

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Sebagai pendukung pengerjaan penelitian ini penulis mencantumkan beberapa referensi penelitian sebelumnya yang sejenis dengan penelitian kali ini.

1. **Evaluasi efektivitas peralatan mekanik terhadap *availability* sistem *Coal Handling* di PLTU Suralaya (Widodo, 2021)**

Penelitian ini menganalisis kinerja dan keandalan peralatan utama dalam sistem penanganan batubara di PLTU Suralaya Unit 5–7. Penelitian ini bertujuan menilai pengaruh peralatan mekanik seperti *belt conveyor*, *crusher*, *Coal bunker*, dan *Coal Feeder* terhadap tingkat *availability system*, serta mengidentifikasi komponen yang paling sering menyebabkan gangguan operasional (Widodo, 2021). Penelitian tersebut menggunakan metode *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) sebagai pendekatan utama untuk menilai performa sistem. Parameter yang dianalisis meliputi tiga aspek utama, yaitu *availability*, *performance efficiency*, dan *quality rate*. Data yang digunakan berasal dari catatan operasi dan laporan gangguan selama periode satu tahun operasional PLTU. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat *availability* aktual sistem pada *Coal Handling* di PLTU Suralaya berada pada kisaran 86,4%, yang masih di bawah nilai ideal 90% yang ditetapkan perusahaan. Penyebab utama penurunan *availability* berasal dari gangguan mekanik berulang pada *Coal Feeder* (23,5% dari total *downtime*) dan *Coal bunker blocking* (17,8% dari total *downtime*). Fenomena penyumbatan (*blocking*) di area *bunker* menjadi penyebab dominan karena menyebabkan keterlambatan suplai batubara ke boiler, yang pada akhirnya menurunkan kontinuitas pembakaran dan efisiensi unit. Sebagian besar gangguan tersebut disebabkan oleh kadar kelembapan batubara yang tinggi, kondisi keausan mekanis pada *rotary feeder*, serta metode penanganan manual yang tidak efektif. Upaya peningkatan yang disarankan dalam penelitian tersebut meliputi penerapan sistem pencegah penyumbatan aktif seperti *rotary agitator* atau *antiblocking device*, peningkatan inspeksi prediktif berbasis getaran (*vibration analysis*), serta penjadwalan ulang pemeliharaan preventif untuk peralatan berisiko tinggi.

2. Optimalisasi Desain *Coal bunker* melalui Pendekatan Geometri dan Penerapan *Vibrator System* sebagai Metode Pencegah Penyumbatan (Suryana et al., 2022)

Penelitian ini berfokus pada upaya peningkatan kelancaran aliran batubara dalam *Coal bunker* di PLTU berbasis batubara. Permasalahan utama yang dikaji adalah seringnya terjadi penyumbatan (*blocking*) akibat terbentuknya *bridging* dan *rat-holing*, yang disebabkan oleh geometri *bunker* yang kurang optimal serta karakteristik fisik batubara seperti kadar kelembapan dan ukuran partikel yang tidak seragam. Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan analisis numerik berbasis simulasi aliran material (*Discrete Element Method / DEM*) untuk mempelajari pengaruh sudut kemiringan dinding *bunker* dan gaya getar dari *vibrator system* terhadap kelancaran aliran batubara. Penelitian dilakukan dengan memodelkan tiga variasi geometri *bunker*, yaitu dengan sudut dinding 45°, 55°, dan 65°, serta dua konfigurasi pemasangan *vibrator* pada sisi bawah dan tengah dinding *bunker*. Parameter utama yang diamati meliputi waktu pembentukan *bridging*, *flow rate* material keluar, dan tingkat distribusi tekanan pada dinding *bunker*.

