

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas dari hasil pembakaran bahan bakar, umumnya batubara, untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi. Uap tersebut digunakan untuk memutar turbin yang terhubung dengan generator sehingga dihasilkan energi listrik[3]. Dalam operasionalnya, PLTU memiliki berbagai sistem pendukung seperti sistem bahan bakar, sistem pendingin, sistem uap, dan sistem penanganan debu. Setiap sistem berperan penting untuk menjaga kestabilan dan efisiensi kerja pembangkit.

2.1.1.1 Prinsip dan Cara Kerja PLTU[4]

PLTU berbahan bakar batu bara menjadi salah satu jenis pembangkit listrik dengan tingkat produksi tertinggi secara global termasuk di Indonesia. Hal ini disebabkan oleh ketersediaan batu bara yang melimpah dan harganya yang relatif murah. Maka dari itu, batu bara menjadi bahan bakar utama PLTU untuk menghasilkan energi panas. Lalu, bagaimana proses kerja PLTU dimulai? Proses kerja ini dimulai dengan pembakaran batu bara di dalam tungku *boiler*. Panas yang dihasilkan dari proses ini akan mengubah air menjadi uap. Kemudian, uap ini akan dialirkan ke turbin untuk menggerakkan generator dan menghasilkan listrik. Setelah melewati turbin, uap ini dikirim ke kondensor, lalu didinginkan, dan diubah kembali menjadi air. Air ini kemudian dipompa lagi ke *boiler* untuk digunakan kembali. Siklus ini akan berlanjut secara terus-menerus. Cara kerja PLTU sebenarnya terbilang cukup kompleks yang melibatkan sistem dan penyusunnya.

2.1.1.2 Komponen Utama PLTU[5]

1. Boiler

Boiler berfungsi sebagai peralatan utama yang berperan dalam mengonversi air menjadi uap yang selanjutnya dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin. Dalam proses operasinya, *boiler* menghasilkan uap sesuai dengan kebutuhan sistem pembangkitan, melakukan pemanasan uap

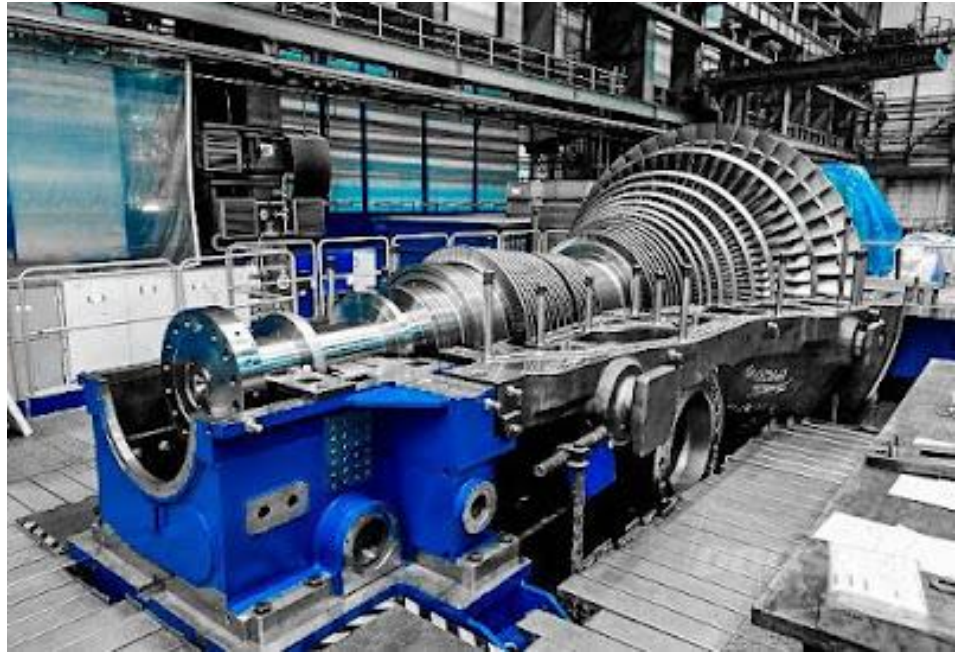
sebelum dialirkan ke turbin, serta memanaskan kembali uap bekas yang telah digunakan oleh turbin. Secara umum, *boiler* dilengkapi dengan tiga bagian pemanas utama, yaitu superheater primer, superheater sekunder, dan reheater, yang masing-masing berfungsi untuk meningkatkan kualitas dan energi uap.



Gambar 2.1 *Boiler*

2. Turbin

Turbin merupakan peralatan utama yang berfungsi mengonversi energi kinetik uap air menjadi energi mekanik melalui pergerakan sudu-sudu turbin. Uap kering yang dihasilkan oleh *boiler* diarahkan ke turbin untuk mengenai sudu-sudu tersebut, sehingga menyebabkan rotor turbin berputar dan meneruskan putaran ke generator sinkron. Pada PLTU berbahan bakar batu bara, sistem turbin umumnya tersusun atas turbin tekanan tinggi, turbin tekanan menengah, dan turbin tekanan rendah.



