

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Penelitian ini mengacu pada beberapa studi terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan sistem sootblowing, khususnya penggunaan water cannon pada PLTU. Penelitian-penelitian ini menjadi dasar perbandingan dan pembandingan terhadap sistem yang dianalisis dalam tugas akhir ini.

1. Penelitian oleh Gupta & Sharma (2018) dalam *International Journal of Thermal Sciences* (Volume 123, halaman 150-161) menganalisis bagaimana laju aliran udara pembakaran mempengaruhi efisiensi dan emisi pembakar industri.
2. Artikel oleh Zhang & Lu (2019) yang diterbitkan dalam jurnal *Fuel* (Volume 254, 115564) memberikan analisis mendalam mengenai pengaruh kualitas pencampuran bahan bakar dan udara terhadap efisiensi pembakaran serta pembentukan polutan.
3. Studi pada *MV. Pan Kristine* meneliti faktor penyebab turunnya performa pembakaran (mis. nozzle tersumbat, jarak elektroda) yang berdampak pada performa boiler dioperasikan.
4. *Analisis performance mesin residual oil main burner di PLTU Gresik* menggunakan pendekatan *Reliability, Availability, Maintainability (RAM)* untuk mengevaluasi keandalan dan efektivitas operasional burner.

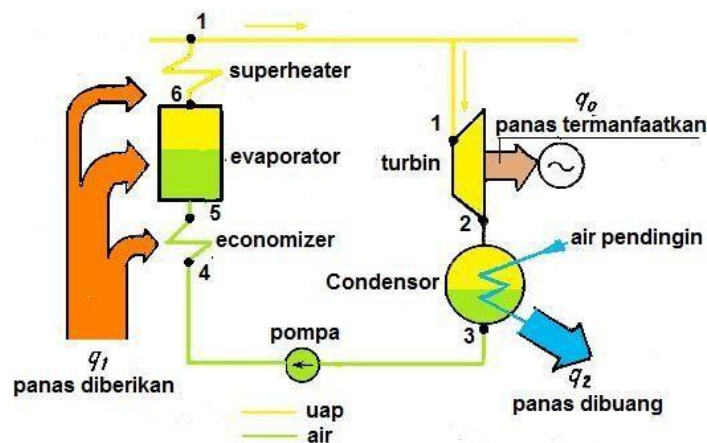
2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) adalah pembangkit listrik yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Konstruksi dari pembangkit listrik ini yaitu turbin uap yang digerakkan oleh uap panas/kering yang seporos dengan generator. Pembangkit listrik tenaga uap bekerja dengan menggunakan bahan bakar berupa batu bara atau bahan bakar minyak HSD (solar) yang dirubah menjadi energi panas untuk digunakan sebagai proses pemanasan pipa *boiler* yang berisi air, sehingga air

tersebut berubah menjadi uap yang bertekanan. Uap bertekanan inilah yang akan dialirkan ke turbin uap sehingga dapat memutar turbin. Putaran dari turbin ini akan memutar generator yang terhubung dalam satu poros. Generator akan mengubah energi kinetik yang berupa putaran turbin menjadi listrik, yang mana listrik ini akan didistribusikan kepada pelanggan listrik melalui transmisi dan sumber-sumber beban.

Secara garis besar semua pembangkit memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri sesuai dengan konstruksi dan pembebanannya. Adapun Kelebihan dari PLTU dibandingkan dengan pembangkit lain antara lain, Bisa dioperasikan menggunakan berbagai jenis bahan bakar berupa zat padat, zat cair dan zat gas, dapat dibangun dengan kapasitas yang bervariasi, dapat dioperasikan dengan berbagai mode pembebanan, kontinuitas operasinya tinggi dan usia pakai (life time) relatif lama. Sedangkan kekurangan yang dimiliki PLTU ialah, sangat tergantung pada tersedianya pasokan bahan bakar, tidak dapat dioperasikan (*start*) tanpa pasokan listrik dari luar, memerlukan tersedianya air pendingin yang sangat banyak dan kontinyu, serta investasi awalnya yang mahal.

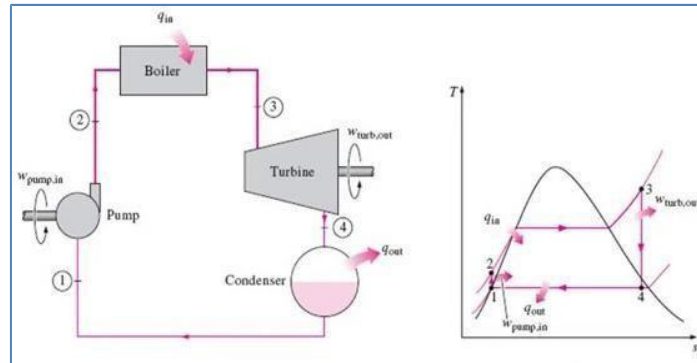


Gambar 2.1 Prinsip kerja sederhana pada PLTU
Sumber: Buku Modul Pembangkit Termal I

2.2.2 Siklus *Rankine*

Siklus kerja PLTU merupakan siklus tertutup dapat digambarkan dengan diagram $p - v$ (tekanan – *volume*), diagram $T - s$

(Temperatur – *entropi*) dan diagram $h - s$ (*enthalpy – entropy*). Siklus ini adalah penerapan dari siklus Rankine ideal. Adapun urutan langkahnya sebagai berikut:

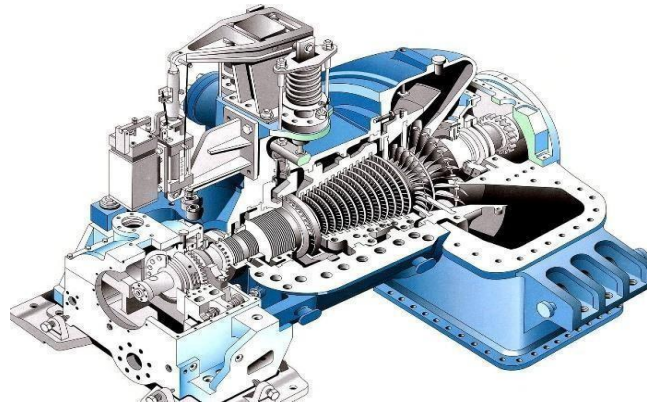


Gambar 2.2 Diagram termodinamika Siklus PLTU (Siklus Rankine)
Sumber: Buku Modul Pembangkit Termal I

Keterangan:

- 1 - 2: Dalam proses ini, air dipompa dan dikompresi untuk meningkatkan tekanannya dari tekanan rendah ke tekanan yang tinggi. Pada tahapan ini dikenal sebagai kompresi isentropis, yang terjadi dipompa air pengisi.
- 2 - 3: Dalam proses ini, air bertekanan tinggi masuk ke dalam *boiler* untuk meningkatkan temperaturnya hingga mencapai titik didih. Pada proses ini berlangsung pada tekanan yang konstan.
- 3 - 4: Uap bertekanan setelah memutar turbin, suhu dan tekanannya turun menjadi uap jenuh. Pada tahapan Ini disebut proses ekspansi isentropis.
- 4 - 1 :Pada tahap ini pembuangan panas laten uap atau uap jenuh menuju kondensor dan dikondensasikan menjadi air kondensat. Proses isobar isothermis ini terjadi di kondensor.

2.2.3 Turbin Uap



Gambar 2.3 Turbin Uap

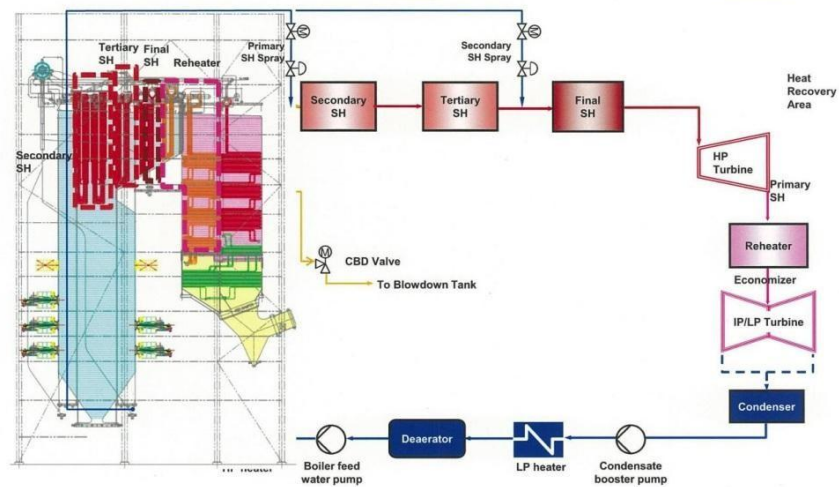
Turbin uap yaitu sebuah mesin yang bergerak dengan berotasi terhadap porosnya dengan memanfaatkan energi dari fluida yang berupa uap panas lanjut keluaran dari *boiler*. Turbin uap digunakan untuk mengkonversikan energi potensial uap menjadi energi kinetik, selanjutnya diubah lagi menjadi energi mekanis sehingga terbentuk putaran yang menggerakkan poros turbin. Dalam proses perubahan energi potensial menjadi energi mekanis yaitu terbentuknya putaran poros dilakukan dengan berbagai cara. Pada dasarnya turbin uap terdiri dari dua bagian utama, yaitu *stator* dan *rotor* yang merupakan komponen utama pada turbin kemudian di tambah komponen pendukung lainnya seperti bantalan, kopling dan sistem bantu lainnya supaya kinerja turbin dapat berjalan dengan baik. Sebuah turbin uap memanfaatkan energi kinetik dari fluida kerjanya yang bertambah akibat penambahan energi termal.

