan air leakage 10% → penurunan efisiensi termal hingga 5%. Diperlukan inspeksi rutin seal dan gasket.	Tidak membahas penyebab struktural kebocoran dan solusi desain teknis untuk menekan air leakage.
Analisis Kinerja Air Heater di PLTU Asam-Asam Unit 2 2019	Penurunan efisiensi air heater akibat fouling dan ketidakaturan proses pembersihan tube.	Pengukuran temperatur inlet dan outlet, analisis efisiensi energi berdasarkan data lapangan.	Efisiensi rata-rata 68%, dapat meningkat menjadi 75% bila sistem pembersihan diperbaiki.	Tidak mengkaji penyebab degradasi material tube akibat kondisi operasi jangka panjang.
Analisis Eksergi Air Heater pada	Kehilangan eksergi tinggi pada sisi gas buang	Analisis termodinamika eksergi menggunakan	Efisiensi eksergi 70,45%; kehilangan	Tidak membahas aspek degradasi fisik

PLTU Batu Bara 65 MW 2022	menyebabkan inefisiensi energi.	data temperatur dan laju aliran.	terbesar di sisi gas buang karena perbedaan temperatur tinggi.	(korosi/erosi) dan hubungannya dengan kerugian eksergi.
---------------------------------	---------------------------------------	---	---	--

Tabel 2. 2 Penelitian relevan

2.4 Kerangka Pemikiran