Gambar 2.2 Turbin PLTU

3. Generator

Energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik melalui generator. Generator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, di mana putaran mekanis dari turbin menggerakkan kumparan di dalam generator sehingga menghasilkan arus listrik. Energi listrik yang dihasilkan kemudian disalurkan ke *transformator* untuk dinaikkan atau diturunkan tegangannya sebelum didistribusikan ke sistem kelistrikan.



Gambar 2.3 Generator

4. *Transformer*

Transformer merupakan salah satu komponen penting dalam sistem kerja PLTU. Peralatan ini berfungsi untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan listrik yang dihasilkan oleh generator. Pada umumnya, generator menghasilkan tegangan listrik pada level yang relatif rendah, sehingga diperlukan transformator untuk menaikkan tegangan tersebut agar energi listrik dapat disalurkan secara efisien melalui jaringan transmisi di sekitar PLTU.



Gambar 2.4 *Transformator* PLTU

2.1.1.3 Komponen Pendukung PLTU

1. *Coal handling* PLTU

Sebagian besar PLTU di Indonesia dibangun di kawasan pesisir atau lepas pantai. Pembangunan di lokasi tersebut bertujuan untuk mempermudah proses logistik serta menekan biaya distribusi bahan baku utama berupa batu bara. Sistem *coal handling* pada PLTU mencakup rangkaian peralatan dan teknologi yang berfungsi untuk menangani batu bara sejak proses bongkar muat dari kapal hingga penyalurannya ke gudang penyimpanan atau bunker.



Gambar 2.5 *Coal Handling*

2. *Ash handling* PLTU

Selama proses operasional, PLTU menghasilkan abu dan residu sebagai hasil pembakaran bahan bakar. Abu dan residu tersebut perlu ditangani dengan baik agar tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan maupun sistem operasi pembangkit. Secara umum, residu pembakaran pada PLTU terdiri atas dua jenis, yaitu abu jatuh (*bottom ash*) dan abu terbang (*fly ash*). Sistem *ash handling* berfungsi sebagai sarana untuk mengumpulkan, menyalurkan, dan menangani abu hasil pembakaran tersebut.



Gambar 2.6 *Ash Handling*

3. *Auxiliary boiler (Boiler bantu)*

Pada PLTU terdapat *boiler* bantu yang berfungsi untuk mendukung proses *start-up* pada *boiler* utama serta menyediakan uap bantu (*auxiliary steam*) selama operasi pembangkit. *Boiler* bantu memiliki perbedaan dengan *boiler* utama yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar, karena *boiler* ini umumnya dioperasikan dengan bahan bakar minyak (*fuel oil*) sebagai sumber energi utamanya.



Gambar 2.7 *Auxiliary Boiler*

4. *Clorination plant* (Unit clorin)

Pada PLTU terdapat *chlorination plant* yang berfungsi untuk melakukan proses sterilisasi air laut pada sistem *water intake*. Proses sterilisasi ini bertujuan untuk mencegah terjadinya pengerasan dan penyumbatan pada pipa-pipa kondensor yang disebabkan oleh pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme laut. Sterilisasi dilakukan dengan menghasilkan senyawa natrium hipoklorit (NaOCl) yang berperan sebagai agen desinfektan dalam sistem pendingin.



Gambar 2.8 *Clorination Plant*

5. *Hydrogen plant (Unit hidrogen)*

Generator listrik pada PLTU beroperasi secara kontinu, sehingga menimbulkan gesekan yang dapat menyebabkan peningkatan suhu selama proses kerja. Untuk mengendalikan kenaikan suhu tersebut, dilakukan sistem pendinginan menggunakan gas hidrogen (H_2) sebagai media pendingin. Gas hidrogen ini disuplai dan disimpan pada unit khusus yang dikenal sebagai *hydrogen plant*, yang berfungsi menyediakan kebutuhan hidrogen bagi sistem pendinginan generator.



Gambar 2.9 *Hidrogen Plant*

6. *Desalination plant* (Unit desal)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap memerlukan air sebagai bahan baku utama dalam proses pembentukan uap. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, PLTU memanfaatkan air laut yang diolah melalui proses penyulingan dengan metode penguapan dan pengembunan. Proses pengolahan air laut atau *brine* ini dilakukan melalui *desalination plant* atau unit desalinasi yang berfungsi menghasilkan air tawar berkualitas sesuai dengan persyaratan sebagai bahan baku uap pada sistem pembangkit.