2.2.4 Prinsip Kerja Turbin Uap

Turbin uap berfungsi untuk mengubah energi panas yang terkandung dalam uap menjadi energi mekanik berupa putaran. Uap dengan tekanan dan temperatur tinggi mengalir melalui nozzle sehingga kecepatannya naik dan mengarah dengan tepat untuk mendorong sudu-sudu turbin yang terpsang pada poros. Disaat uap melewati ruang di sudu-sudu yang bergerak, terjadilah perubaham

momentum pada uap. Sehingga menghasilkan tenaga untuk menggerakkan generator yang akan dikonversikan menjadi listrik. Kemudian uap yang telah terpakai untuk kinerja turbin, tekanan dan temperturnya akan turun hingga kondisinya menjadi uap basah. Uap tersebut keluar turbin kemudian dialirkan menuju kondensor untuk dilakukan proses kondensasi atau didinginkan agar menjadi air kondensat dan dapat digunakan kembali untuk pemanasan air di *boiler*.

2.2.5 Boiler



Gambar 2.4 Siklus *Boiler*

Boiler merupakan salah satu komponen utama dalam Pembangkit listrik Tenaga Uap (PLTU). Fungsi utama dari *boiler* adalah mengubah air menjadi uap yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin, yang pada gilirannya menggerakkan generator listrik.

Tabel 2.1 Spesifikasi *Boiler*

Nama		Nilai
<i>Type</i>		IHI Stationary Drum
<i>Superheated Steam</i>	<i>Flow</i>	409.9 T/h
	<i>Pressure</i>	16,5 Mpa
	<i>Temperature</i>	569°C
<i>Reheated Steam</i>	<i>Flow</i>	399 T/h
	<i>Pressure</i>	3,99 Mpa
	<i>Temperature</i>	568°C
<i>Fuel Consumption</i>		59.9 T/h

Sumber: Manual Book Boiler

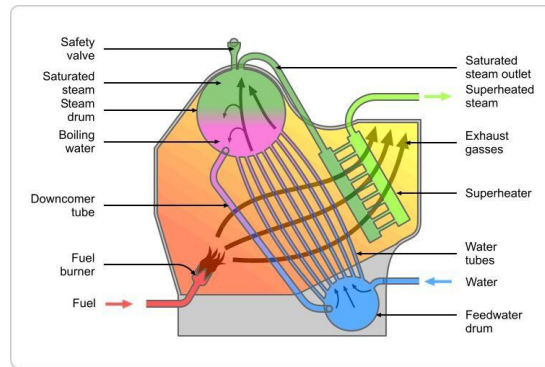
Prinsip kerja *Boiler*

Boiler bekerja berdasarkan prinsip perubahan energi dari energi kimia (bahan bakar) menjadi energi panas (Uap air). Dalam *boiler* bahan bakar seperti batubara,minyak atau gas dibakar didalam ruang bakar kemudian panas yang dihasilkan dari pembakaran tersebut digunakan untuk memanaskan air yang berada didalam pipa-pipa *boiler* hingga mencapai kondisi tertentu (Temperatur dan tekanan tinggi) hingga berubah menjadi uap.

2.2.6 Jenis-jenis *Boiler* pada PLTU

Terdapat beberapa jenis *boiler* yang digunakan pada PLTU antara lain :

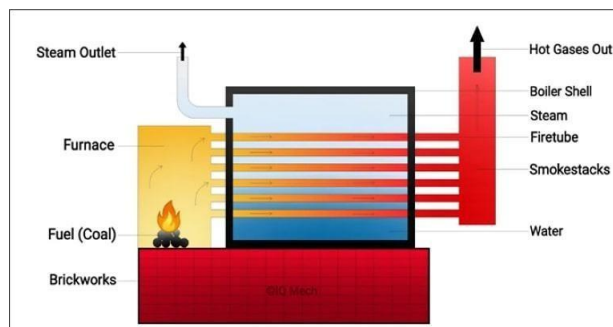
- *Boiler* Pipa Air (*Water Tube Boiler*) : Pada jenis ini air mengalir didalam pipa pipa kecil, sedangkan panas dari pembakaran mengalir diluar pipa. Jenis *boiler* ini umum digunakan pada PLTU karena mampu menghasilkan uap dengan tekanan dan temperatur yang tinggi.



Gambar 2.5 Boiler Pipa Air

(Sumber: <https://artikel-teknologi.com/pengertian-boiler-pipa-air/>)

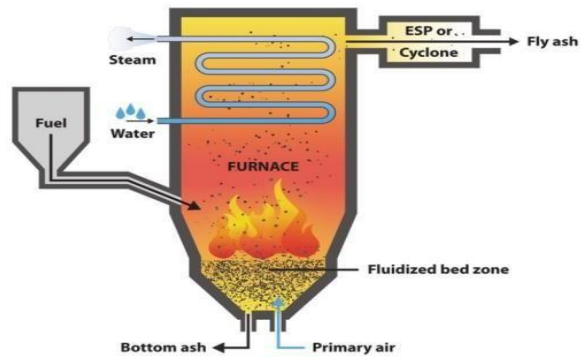
- *Boiler Pipa Api (Fire Tube Boiler)* : Pada jenis ini gas panas dari pembakaran mengalir melalui pipa pipa yang dikelilingi oleh air. *Boiler* jenis ini lebih cocok untuk skala kecil dan tekanan yang lebih rendah.



Gambar 2.6 Boiler Pipa Api

(Sumber: <https://www.anakteknik.co.id/yaakovarvin/articles/perancangan-pipa-api-pada-ketel-uap-pipa-api-atau-fire-tube-boiler>)

- *Boiler Fluidized Bed* : Menggunakan konsep Fluidisasi, dimana partikel bahan bakar dihembuskan dengan udara sehingga membentuk “bed” yang fluidized. Jenis *boiler* ini memiliki efisiensi tinggi dan mampu membakar berbagai jenis bahan bakar, termasuk biomasa.

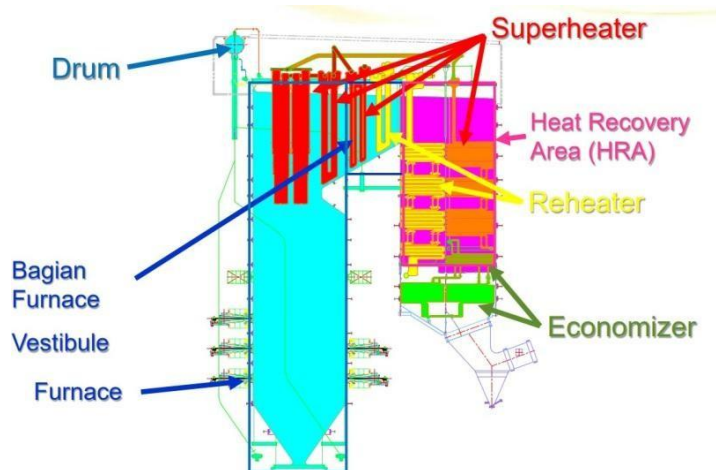


Gambar 2.7 *Boiler Fluidized Bed*

(Sumber: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-a-fluidized-bed-boiler_fig1_323848125)

Komponen-Komponen Utama *Boiler*

Boiler pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja sama untuk mengubah air menjadi uap bertekanan dan bersuhu tinggi.