Hasil simulasi dan pengujian menunjukkan bahwa peningkatan sudut kemiringan dinding *bunker* dari 45° ke 55° secara signifikan mengurangi kemungkinan terbentuknya *bridging*, karena gaya gravitasi material meningkat dan memperkecil zona mati (*dead zone*) di sudut bawah *bunker*. Selain itu, pemasangan *vibrator system* di sisi bawah dinding *bunker* terbukti lebih efektif dibandingkan pada sisi tengah, karena mampu mentransmisikan energi getar langsung ke area pengeluaran (*outlet*) tempat *blocking* paling sering terjadi. Dengan kombinasi geometri optimal (sudut 55°) dan getaran frekuensi 50 Hz, penelitian ini mencatat peningkatan *flow rate* aliran batubara hingga 40% dibandingkan desain awal. Dari hasil kajian tersebut, (Suryana et al., 2022) menyimpulkan bahwa kombinasi antara optimasi geometri *bunker* dan penerapan sistem getar memang dapat meningkatkan kelancaran aliran material, tetapi belum menjadi solusi jangka panjang untuk kondisi operasional dengan batubara berkelembapan tinggi atau dengan distribusi ukuran partikel yang tidak seragam. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan pengembangan teknologi

pencegah penyumbatan yang bersifat aktif dan dinamis, seperti sistem berbasis rotasi mekanis (*Rotary Antiblocking System*), yang bekerja langsung menjaga pergerakan material di dalam *bunker*. Temuan dan rekomendasi tersebut menjadi salah satu dasar teoritis bagi penelitian ini dalam mengembangkan dan menganalisis efektivitas *Rotary Antiblocking System* (RAS) sebagai solusi peningkatan keandalan sistem *Coal Handling* di PLTU.

3. Penerapan *Air Cannon System* pada *Coal bunker* PLTU Paiton sebagai Solusi Pembersihan Dinding *Bunker* dari Batubara yang Menempel (Prasetyo dan Hidayat, 2021)

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas sistem pembersihan berbasis udara bertekanan (*air cannon system*) dalam mengatasi permasalahan penumpukan dan penyumbatan batubara pada dinding *Coal bunker*. Latar belakang penelitian ini berangkat dari kondisi operasional di PLTU Paiton, di mana sering terjadi akumulasi batubara lembap di dinding *bunker* akibat sifat kohesif material, yang menghambat kelancaran aliran batubara menuju *Coal Feeder* dan menyebabkan gangguan suplai bahan bakar ke boiler.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pengamatan lapangan, pengukuran tekanan udara keluaran *air cannon*, serta analisis distribusi energi semburan udara terhadap permukaan dinding *bunker*. Sistem *air cannon* yang diuji terdiri dari tabung penampung udara bertekanan tinggi (8–10 bar), katup pelepas cepat (*quick release valve*), dan *nozzle* yang dipasang di beberapa titik strategis dinding *bunker*. Sistem ini dioperasikan secara otomatis melalui *solenoid valve* yang dikendalikan dari ruang kontrol.

Penelitian dilakukan dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah pemasangan sistem *air cannon*. Parameter yang dianalisis meliputi frekuensi terjadinya *blocking*, waktu pembersihan manual, serta volume batubara yang menempel pada dinding *bunker*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan *air cannon system* mampu mengurangi volume batubara yang menempel pada dinding hingga 60%, dan menurunkan kebutuhan pembersihan manual oleh

operator hingga 40%. Selain itu, sistem ini juga membantu menjaga kontinuitas aliran batubara menuju *Coal Feeder*, khususnya pada saat *bunker* beroperasi dengan material berkelembapan tinggi.

Namun, Prasetyo dan Hidayat juga mencatat beberapa keterbatasan sistem ini. Efektivitas pembersihan menurun pada material dengan kadar kelembapan di atas 15%, karena gaya yang diberikan dari batubara terhadap dinding lebih besar daripada energi semburan udara. Selain itu, sistem air cannon memerlukan sumber udara bertekanan stabil, sehingga menambah beban pada compressed air system di PLTU. Pengoperasian yang terlalu sering juga dapat mempercepat keausan pada katup dan menimbulkan konsumsi energi tambahan.