Gambar 2.10 *Desalination Plant*

7. *Reverse osmosis (RO)*

Pada beberapa PLTU, selain menggunakan *desalination plant*, juga diterapkan teknologi penyaringan air laut yang lebih modern, yaitu *reverse osmosis*. *Reverse osmosis* merupakan metode pengolahan air laut menjadi air tawar dengan memanfaatkan membran semipermeabel untuk memisahkan garam dan zat terlarut lainnya dari air, sehingga diperoleh air dengan kualitas yang sesuai untuk kebutuhan sistem pembangkit.



Gambar 2.11 *Reverse Osmosis*

8. *Demineralizer plant* (Unit Demin)

Pada PLTU, air tawar yang digunakan harus memiliki kandungan mineral yang sangat rendah karena tingginya nilai konduktivitas listrik dapat memicu terjadinya gaya gerak listrik (GGL) induksi. Selain itu, pengurangan kandungan mineral bertujuan untuk melindungi pipa serta peralatan PLTU dari potensi terjadinya korosi. Proses penghilangan mineral atau ion terlarut dalam air dilakukan melalui *demineralizer plant* atau unit demineralisasi.



Gambar 2.12 *Demineralizer Plant*

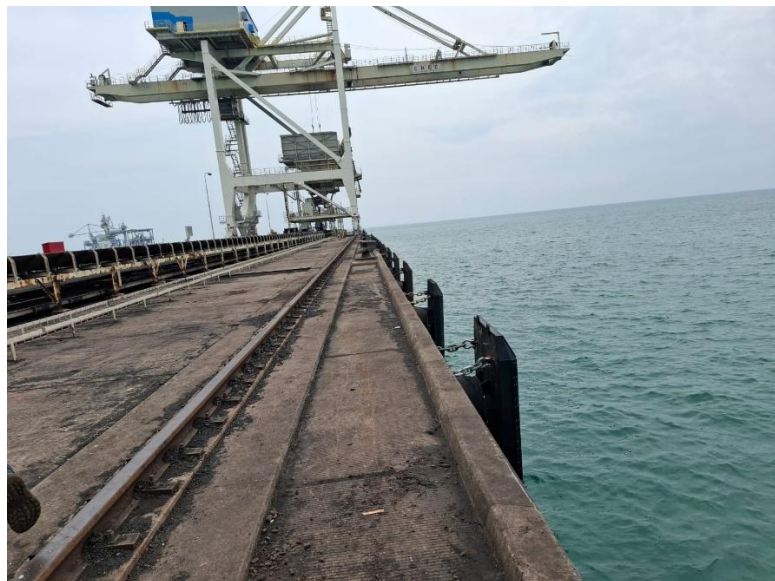
2.1.2 Penanganan Batu Bara

Pada PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), sistem penanganan batubara (coal handling system) merupakan rangkaian proses terintegrasi yang berfungsi menjamin ketersediaan bahan bakar dengan kualitas dan kuantitas yang sesuai kebutuhan pembangkit. Sistem ini dirancang untuk menjaga kontinuitas operasi, kestabilan pembakaran, serta keselamatan kerja dan lingkungan. Secara umum, siklus penanganan batubara terdiri dari beberapa tahapan berikut:

1. Penerimaan batubara (*Receiving system*)



Gambar 2.13 Penerimaan batubara di jetty pltu tanjung jati B unit 3-4

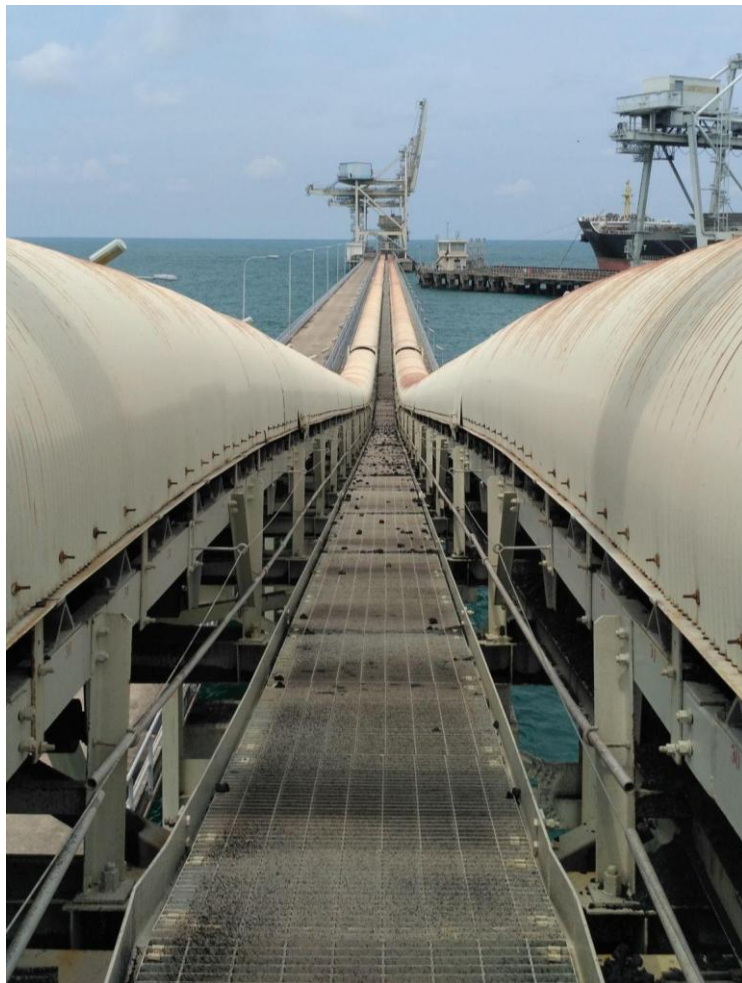


Gambar 2.14 Jetty PLTU tanjung jati B unit 3-4

Batubara dikirim dari lokasi tambang menuju PLTU Tanjung Jati B Unit 3-4, proses bongkar muat dilakukan di jetty menggunakan grab crane atau ship unloader. Material yang dibongkar diturunkan ke hopper, kemudian dialirkan ke sistem conveyor utama.

2. Pemindahan batubara menuju *coal yard*

Batubara dari jetty kemudian dipindahkan ke area penyimpanan batubara (*coal yard*) dengan menggunakan *conveyor*. Conveyor dari *jetty* ke *stockpile* merupakan bagian awal dari *coal handling system* yang berfungsi mentransportasikan batubara hasil pembongkaran kapal menuju area penyimpanan (*coal yard*). Sistem ini dirancang untuk bekerja kontinu dengan kapasitas besar, mengikuti laju bongkar muat kapal agar tidak terjadi *bottleneck* di area *jetty*.



Gambar 2.15 Conveyor dari Jetty menuju Coal yard

3. Penyimpanan dan Pengelolaan *Coal yard*

Setelah diterima, batubara disimpan di area terbuka (*coal yard*) sebagai cadangan operasi. Penumpukan dilakukan menggunakan *stacker*, sedangkan pengambilan kembali memanfaatkan *reclaimer*.

Fungsi utama tahap ini:

- a. Menyediakan buffer stock untuk menjaga keandalan pasokan
 - b. Mengurangi risiko gangguan operasi akibat keterlambatan pengiriman
- Manajemen *stockpile* juga mempertimbangkan aspek keselamatan seperti potensi self-heating dan pengendalian debu.



Gambar 2.16 *Coal yard*

4. Pengangkutan ke coal silo (Coal feeding system)

Batubara dari *stockpile* dialirkan melalui belt conveyor menuju crusher untuk pengecilan ukuran. Setelah itu material masuk ke bunker atau silo sebagai penampung sementara sebelum proses penggilingan.

Dari bunker, batubara diatur lajunya menggunakan gravimetric feeder atau volumetric feeder. Sistem ini dikendalikan secara otomatis sesuai beban pembangkit, sehingga jumlah bahan bakar yang masuk ke *boiler* dapat disesuaikan dengan kebutuhan daya.



Gambar 2.17 *Conveyor dari Coal yard menuju Coal Silo*



Gambar 2.18 *Coal Silo*

5. Proses penggilingan (*Pulverizing system*)

Di dalam *pulverizer* atau *coal mill*, batubara digiling hingga menjadi serbuk halus dengan ukuran partikel mikro. Udara panas dari sistem pembakaran

digunakan untuk mengeringkan sekaligus membawa serbuk batubara menuju burner.

Tujuan penggilingan:

- a. Memperbesar luas permukaan partikel
- b. Mempercepat reaksi pembakaran
- c. Meningkatkan efisiensi termal *boiler*

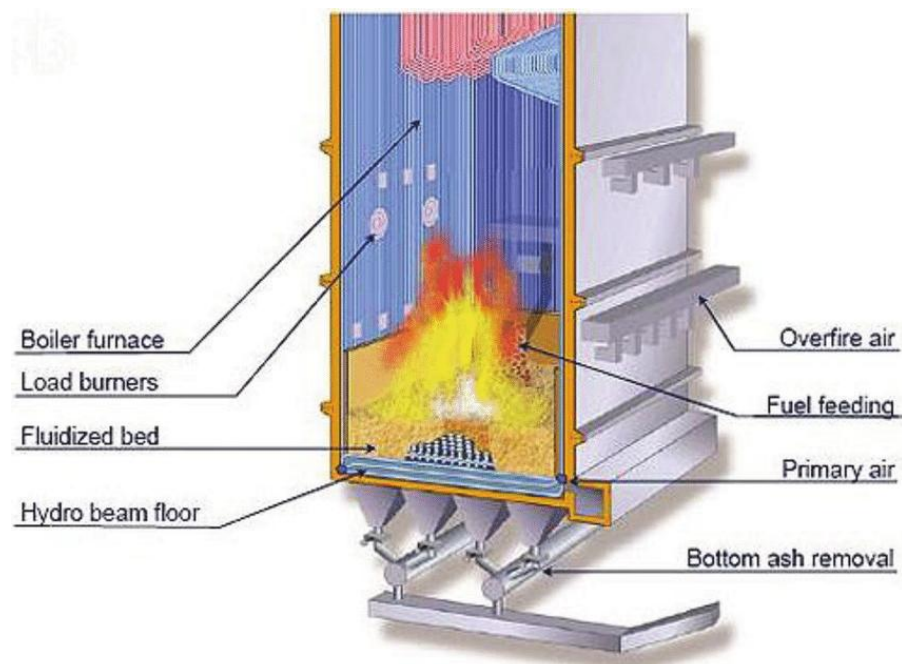
Kualitas hasil penggilingan sangat mempengaruhi kestabilan nyala api dan emisi gas buang.