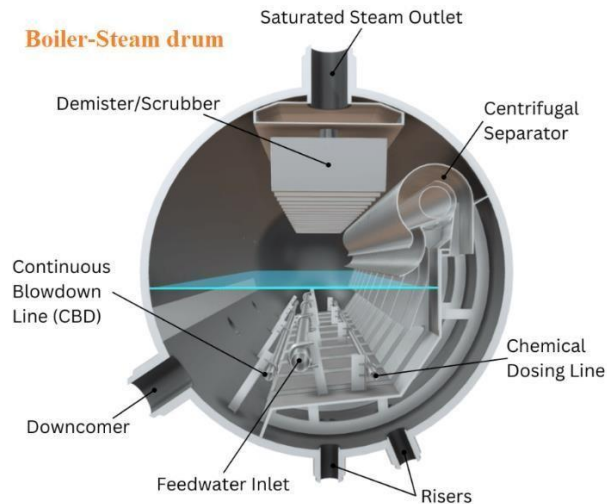


Gambar 2.8 *Komponen Boiler*

(Sumber: *Manual Book PLTU Asam asam 2 x 100 MW*)

Berikut adalah bagian-bagian utama *boiler* PLTU dan fungsinya :

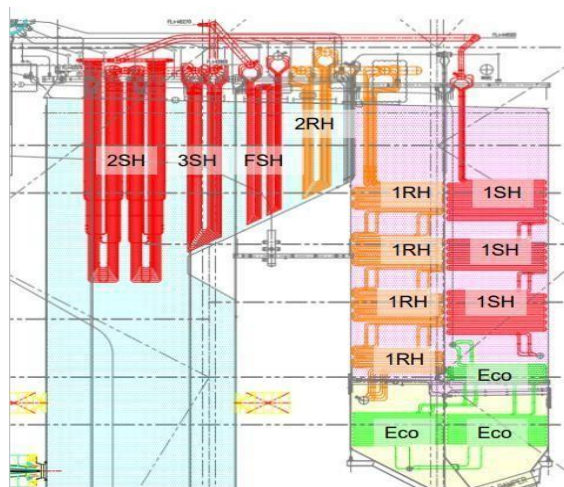
- Drum Uap (Steam Drum): Bejana tertutup di bagian atas *boiler* tempat pemisahan uap dari air. Air yang belum menguap akan disirkulasikan kembali ke dinding air, sedangkan uap jenuh dialirkan ke *superheater*.



Gambar 2.9 Drum Boiler

(Sumber: https://www.powerplantandcalculations.com/2023/10/9-functions-of-boiler-steam-drum.html#google_vignette)

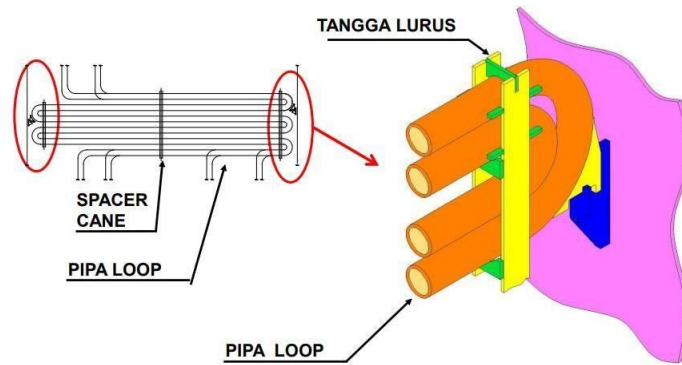
- **Superheater:** Serangkaian pipa yang memanaskan uap jenuh (uap pada titik didihnya) menjadi uap panas lanjut (superheated steam) bersuhu dan bertekanan sangat tinggi. Uap inilah yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin.



Gambar 2.10 Rangkaian Superheater

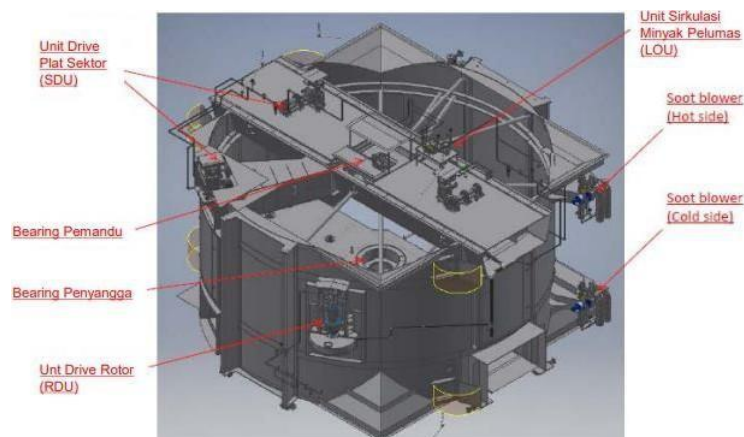
(Sumber: *Manual Book PLTU Asam asam 2 x 100 MW*)

- **Ekonomiser (Economizer):** Penukar panas yang memanaskan air umpan (feedwater) sebelum masuk ke drum uap, menggunakan panas sisa dari gas buang. Ini meningkatkan efisiensi boiler.



Gambar 2.11 Economizer
(Sumber: Manual Book PLTU Asam asam 2 x 100 MW)

- Pemanas Udara (*Air Preheater*): Memanaskan udara yang akan digunakan untuk pembakaran dengan memanfaatkan panas dari gas buang yang tersisa setelah melewati ekonomiser. Udara panas meningkatkan efisiensi pembakaran.



Gambar 2.12 Air Preheater
(Sumber: Manual Book PLTU Asam asam)

- Pembakar (*Burner*): Peralatan yang mencampur bahan bakar dan udara dengan proporsi yang tepat untuk memastikan pembakaran yang efisien di dalam tungku.



Gambar 2.13 *Burner*
(Sumber: Dokumen Pribadi)

- **Komponen Bantu Boiler**

1. **Sistem Bahan Bakar (Fuel System)**

Sistem bahan bakar pada boiler berfungsi untuk menyalurkan, menyiapkan, dan mengatur suplai bahan bakar ke ruang bakar (furnace) agar proses pembakaran berlangsung stabil, efisien, dan aman. Pada boiler PLTU berbahan bakar batubara, sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama berikut:

1. **Coal Feeder**

Coal feeder berfungsi untuk mengatur laju aliran batubara dari bunker menuju pulverizer secara kontinyu dan terkontrol. Sistem ini biasanya menggunakan tipe gravimetric feeder yang mampu mengontrol massa batubara (kg/jam) secara presisi.

Fungsi utama coal feeder:

- Mengatur debit batubara sesuai kebutuhan beban boiler
- Menjaga kestabilan rasio udara–bahan bakar (AFR)
- Mendukung kontrol pembakaran otomatis (combustion control system)

Ketidakkuratan coal feeder dapat menyebabkan:

- AFR tidak stabil
- Fluktuasi flame
- Peningkatan SFC dan NPHR



Gambar 2.14 *Coal Feeder*
(Sumber: Dokumen Pribadi)

2. Pulverizer

Pulverizer berfungsi untuk menghaluskan batubara menjadi serbuk halus (pulverized coal) sebelum diinjeksikan ke burner.

Tujuan penghalusan:

- Memperbesar luas permukaan reaksi
- Mempercepat proses pembakaran
- Meningkatkan efisiensi pembakaran

Ukuran partikel batubara umumnya harus lolos 70–75% mesh 200 (± 75 mikron).

Jenis pulverizer yang umum digunakan:

- Bowl mill
- Ball mill
- Vertical spindle mill

Jika pulverizer tidak optimal:

- Partikel terlalu kasar → unburned carbon meningkat
- Efisiensi boiler menurun
- Emisi meningkat



Gambar 2.15 *Pulverizer / Mill*
(Sumber: Dokumen Pribadi)

2. Oil Burner / Gas Burner (Start-Up Burner)

Oil burner atau gas burner digunakan sebagai **bahan bakar awal (start-up fuel)** saat:

- Proses penyalaan awal boiler
- Proses warming up furnace
- Kondisi beban rendah
- Kegagalan suplai batubara

Fungsi utama:

- Menghasilkan api awal (initial flame)
- Meningkatkan temperatur furnace hingga cukup untuk pembakaran batubara
- Menjaga kestabilan nyala api saat transisi bahan bakar

Bahan bakar yang digunakan biasanya:

- Solar (HSD)
- Marine Fuel Oil (MFO)
- Gas alam

Setelah temperatur furnace mencapai $\pm 600\text{--}800^{\circ}\text{C}$, sistem pembakaran beralih ke batubara sebagai bahan bakar utama.



Gambar 2.16 *Pulverizer / Mill*
(Sumber: Dokumen Pribadi)

c. Fuel Oil Pump

Fuel oil pump berfungsi untuk memompa bahan bakar minyak (solar/MFO) dari tangki penyimpanan menuju oil burner dengan tekanan tertentu.

Fungsi utama:

- Menjaga tekanan bahan bakar stabil
- Menjamin atomisasi bahan bakar yang baik
- Mendukung pembentukan nyala api yang stabil

Tekanan pompa yang tidak stabil dapat menyebabkan:

- Atomisasi buruk
- Nyala api tidak stabil
- Risiko flame failure

Pompa biasanya dilengkapi dengan:

- Pressure control valve
- Flow control valve
- Sistem pemanas (heater) untuk MFO agar viskositas sesuai spesifikasi



Gambar 2.17 *Fuel Oil Supply Pump*
(Sumber: Dokumen Pribadi)

Hubungan Sistem Bahan Bakar dengan Optimalisasi Burner

Kinerja sistem bahan bakar sangat mempengaruhi:

- Air–Fuel Ratio (AFR)
- Stabilitas pembakaran
- Specific Fuel Consumption (SFC)
- Net Plant Heat Rate (NPHR)

Jika coal feeder tidak akurat atau pulverizer tidak menghasilkan ukuran partikel optimal, maka:

- Pembakaran tidak sempurna
- Unburned carbon meningkat
- Efisiensi boiler menurun

Sebaliknya, sistem bahan bakar yang terkontrol dengan baik akan mendukung optimalisasi burner dan meningkatkan performa pembangkit secara keseluruhan.

Sistem Udara & Gas Buang (Air and Flue Gas System)

Sistem udara dan gas buang pada boiler berfungsi untuk:

- a. Menyediakan udara yang cukup untuk proses pembakaran
- b. Menjaga keseimbangan tekanan di dalam furnace
- c. Mengalirkan gas hasil pembakaran menuju cerobong
- d. Meningkatkan efisiensi termal melalui pemanfaatan panas sisa

Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama sebagai berikut:

a. Forced Draft Fan (FD Fan)

Forced Draft Fan (FD Fan) berfungsi untuk mensuplai udara pembakaran ke dalam furnace boiler.

Udara yang disuplai FD Fan digunakan sebagai:

- Secondary air untuk proses pembakaran
- Udara pencampur bahan bakar di burner

Fungsi utama FD Fan:

1. Mengatur jumlah udara pembakaran
2. Menjaga rasio udara–bahan bakar (AFR)
3. Mengontrol nilai excess air
4. Mendukung sistem kontrol O₂

Pengaruh terhadap optimalisasi burner:

Jika suplai udara terlalu besar:

1. Excess air meningkat
2. Heat loss melalui gas buang bertambah
3. Efisiensi boiler menurun

Jika suplai udara terlalu kecil:

1. Pembakaran tidak sempurna
2. CO meningkat
3. Risiko flame instability

FD Fan biasanya dikontrol menggunakan:

- a. Damper control
- b. Variable Speed Drive (VSD)



Gambar 2.18 *Forced Draft Fan*

(Sumber: Dokumen Pribadi)

b. Induced Draft Fan (ID Fan)

Induced Draft Fan (ID Fan) berfungsi untuk menarik gas hasil pembakaran dari furnace menuju cerobong (stack).

Fungsi utama ID Fan:

1. Menjaga tekanan furnace tetap negatif
2. Mengalirkan gas buang melalui economizer, APH, dan dust collector
3. Mengontrol draft (tekanan hisap) sistem

Tekanan furnace biasanya dijaga sedikit negatif (misalnya -5 sampai -10 mmWC) untuk:

1. Mencegah kebocoran gas panas ke ruang boiler
2. Menjaga keselamatan operasi

Pengaruh terhadap optimalisasi burner:

Jika ID Fan terlalu kuat:

- Tarikan udara berlebihan
- AFR terganggu
- Heat loss meningkat

Jika terlalu lemah:

1. Gas buang terhambat
2. Tekanan furnace positif
3. Risiko backfire



Gambar 2.19 *Induced Draft Fan*

(Sumber: Dokumen Pribadi)

c. Primary Air Fan (PA Fan)

Primary Air Fan (PA Fan) berfungsi untuk mensuplai udara primer yang digunakan untuk:

1. Mengeringkan batubara di pulverizer
2. Mengangkut batubara halus (pulverized coal) menuju burner

Udara primer ini bercampur dengan serbuk batubara dan dialirkan melalui pipa menuju ruang bakar.

Fungsi utama PA Fan:

1. Mengontrol temperatur pengeringan batubara
2. Menjaga kecepatan transportasi batubara halus
3. Mendukung kestabilan nyala api

Jika aliran PA terlalu rendah:

1. Batubara tidak terangkut sempurna
2. Flame tidak stabil

Jika terlalu tinggi:

1. AFR terganggu
2. Partikel terbakar tidak sempurna

Pengaturan PA Fan sangat berpengaruh terhadap kualitas pembakaran dan nilai SFC.



Gambar 2.20 *Primary Air Fan*

(Sumber: Dokumen Pribadi)

d. Air Preheater (APH)

Air Preheater (APH) berfungsi untuk memanaskan udara pembakaran menggunakan panas dari gas buang sebelum dibuang ke cerobong.

Prinsipkerja:

Gas buang panas → melewati APH → memanaskan udara masuk
→ udara panas menuju furnace

Fungsi utama APH:

1. Meningkatkan temperatur udara pembakaran
2. Mengurangi konsumsi bahan bakar
3. Meningkatkan efisiensi boiler
4. Menurunkan temperatur gas buang

Dengan udara pembakaran yang lebih panas:

1. Reaksi pembakaran lebih cepat
2. Efisiensi meningkat

3. SFC menurun

Namun, jika terjadi kebocoran (air leakage):

1. O₂ gas buang meningkat
2. Perhitungan excess air menjadi tidak akurat
3. Efisiensi menurun

Hubungan Sistem Udara & Gas Buang dengan Optimalisasi Burner

Sistem udara dan gas buang memiliki peran langsung terhadap:

1. Air Fuel Ratio (AFR)
2. Excess Air
3. Efisiensi boiler
4. Specific Fuel Consumption (SFC)
5. Net Plant Heat Rate (NPHR)

Hubungan operasionalnya dapat dijelaskan sebagai berikut:

FD Fan + PA Fan → Mengatur suplai udara pembakaran

ID Fan → Mengontrol draft furnace

APH → Meningkatkan efisiensi termal

Jika sistem udara dikontrol dengan baik:

1. Excess air optimal
2. Heat loss rendah
3. SFC turun
4. NPHR membaik

Sebaliknya, ketidakseimbangan sistem udara dapat menyebabkan pembakaran tidak efisien dan peningkatan konsumsi bahan bakar.



Gambar 2.21 *Air Preheater (APH) motor*
(Sumber: Dokumen Pribadi)

1. Sistem Air & Uap
 - a. *Boiler Feed Water Pump (BFP)* → Memompa air pengisi boiler
 - b. *Deaerator* → Menghilangkan gas terlarut (O_2 & CO_2)
 - c. *Economizer* → Memanaskan air sebelum masuk boiler
 - d. *Drum boiler* → Pemisah air dan uap
 - e. *Superheater* → Meningkatkan temperatur uap
 - f. *Reheater* → Memanaskan ulang uap bekas turbin
2. Sistem Abu (*Ash Handling*)
 - a. *Bottom ash hopper* → Menampung abu bawah
 - b. *Fly ash system* → Mengangkut abu terbang
 - c. *Ash conveyor* → Memindahkan abu ke silo
3. Sistem Keselamatan & Instrumentasi
 - a. *Safety valve* → Pengaman tekanan berlebih

- b. *Pressure gauge* → *Pengukur tekanan*
 - c. *Temperature sensor* → *Pemantau suhu*
 - d. *Level indicator* → *Indikator ketinggian air*
 - e. *CFlame scanner* → *Deteksi nyala api burner*
4. Sistem Pengolahan Air
- a. *Water Treatment Plant (WTP)* → *Mengolah air baku*
 - b. *Demineralizer* → *Menghilangkan mineral terlarut*
 - c. *Chemical dosing system* → *Pengontrol kualitas air boiler*
5. Sistem Kontrol
- a. *DCS (Distributed Control System)* → *Kendali operasi boiler*
 - b. *Interlock & proteksi* → *Pencegah kegagalan operasi*

2.2.7 Burner

Burner IHI, baik digunakan dengan bahan bakar padat, cair, atau gas, memiliki efisiensi pembakaran yang tinggi, emisi NO_x yang rendah, dan keandalan yang tinggi, serta realisasi pembakaran yang stabil. Area tengah *burner* utama berisi nozzle *burner* batubara dan ignitor gun, sedangkan area luar termasuk register udara. Pengapian, yang digunakan untuk mematikan *burner* batu bara utama, dan detektor nyala dimiringkan menghadap pusat *burner*. Buka an outer dan inner vane pada register udaradapat disesuaikan tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan dan pengaturan *burner*.