6. Pembakaran di *boiler*

Serbuk batubara yang bercampur udara pembakaran diinjeksikan melalui burner ke dalam *furnace*. Energi panas hasil pembakaran digunakan untuk mengubah air menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi. Uap tersebut selanjutnya dialirkan ke turbin untuk menghasilkan energi mekanik yang dikonversi menjadi energi listrik oleh generator.

Efektivitas proses ini dipengaruhi oleh:

- a. Rasio udara-bahan bakar
- b. Distribusi partikel batubara
- c. Stabilitas sistem kontrol pembakaran



Gambar 2.19 Pembakaran Batubara di *Boiler*

2.1.3 Penanganan Debu Batubara

Sistem penanganan debu batubara merupakan salah satu komponen penting dalam area penanganan batubara. Sistem ini berfungsi untuk mengendalikan penyebaran debu batubara melalui penyemprotan air bertekanan pada titik-titik tertentu, seperti area *conveyor*, *transfer chute*, dan *coal yard* [2]. Tujuan utama dari sistem ini adalah menjaga kualitas udara di lingkungan kerja, mengurangi potensi bahaya kebakaran akibat debu, serta memenuhi standar keselamatan dan kesehatan kerja di lingkungan industri energi.



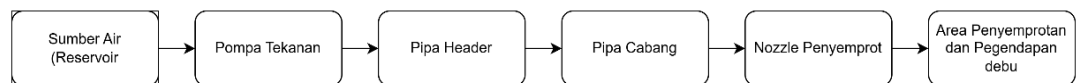
Gambar 2.20 Operasi Penanganan Debu Batubara

2.1.4 Konsep Dasar Penanganan Debu Batubara

Pipa berfungsi sebagai media untuk menyalurkan fluida bertekanan (air) dari pompa menuju *nozzle* penyemprot. Dalam sistem penanganan debu batubara, pipa bekerja pada tekanan dan suhu tertentu, serta sering terpapar lingkungan yang lembap dan mengandung partikel abrasif. Faktor-faktor tersebut dapat menimbulkan kerusakan pada material pipa, seperti korosi, erosi, dan keausan permukaan[2]. Ketahanan pipa terhadap kondisi operasi sangat bergantung pada jenis material yang digunakan dan perlakuan terhadap sistem.

2.1.5 Siklus Penanganan Debu Batubara

Sistem pengendalian debu (*dust suppression system*) pada area penanganan batubara berfungsi untuk menurunkan konsentrasi partikel debu di udara melalui mekanisme penyemprotan air bertekanan. Sistem ini bekerja secara kontinu maupun intermiten sesuai kebutuhan operasional dan dikendalikan melalui panel kontrol atau sistem otomatis berbasis tekanan dan waktu operasi.



Gambar 2.21 siklus penanganan debu batubara

Secara umum, siklus kerja sistem pengendalian debu pada PLTU Tanjung Jati B Unit 3–4 dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Sumber air (reservior)

Siklus dimulai dari tangki penampungan (*reservoir*) yang berfungsi sebagai sumber air utama sistem. Air yang digunakan dapat berasal dari sistem utilitas pembangkit yang telah melalui proses filtrasi untuk mengurangi kandungan partikel kasar.

Kualitas air berpengaruh terhadap:

- Potensi penyumbatan *nozzle*
- Endapan pada dinding pipa
- Laju korosi material

2. Pompa Tekanan

Air dari *reservoir* dialirkan menuju pompa sentrifugal yang berfungsi menaikkan tekanan sesuai kebutuhan sistem. Tekanan operasional harus cukup untuk menghasilkan atomisasi air yang optimal pada *nozzle*.

Pompa berperan dalam:

- Menjaga stabilitas tekanan aliran
- Mengatur debit air sesuai kebutuhan penyemprotan
- Menjamin distribusi air merata ke seluruh jaringan pipa

3. Pipa *header*

Air bertekanan dari pompa dialirkan ke pipa header sebagai jalur distribusi utama. Pipa header memiliki diameter lebih besar dibandingkan pipa cabang untuk meminimalkan kehilangan tekanan (*pressure drop*) sepanjang jalur distribusi.