Register udara, yang terdiri dari beberapa vane yang dapat digerakkan, udara pembakaran untuk membentuk aliran flue gas yang bersirkulasi di furnace. Aliran ini yang dikombinasikan dengan injeksi bahan bakar yang tepat sesuai dengan jenis bahan bakar yang digunakan, menyebabkan flue gas dan bahan bakar bersuhu tinggi bercampur dengan cepat, mendorong pelepasan bahan yang mudah menguap dan nitrogen (sudah ada di dalam bahan bakar). Hasilnya adalah nyala api yang stabil dan pengurangan yang signifikan dalam

jumlah NO_x yang dilepaskan ke atmosfer, serta pengurangan karbon yang tidak terbakar.

Sistem pengoperasian *burner* pada PLTU melibatkan pengaturan campuran bahan bakar dan udara untuk proses pembakaran di furnace (ruang bakar) yang menghasilkan panas untuk menguapkan air menjadi uap bertekanan tinggi, yang kemudian menggerakkan turbin untuk membangkitkan listrik. Proses ini dikendalikan oleh sistem *burner* air ratio control untuk menjaga rasio udara/bahan bakar yang optimal guna meminimalkan polusi dan memaksimalkan efisiensi energi.

Burner adalah komponen utama pada sistem boiler atau furnace yang berfungsi untuk membakar dan menyalurkan bahan bakar agar menghasilkan energi panas.

Berikut fungsi utama burner (umumnya pada *boiler* industri seperti di PLTU):

1. Menghasilkan Nyala Api (*Flame*)

Burner mencampurkan bahan bakar (batubara halus, solar, atau gas) dengan udara pembakaran lalu menyalakannya sehingga terbentuk api yang stabil.

2. Mengatur Perbandingan Udara–Bahan Bakar (*Air–Fuel Ratio*)

Burner mengontrol jumlah udara dan bahan bakar agar pembakaran:

- a. Efisien
- b. Tidak boros bahan bakar
- c. Tidak menghasilkan asap berlebih

3. Menghasilkan Energi Panas

Panas hasil pembakaran digunakan untuk:

- a. Memanaskan air dalam *boiler*
- b. Mengubah air menjadi uap bertekanan tinggi
- c. Menggerakkan turbin uap

4. Menjaga Stabilitas Pembakaran

Burner bekerja bersama sistem:

- a. *Ignitor* (penyala awal)

- b. *Flame detector* (pendeteksi api)
- c. Damper udara

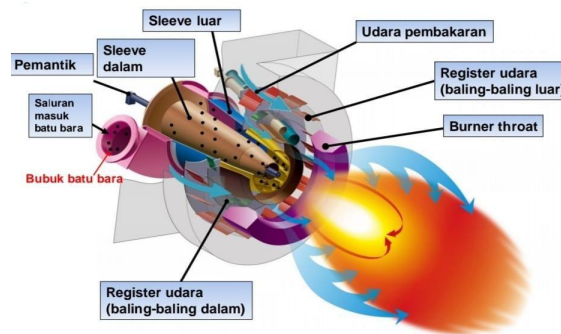
Agar api tetap stabil dan tidak terjadi flame failure.

5. Mendukung Efisiensi dan Kinerja *Boiler*

Pengoperasian burner yang optimal akan:

- a. Menurunkan SFC (*Specific Fuel Consumption*)
- b. Menurunkan NPHR (*Net Plant Heat Rate*)
- c. Mengurangi emisi gas buang

Bahan bakar yang digunakan pada PLTU sebagian besar menggunakan batu bara Namun, untuk operasi start up *boiler*, bahan bakar yang digunakan adalah jenis BBM *high speed diesel* (HSD). Proses start up *boiler* pada oil burner bertujuan untuk meningkatkan temperatur pembakaran pada *furnace* hingga mencapai *ignition point*.



Gambar 2.22 Burner

(Sumber: Manual Book PLTU Asam asam)

1. Prinsip Kerja *Burner*

Secara umum, prinsip kerja burner terdiri dari tahapan berikut :

- a. Pencampuran Bahan Bakar
 - Bahan bakar (misalnya batubara halus dari pulverizer, atau minyak/gas) disalurkan ke *burner*.
 - Udara primer membawa bahan bakar ke ujung *burner* (*nozzle*).
 - Udara sekunder dialirkan melalui air register untuk membantu pencampuran dan pembentukan pola aliran.

- Pada beberapa sistem, udara tersier ditambahkan untuk menyempurnakan pembakaran.
- b. Pengabutan / Atomisasi
- Jika menggunakan bahan bakar cair, *burner* melakukan atomisasi: bahan bakar disemprot menjadi butiran halus agar mudah bercampur dengan udara.
 - Untuk batubara halus, proses pencampuran sudah terjadi di saluran udara primer sebelum keluar melalui *burner tip*.
- c. Penyalaan (*Ignition*)
- *Burner* dilengkapi *igniter* (penyala), bisa berupa *spark igniter* (listrik) atau pilot flame (nyala kecil bahan bakar ringan).
 - *Igniter* menyalakan campuran udara-bahan bakar pada saat awal *start-up*.
 - Setelah api stabil, pembakaran bahan bakar + udara terbakar → menghasilkan panas tinggi, panas ini dipindahkan ke dinding pipa air (*water wall*) untuk menguapkan air menjadi uap.
- d. Pengendalian Pembakaran
- *Air register* dan *damper* mengatur suplai udara untuk menjaga rasio udara bahan bakar (*air-fuel ratio*) agar pembakaran efisien dan emisi rendah.
 - Flame scanner memantau kestabilan dan warna api untuk mendeteksi kondisi nyala (normal, padam, atau tidak sempurna).

2. Tata Letak *Burner* pada *Boiler*

Tata letak *burner* pada *boiler* dapat bervariasi, termasuk penempatan di satu dinding (seperti dinding depan), penempatan di beberapa dinding (depan dan belakang), atau penempatan sudut/tangensial di keempat dinding untuk kapasitas yang lebih

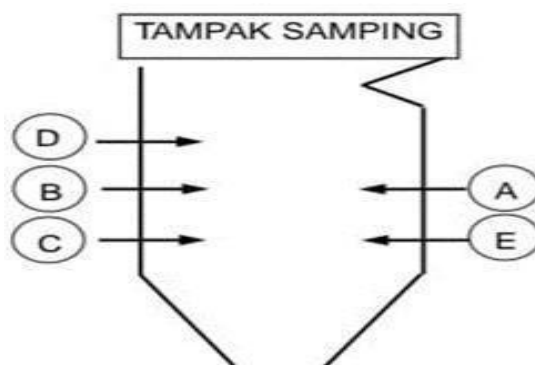
besar. Penataan ini bergantung pada ukuran, jenis bahan bakar, dan kebutuhan kapasitas *boiler*.

Konfigurasi *burner* di dua sisi dinding *boiler*, yaitu:

- *Front wall* (depan)
- *Rear wall* (belakang)

Burner dipasang saling berhadapan dan menyemburkan api ke arah tengah furnace.

- Terdapat total 15 pembakaran *Burner* yang diinstal dan diatur dalam 5 baris
- baris untuk *boiler* di depan dan 2 baris untuk *boiler* di belakang dinding
- 1 baris memiliki 3 *burner*
- Tiap *burner* masing-masing memiliki 2 Flame Detector dan 1 Spark Rod



Gambar 2.23 *Burner Overview*
(Sumber: PLTU Asam asam 2 x 100 MW)

1. Sistem Pengoperasian *Burner* pada PLTU

Sistem *pengoperasian burner* adalah rangkaian tahapan dan pengendalian peralatan *burner* untuk memastikan pembakaran bahan bakar berlangsung aman, stabil, dan efisien di dalam *boiler*. Bahan bakar yang digunakan pada PLTU sebagian besar menggunakan batu bara namun, untuk operasi *start up boiler*, bahan bakar yang digunakan adalah jenis BBM high speed diesel (HSD). Proses *start up boiler* pada oil *burner* bertujuan untuk

meningkatkan temperatur pembakaran pada *furnace* hingga mencapai ignition point

Tujuan Sistem Pengoperasian *Burner*

- Menghasilkan panas untuk mengubah air menjadi uap
- Menjaga stabilitas nyala api (*flame stability*)
- Mencegah kegagalan pembakaran (*flame failure*)
- Mengoptimalkan efisiensi *boiler*
- Mengurangi emisi (CO, NO_x, *unburned carbon*)

Komponen Utama dalam Sistem Pengoperasian

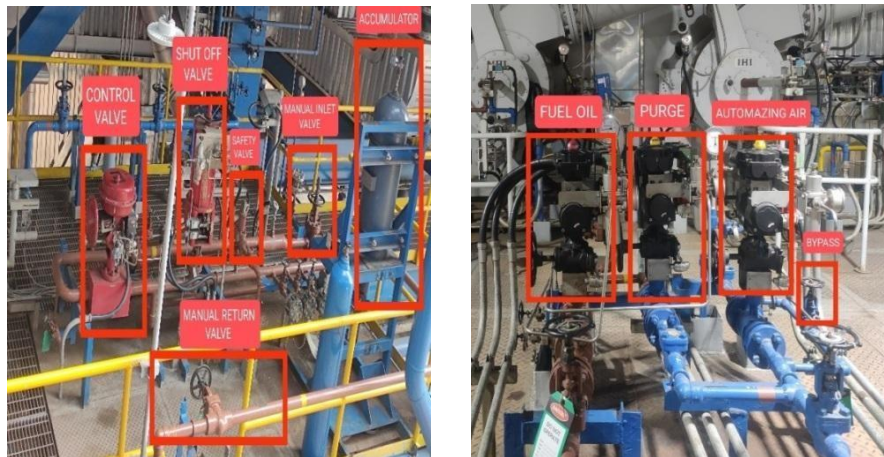
- *Burner* (coal / oil / gas)
- *Pulverizer* (untuk PLTU batubara)
- *Primary air fan* (PA Fan)
- *Secondary air fan* (FD Fan)
- *Ignitor*
- *Flame scanner / flame detector*
- *Control system* (DCS)
- *Safety interlock & protection system*

2. Tahapan Sistem Pengoperasian *Burner*

a. Persiapan Operasi (*Pre-Start*)

Sebelum *burner* dioperasikan:

- *Furnace* dilakukan *purging* (pembersihan gas sisa) selama 300 Detik
- Pastikan:
 - Tekanan udara cukup 8.6 – 9 barg
 - Aliran bahan bakar tersedia 13 – 25 barg ,
 - Sistem instrumentasi normal
 - Tidak ada alarm interlock aktif
- Izin kerja dan koordinasi CCR–lapangan
- *Fuel Oil leak chek control Fuel Oil Burner 120 sec*
- Dilanjutkan *Fuel oil leak check Complete selama 300 Sec.*

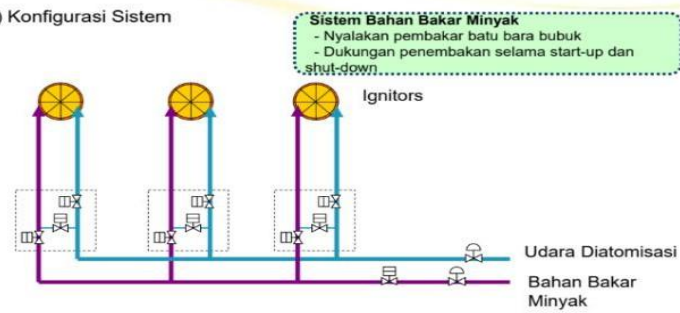


Gambar 2.24 LFO System
 (Sumber: PLTU Asam asam 2 x 100 MW)

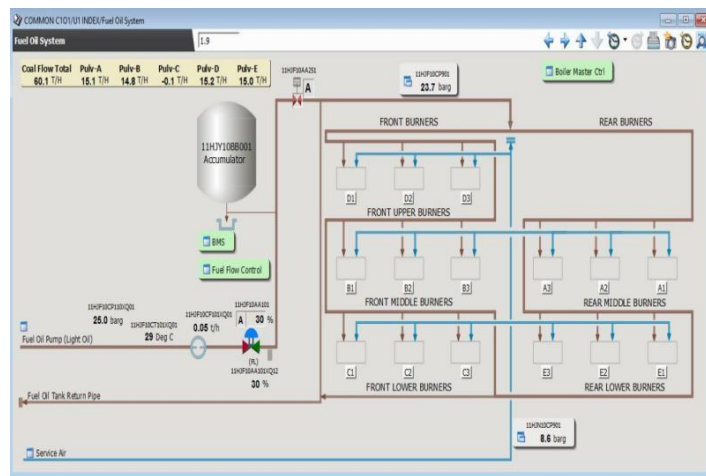
b. Proses Penyalaan (*Start-Up*)

- *Ignitor ON*
 - Menggunakan HSD (Tipe B40)
- Udara sekunder masuk (*Air register*)
 - Membentuk zona api awal
- *Flame scanner* mendeteksi nyala
 - Jika tidak terdeteksi → *burner trip*
- *Burner* dinyatakan “*in service*”
- *Ignitor* masuk ke dalam *burner*
- *Atomizing air valve open* secara auto dari CCR
- *Ignitor spark rod* masuk ke dalam *burner*
- *Pneumatic valve fuel oil open*

(1) Konfigurasi Sistem



Gambar 2.25 System bahan bakar solar
(Sumber: PLTU Asam asam 2 x 100 MW)

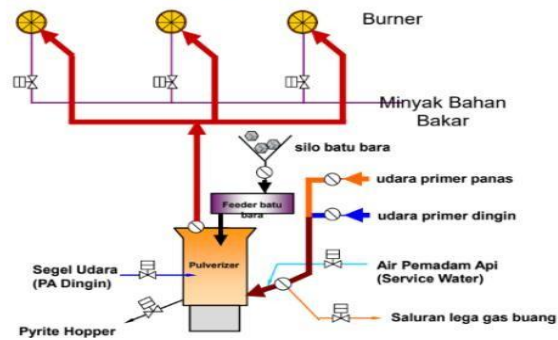


Gambar 2.26 Display DCS LFO System
(Sumber: Display DCS PLTU Asam Asam)

c. Operasi Normal *Burner*

- Batubara halus + *primary air* masuk ke *burner*
- *Secondary air* mengatur:
 - Bentuk api
 - Stabilitas pembakaran
- *Burner front* dan *rear* dioperasikan seimbang
- DCS mengontrol:
 - *Air-fuel ratio*
 - *Temperatur furnace*
 - Tekanan *furnace*
 - Kandungan O₂ & CO

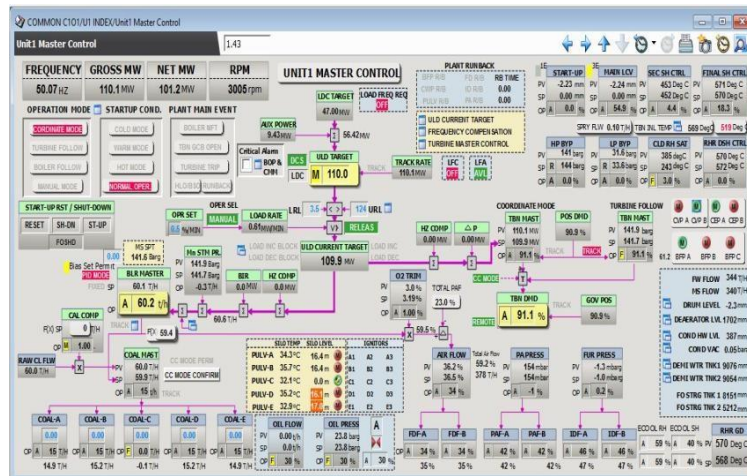
(1) Konfigurasi Sistem



Gambar 2.27 System bahan bakar batubara
(Sumber: Display DCS PLTU Asam Asam)

3. Pengaturan Beban (*Load Control*)

- Penambahan beban:
 - Tambah suplai batubara
 - Tambah udara pembakaran
- Penurunan beban:
 - Kurangi batubara secara bertahap
 - Jaga api tetap stabil
- Burner* dapat dioperasikan:
 - Bertahap per level (*burner elevation*)