Fungsi pipa *header*:

- a. Menyalurkan debit utama ke seluruh area *coal yard*
- b. Menjaga tekanan tetap stabil sebelum terbagi ke cabang

4. Pipa cabang

Dari pipa header, aliran air diteruskan ke pipa cabang yang mengarah ke titik-titik penyemprotan tertentu, seperti:

- a. *Area conveyor*
- b. *Transfer chute*
- c. *Stacker reclaimer*
- d. *Coal pile*

Diameter pipa cabang lebih kecil karena debit sudah terbagi. Pada tahap ini, faktor gesekan dan panjang pipa mempengaruhi kehilangan tekanan.

5. Nozzle penyemprot

Air bertekanan memasuki *nozzle* penyemprot yang berfungsi mengubah aliran menjadi butiran air halus (*droplet*) melalui proses atomisasi.

Mekanisme pengendalian debu terjadi melalui:

- a. Tumbukan antara droplet dan partikel debu
- b. Proses pembasahan permukaan batubara
- c. Penurunan partikel ke permukaan akibat bertambahnya massa

Efektivitas sistem sangat dipengaruhi oleh:

- a. Ukuran droplet
- b. Sudut semprotan
- c. Tekanan kerja
- d. Distribusi titik penyemprotan

6. Area penyemprotan dan pengendapan debu

Droplet yang dihasilkan akan menyelimuti area sumber debu dan mengikat partikel batubara di udara. Debu yang telah terikat akan mengalami peningkatan massa

sehingga jatuh kembali ke permukaan material atau tanah. Dengan demikian, konsentrasi partikel tersuspensi di udara dapat ditekan.

2.1.6 Prinsip Dasar korosi

Korosi merupakan proses degradasi atau penurunan kualitas logam akibat reaksi elektrokimia antara logam dan lingkungan sekitarnya[6]. Reaksi ini umumnya melibatkan pertukaran elektron antara logam dan zat oksidator, seperti oksigen atau ion hidrogen yang terdapat dalam air. Akibat dari proses tersebut, logam secara bertahap berubah menjadi senyawa yang lebih stabil secara termodinamik, seperti oksida, hidroksida, atau garam

Faktor-faktor yang mempengaruhi kecepatan korosi meliputi jenis logam, komposisi elektrolit, temperatur, pH lingkungan, kandungan oksigen terlarut, serta perbedaan potensial listrik antar permukaan logam. Logam yang memiliki potensial elektrode lebih negatif cenderung lebih mudah teroksidasi dibandingkan logam dengan potensial lebih positif.

Untuk mencegah atau mengendalikan korosi, beberapa metode dapat diterapkan, seperti pelapisan permukaan (*coating*), penggunaan inhibitor korosi, perlindungan katodik, serta pemilihan material tahan korosi. Upaya tersebut bertujuan untuk memutus salah satu komponen reaksi elektrokimia agar proses korosi dapat diperlambat atau dihentikan. Dengan demikian, prinsip dasar korosi terletak pada terjadinya reaksi elektrokimia antara logam dan lingkungannya yang menyebabkan degradasi material, serta pentingnya pengendalian kondisi lingkungan untuk memperpanjang umur pakai logam.

2.1.7 Jenis Jenis Material *Stainless Steel* dan Karakteristiknya

Stainless steel (baja tahan karat) adalah paduan besi yang mengandung setidaknya 10,5% kromium, yang memberikan ketahanan tinggi terhadap korosi dan oksidasi. Berdasarkan struktur mikro, kandungan, dan karakteristiknya, material ini dibagi menjadi beberapa jenis utama[7]:

1. *Austenitic stainless steel* (Seri 200 & 300)

Ini adalah jenis yang paling umum digunakan, dikenal karena ketahanan korosi yang sangat baik dan keuletan yang tinggi.

- a. Karakteristik: Tidak magnetik (atau sedikit magnetik setelah pengerjaan dingin), non-magnetik, mudah dibentuk, dan tahan suhu rendah maupun tinggi.
- b. Contoh:
 - 1) *Grade 304*: Standar *food grade* (18/8 - 18% kromium, 8% nikel). Sangat tahan karat, ideal untuk alat dapur dan tangki.
 - 2) *Grade 316*: *Marine grade*, mengandung molibdenum untuk ketahanan lebih tinggi terhadap klorida dan korosi celah.
 - 3) *Grade 201*: Lebih ekonomis, mengandung mangan lebih tinggi, namun ketahanan karat lebih rendah daripada seri 300.

2. *Ferritic stainless steel* (Seri 400)

Stainless steel ini memiliki kandungan kromium yang tinggi namun nikel yang rendah/tidak ada.

- a. Karakteristik: Magnetik, tahan korosi cukup baik (namun di bawah austenitik), dan lebih murah.
- b. Contoh:
 - 1) *Grade 430*: Umum digunakan untuk peralatan dapur, trim otomotif, dan komponen mesin yang tidak terlalu korosif.
 - 2) *Grade 409*: Sering digunakan untuk sistem pembuangan (knalpot) mobil.

3. *Martensitic stainless steel* (Seri 400)

Jenis ini dirancang untuk kekerasan dan kekuatan, sering kali melalui perlakuan panas (*heat treatment*).

- a. Karakteristik: Magnetik, keras, dan tahan aus, tetapi memiliki ketahanan korosi yang lebih rendah dibandingkan feritik atau austenitik.
- b. Contoh: *Grade 410/420*: Digunakan untuk alat potong, pisau, gunting, dan komponen pompa.

4. *Duplex stainless steel*

Merupakan campuran struktur austenitik dan *ferritic*.

- a. Karakteristik: Memiliki kekuatan mekanik dua kali lipat dibanding austenitik biasa, ketahanan sangat tinggi terhadap korosi *pitting* dan *crevice*, serta tahan terhadap klorida.
- b. Contoh: Sering digunakan pada tangki penyimpanan, sistem perpipaan di industri minyak dan gas, serta lingkungan laut.

5. *Precipitation-hardened (PH) Stainless steel*

Jenis ini memiliki kekuatan tinggi melalui proses precipitation hardening (pengerasan endapan).

- a. Karakteristik: Ketahanan korosi yang sangat baik (setara seri 300) dipadukan dengan kekuatan mekanik yang sangat tinggi.
- b. Contoh: Digunakan pada industri dirgantara, poros baling-baling, dan peralatan nuklir.

Tabel 2.1 Ringkasan Perbedaan Karakteristik

Jenis	Magnetik	Ketahanan Korosi	Keunggulan Utama
<i>Austenitic</i>	Tidak	Tinggi (304/316)	Fleksibel, <i>Food Grade</i>
<i>Ferritic</i>	Ya	Sedang	Ekonomis, Tahan Oksidasi
<i>Martensitic</i>	Ya	Rendah-Sedang	Kekerasan Tinggi, Tahan Aus
<i>Duplex</i>	Ya	Sangat Tinggi	Kekuatan Tinggi & Tahan Klorida
PH	Ya	Tinggi	Kekuatan Maksimal

2.1.8 Alternatif Material Pipa Non Logam[8], [9]

1. HDPE (*High Density Polyethylene*)

HDPE merupakan material termoplastik yang banyak digunakan dalam sistem distribusi air dan fluida industri ringan.

Keunggulan:

- a. Tahan terhadap korosi dan bahan kimia ringan
- b. Fleksibel dan tahan benturan
- c. Sambungan minim kebocoran (butt fusion)

Keterbatasan:

- a. Koefisien muai termal tinggi
- b. Memerlukan sistem penyangga yang baik
- c. Tidak sekuat baja dalam menahan beban struktural

Dalam sistem penanganan debu batubara, HDPE layak digunakan untuk tekanan rendah hingga sedang, terutama jika risiko korosi menjadi faktor dominan.

2. PPC (*Polypropylene Copolymer*)

PPC merupakan material polimer yang memiliki ketahanan korosi baik serta kemampuan menahan suhu lebih tinggi dibanding PVC [10], [11].

Keunggulan:

- a. Tidak mengalami korosi
- b. Permukaan dalam halus sehingga mengurangi kehilangan tekanan
- c. Instalasi relatif mudah

Keterbatasan:

- a. Sensitif terhadap paparan sinar UV tanpa pelindung
 - b. Kekuatan tekan dan tarik lebih rendah dibanding stainless steel
- PPC dapat menjadi alternatif untuk sistem air bersih bertekanan sedang, namun perlu evaluasi terhadap kondisi outdoor di area *coal yard*.

3. FRP (*Fiber Reinforced Plastic*)

FRP merupakan material komposit berbasis resin dan serat penguat yang memiliki kekuatan mekanik lebih tinggi dibanding polimer biasa [12], [13]

Keunggulan:

- a. Ketahanan korosi sangat baik
- b. Kekuatan relatif tinggi
- c. Bobot lebih ringan dibanding baja

Keterbatasan:

- a. Biaya lebih tinggi
- b. Instalasi lebih kompleks

Secara teknis FRP sangat baik untuk lingkungan korosif, namun untuk sistem penanganan debu batubara yang menggunakan air biasa, penggunaannya dapat menjadi kurang ekonomis.