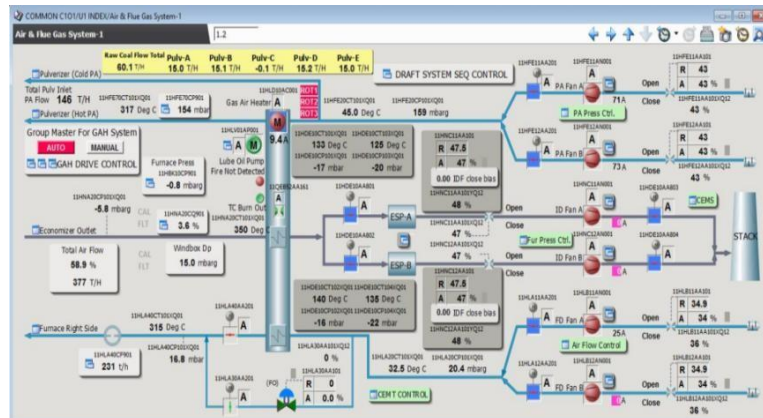


Gambar 2.28 Unit Master Control
(Sumber: Display DCS PLTU Asam Asam)

Faktor Penting dalam Operasi *Burner*

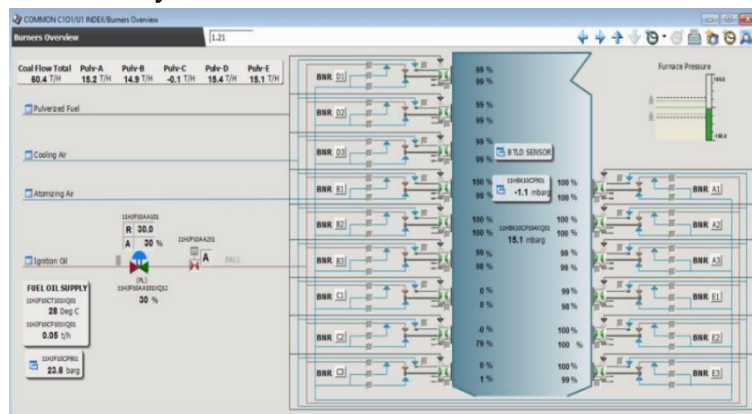
- Rasio udara-bahan bakar (*Air/Fuel Ratio*) harus seimbang.

- Stabilitas nyala api (*flame stability*) harus dijaga agar tidak padam.
- Kebersihan *nozzle* dan *duct* penting untuk mencegah gangguan aliran
- Sistem proteksi dan monitoring (*flame scanner*, *temperature sensor*, dan *pressure sensor*) harus selalu aktif



Gambar 2.29 System Flue Gas (Sumber: Display DCS PLTU Asam Asam)

4. Penghentian *Burner* (*Shutdown*)
 - a. Kurangi suplai bahan bakar
 - b. Matikan *burner* satu per satu
 - c. *Ignitor OFF*
 - d. *Furnace post-purging*
 - e. *Burner* dinyatakan *OFF* dan aman



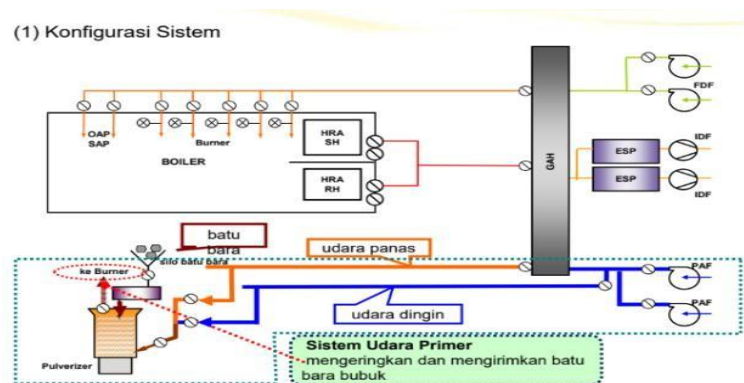
Gambar 2.30 System LFO & Air (Sumber: Display DCS PLTU Asam Asam)

2.2.8 Sistem Udara Pembakaran

1. Sistem udara primer

Udara atmosfir akan masuk ke fan udara primer melalui damper suara. Baling-baling masuk digunakan untuk kontrol tekanan air heater primer di seluruh rentang beban *boiler* yang terletak di saluran masuk pulverizer. Dan untuk mengontrol rasio preset campuran batubara-udara di setiap *outlet pulverizer*, dipasang damper pengatur suhu dan aliran di inlet masing-masing *pulverizer*. Dari keluarnya fan angin primer, udara akan mengalir melalui GAH dan masuk ke *pulverizer*. Aliran utama udara primer adalah melalui GAH, di mana ia akan memulihkan energi panas dari gas buang agar cukup untuk mengeringkan uap air di batubara. *Air bypass* keluar dari GAH diterapkan untuk meredam suhu *outlet pulverizer* ke nilai yang konstan. Udara temper dicampur dengan aliran aliran prinsip, untuk mengatur suhu campuran udara-batubara meninggalkan *pulverizer* yang digunakan damper kontrol.

Udara primer mengirimkan batu bara bubuk melalui pipa batu bara ke *furnace* dan akhirnya digunakan untuk mendukung pembakaran. Tidak ada perangkat kontrol aliran campuran batubara udara dalam pipa batubara bubuk yang dipasang, karena alirannya seimbang berdasarkan rute pipa batubara bubuk yang dihitung dengan baik dan jumlah tikungan, dll. Sebagian dari udara temper dikonsumsi sebagai udara penyekat *pulverizer*, *coal feeder*, dan damper terkait.

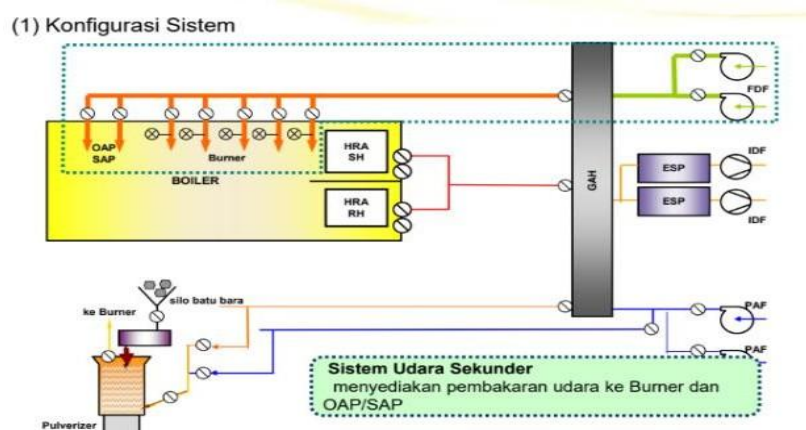


Gamba

r 2.31 *System Udara Primer*
(Sumber: Manual Book PLTU Asam asam)

2. Sistem udara sekunder

Udara atmosfer akan masuk ke forced draft fan melalui damper inlet. Kontrol baling-baling masuk akan digunakan untuk kontrol udara berlebih di outlet economizer di seluruh rentang beban *boiler*. Dibuang dari forced draft fan, aliran utama aliran udara sekunder melalui GAH, di mana ia akan memulihkan energi panas dari gas buang. Sebagian dari udara sekunder yang bercabang dari outlet fan FD digunakan untuk menutup damper dan *burner*. Penutupan udara untuk *burner* pada akhirnya diarahkan ke furnace sebagai udara pembakaran, Sistem ini dirancang untuk mengalirkan udara pembakaran ke *boiler*. Udara sekunder dikirim oleh fan FD melalui GAH ke *burner* batubara bubuk, Over Air Port dan sistem udara batas. Sistem ini mencakup sistem perapat udara untuk *burner*, sootblower, dan damper terkait.