2.2 Penelitian yang Relevan

Penelitian terdahulu menjadi acuan penting dalam mendukung kajian tentang analisa pemilihan material pipa penanganan debu batubara dari *carbon* menjadi sus 304 PLTU Tanjung Jati B unit 3-4. Beberapa penelitian yang relevan dengan topik ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Penelitian oleh Rahman (2021)[14]

Rahman melakukan penelitian mengenai pemilihan material pipa pada sistem perpipaan bertekanan tinggi di industri pembangkit listrik. Penelitian tersebut menyoroti pentingnya pemilihan material yang sesuai dengan kondisi fluida, suhu, dan tekanan operasi untuk mencegah terjadinya kegagalan akibat korosi dan keausan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *stainless steel* tipe 316L memberikan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan pipa baja karbon biasa pada lingkungan lembap. Temuan ini menjadi dasar bahwa peningkatan kualitas material sangat berpengaruh terhadap umur pakai dan keandalan sistem pipa di PLTU.

2. Penelitian oleh Yuliani (2020)[15]

Yuliani meneliti pengaruh lingkungan korosif terhadap degradasi material logam di area pembangkit listrik. Penelitian ini menjelaskan bahwa kelembapan tinggi dan paparan ion klorida dari air laut mempercepat proses korosi terutama pada baja karbon. Rekomendasi penelitian ini adalah mengganti material dengan baja tahan karat atau pipa berlapis pelindung, tergantung pada tingkat keagresifan lingkungan. Penelitian ini relevan karena kondisi di PLTU Tanjung Jati B yang berlokasi di pesisir juga memiliki tingkat kelembapan dan kadar garam udara yang tinggi, sehingga mempercepat proses korosi.

3. Penelitian Oleh Sutrisno (2023)[2]

Sutrisno melakukan studi analisis kegagalan pipa sistem fluida bertekanan pada pembangkit listrik. Ia menemukan bahwa sebagian besar kegagalan disebabkan oleh kombinasi antara korosi internal, getaran, dan tekanan kerja yang tinggi. Melalui analisis metalografi dan pengujian tarik, diperoleh bahwa penggantian material dari

carbon steel ke *stainless steel* atau paduan nikel mampu meningkatkan ketahanan terhadap korosi hingga 40%. Penelitian ini menjadi acuan penting dalam menentukan arah upgrade material pipa penanganan debu batubara agar memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap kondisi operasional.

4. Penelitian oleh Astuti dan Prasetyo (2023)[16]

Dalam penelitiannya, Astuti dan Prasetyo membahas konsep *upgrade* material pada sistem pipa industri energi. Mereka menjelaskan bahwa pemilihan material harus mempertimbangkan analisis biaya dan umur pakai agar diperoleh solusi yang efektif secara teknis maupun ekonomis. Hasil kajian mereka menunjukkan bahwa penggunaan pipa *stainless steel* 304 dengan pelapisan tambahan dapat menurunkan frekuensi perawatan hingga 30%. Penelitian ini memberikan landasan bahwa peningkatan performa material dapat memberikan manfaat langsung terhadap efisiensi sistem dan biaya operasional.

5. Penelitian oleh Handoko (2023)[17]

Handoko melakukan kajian mengenai perbandingan sifat mekanik beberapa material pipa industri berdasarkan standar ASTM. Hasilnya menunjukkan bahwa pipa baja karbon memiliki kekuatan tarik tinggi namun rentan terhadap korosi, sedangkan pipa *stainless steel* dan pipa HDPE lebih tahan terhadap lingkungan lembap, meskipun memiliki batas tekanan yang berbeda. Penelitian ini memperkuat dasar teori bahwa pemilihan material harus disesuaikan dengan kondisi operasional dan jenis fluida yang digunakan dalam sistem penanganan debu batubara.

2.3 Kerangka Pemikiran

Langkah awal penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data kondisi eksisting, meliputi jenis material pipa yang digunakan, tekanan dan suhu operasi, karakteristik fluida, serta tingkat kerusakan yang terjadi. Selanjutnya dilakukan analisis penyebab kerusakan berdasarkan hasil observasi dan literatur teknis untuk mengetahui faktor dominan yang memengaruhi degradasi material. Tahap berikutnya adalah evaluasi sifat material eksisting dibandingkan dengan alternatif material baru seperti *stainless steel* atau paduan logam lain yang lebih tahan terhadap korosi. Perbandingan dilakukan dengan mengacu pada standar material industri (ASTM/ASME) serta parameter sifat mekanik seperti kekuatan tarik, ketahanan korosi, dan ketahanan aus.

Dari hasil analisis tersebut, akan diperoleh rekomendasi material pipa pengganti yang paling sesuai dengan kondisi operasional sistem penanganan debu batubara di PLTU Tanjung Jati B. Pemilihan material yang tepat diharapkan dapat meningkatkan efisiensi sistem, menurunkan biaya perawatan, dan memperpanjang umur pakai pipa, sehingga sistem penanganan debu batubara dapat beroperasi lebih andal dan berkelanjutan.



Gambar 2.22 Kerangka Pemikiran