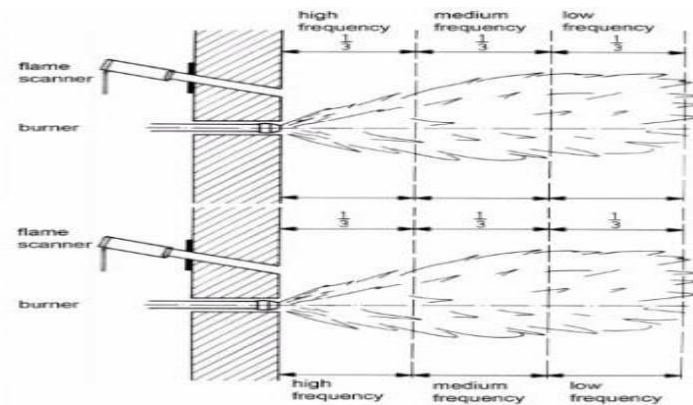


Gambar 2.32 System Udara Sekunder
(Sumber: Manual Book PLTU Asam asam)

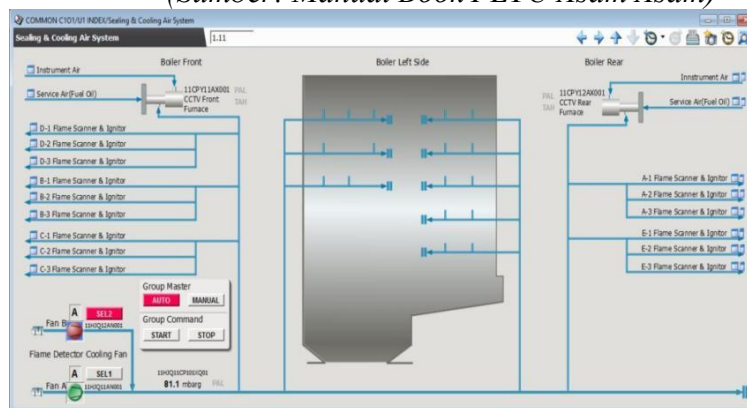
3. Sistem udara pendingin scanner

Sistem ini dirancang untuk mengirimkan *cooling air* dan sealing air ke flame scanner. *Scanner cooling air* dikirim oleh *flame scanner cooling air fan*. Setiap sistem udara kecuali bagian dari *pulverizer*, *coal feeder seal*, dan *damper sealing* memiliki fannya masing-masing. Semua udara dari sistem ini kecuali bagian

dari *pulverizer*, *coal feeder seal*, dan *damper sealing* pada akhirnya diarahkan ke *furnace* untuk membentuk udara pembakaran.



Gambar 2.33 *Flame Scanner Position*
(Sumber: Manual Book PLTU Asam Asam)



Gambar 2.34 *Flame Detector*
(Sumber: Display DCS PLTU Asam Asam)

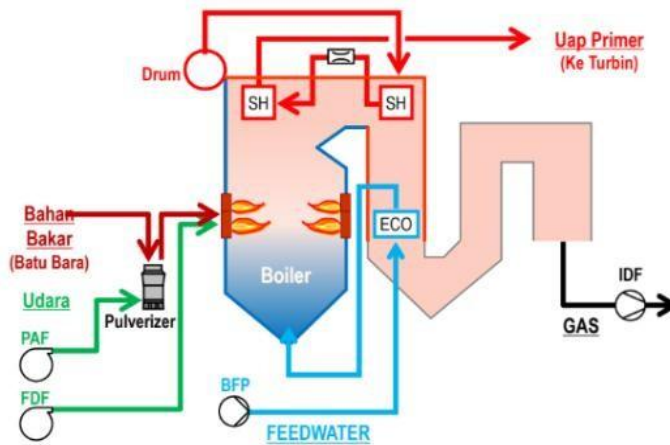
4. Sistem Aliran Gas Buang

Gas buang panas yang dihasilkan dari pembakaran, mula-mula memindahkan panas ke dinding *furnace*. Di bagian atas *furnace*, gas buang mengalir melintasi bagian *superheater* akhir dan pipa layar dari dinding belakang *furnace*, lalu ke HRA.

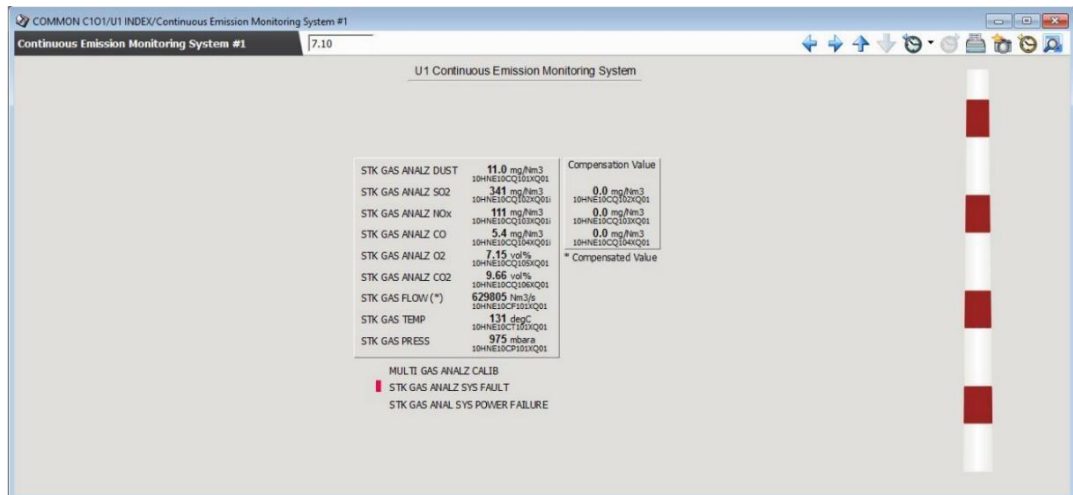
Pada bagian HRA, gas buang dibagi dengan dinding partisi menjadi bagian *vertikal* depan dan belakang yang menyediakan dua jalur gas paralel tetapi terpisah. Pada bagian HRA depan, gas buang memanaskan *reheater vertikal* dan *horizontal* dan *economizer*, pada bagian HRA belakang memanaskan *horizontal primary superheater* dan *economizer*. Semua dinding HRA hingga saluran masuk gas *economizer* terdiri dari pipa yang membawa

saluran keluar uap super panas dari drum uap. Gas pembakaran mentransfer panas ke bagian-bagian ini yang mengalir melalui area tersebut.

Gas buang dari outlet HRA diarahkan ke GAH, energi panas dalam gas buang ditransfer ke udara pembakaran, EP, ke fan ID yang memberikan tekanan yang cukup untuk membuang gas pembakaran ke atmosfer.



Gambar 2.35 System Boiler
(Sumber: Manual Book PLTU Asam asam)



Gambar 2.36 Emmision Stack
(Sumber: Display DCS PLTU Asam Asam)

2.2.9 Berikut Landasan Teori untuk mendukung penelitian tentang *Optimalisasi Pengoperasian Burner* pada boiler/PLTU.

1. Air Fuel Ratio (AFR)

Air Fuel Ratio (AFR) adalah perbandingan massa udara terhadap massa bahan bakar dalam proses pembakaran. AFR menentukan kualitas pembakaran di dalam furnace boiler.

Rumus AFR:

$$\text{AFR} = m_{\text{udara}} / m_{\text{bahan bakar}}$$

Pada kondisi stoikiometri, jumlah udara yang diberikan tepat sesuai kebutuhan teoritis untuk membakar bahan bakar secara sempurna tanpa sisa oksigen maupun bahan bakar.

Dalam optimalisasi burner:

- AFR terlalu rendah menyebabkan pembakaran tidak sempurna dan meningkatkan CO.
- AFR terlalu tinggi meningkatkan kehilangan panas melalui gas buang.
- AFR optimal menghasilkan efisiensi pembakaran yang maksimum.

2. Excess Air (Udara Lebih)

Excess Air adalah persentase udara aktual yang melebihi kebutuhan udara teoritis.

Rumus Excess Air:

$$\% \text{ Excess Air} = (\text{Udara Aktual} - \text{Udara Teoritis}) / \text{Udara Teoritis} \times 100\%$$

Hubungan dengan O₂ gas buang:

$$\% \text{ Excess Air} \approx \text{O}_2 / (21 - \text{O}_2) \times 100\%$$

Pengaruh Excess Air pada burner:

- Excess air rendah meningkatkan risiko CO dan pembakaran tidak sempurna.

- Excess air tinggi meningkatkan heat loss melalui cerobong.
- Nilai optimal umumnya 15–25% tergantung jenis bahan bakar.

3. Specific Fuel Consumption (SFC)

Specific Fuel Consumption (SFC) adalah jumlah bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan satu satuan daya listrik.

Rumus SFC:

$$\text{SFC} = m_{\text{bahan bakar}} / P_{\text{output}} \text{ (kg/kWh)}$$

Semakin kecil nilai SFC, semakin efisien penggunaan bahan bakar. Optimalisasi AFR dan excess air akan menurunkan SFC.

4. Net Plant Heat Rate (NPHR)

Net Plant Heat Rate (NPHR) adalah jumlah energi panas yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 kWh listrik bersih.

Rumus NPHR:

$$\text{NPHR} = \text{Heat Input} / \text{Net Power Output} \text{ (kcal/kWh atau kJ/kWh)}$$

Semakin kecil NPHR, semakin efisien pembangkit. Optimalisasi burner meningkatkan efisiensi boiler sehingga menurunkan NPHR.

Kesimpulan Teoritis

Optimalisasi pengoperasian burner bertujuan menjaga AFR dan excess air pada kondisi optimal, menurunkan SFC, serta memperbaiki NPHR sehingga meningkatkan efisiensi dan kinerja pembangkit.