Dari hasil evaluasi tersebut, penelitian menyimpulkan bahwa *air cannon system* efektif digunakan sebagai solusi pembersihan dinding *bunker* (wall cleaning), tetapi kurang optimal untuk mencegah pembentukan penyumbatan di area outlet yang menyebabkan gangguan pada *Coal Feeder*. Oleh karena itu, Prasetyo dan Hidayat merekomendasikan pengembangan sistem mekanis yang dapat bekerja langsung pada zona dasar *bunker*, seperti sistem berbasis rotasi atau agitasi (*Rotary Antiblocking System*), untuk menghasilkan pencegahan penyumbatan yang lebih aktif dan berkelanjutan.

4. *Influence of Moisture Content on Flow Behavior of Coal Particles in Storage Bunker* (Chen et al., 2020)

Kajian eksperimental dan numerik yang meneliti secara spesifik bagaimana kadar kelembapan (*moisture content*) memengaruhi karakteristik aliran material batubara di dalam *bunker* penyimpanan. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk memahami hubungan antara kandungan air pada batubara dengan kecenderungan terjadinya penyumbatan (*blocking*), pembentukan jembatan material (*bridging*), dan saluran sempit (*rat-holing*) yang sering menyebabkan gangguan pada proses pengumpanan (*coal feeding*) di sistem penanganan batubara.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental berbasis laboratorium dan simulasi numerik *Discrete Element Method* (DEM). Batubara

yang digunakan memiliki variasi ukuran partikel antara 0,5–30 mm, dengan kadar kelembapan yang diatur pada rentang 4%, 8%, 12%, dan 16%. Sampel batubara tersebut dimasukkan ke dalam model *bunker* mini yang dilengkapi sensor tekanan dan kamera kecepatan tinggi untuk merekam pola pergerakan material. Parameter yang diukur meliputi laju aliran material keluar (*discharge rate*), tekanan dinding *bunker* (*wall pressure*), serta distribusi gaya antarpartikel (*inter-particle force distribution*).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan kadar kelembapan memiliki pengaruh signifikan terhadap perilaku aliran batubara. Pada kadar air di bawah 8%, batubara masih bersifat granular bebas dan mampu mengalir lancar mengikuti gaya gravitasi. Namun, pada kadar kelembapan antara 10–12%, partikel mulai membentuk ikatan kapiler (*capillary bridge*) antarbutir, sehingga menyebabkan kecenderungan terjadinya *bridging* di tengah *bunker* dan menghambat aliran material ke outlet. Ketika kadar kelembapan meningkat hingga di atas 14%, terbentuk lapisan material yang melekat kuat pada dinding *bunker* dan saluran keluar (*rat-holing phenomenon*), yang menyebabkan aliran material berhenti total meskipun bagian tengah *bunker* masih berisi batubara.

Analisis menggunakan simulasi DEM (*Discrete Element Method*) memperkuat temuan eksperimental tersebut dengan menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar air, gaya kohesi antarpartikel meningkat secara eksponensial, sementara gaya gesek terhadap dinding *bunker* juga bertambah. Kombinasi kedua faktor ini menghasilkan pola distribusi tegangan yang tidak merata dan menciptakan zona mati (*dead zone*) di area bawah *bunker*. Fenomena ini menjelaskan penyebab utama penyumbatan (*blocking*) yang sering terjadi pada *bunker* dengan batubara berkelembapan tinggi.

Chen et al. (2020) menyimpulkan bahwa kelembapan merupakan faktor paling dominan yang memengaruhi kelancaran aliran batubara di *bunker*, lebih besar dibandingkan variabel ukuran partikel atau kemiringan dinding *bunker*. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan dua pendekatan untuk mengurangi dampak kelembapan tinggi :

- a. Pendekatan pasif

seperti desain ulang geometri *bunker* dengan sudut curam di atas 60° untuk memperkecil gaya gesek dinding.

b. Pendekatan aktif

berupa penerapan sistem mekanis atau getaran kontinu yang dapat menjaga pergerakan material agar tetap dinamis dan mencegah terbentuknya jembatan material.

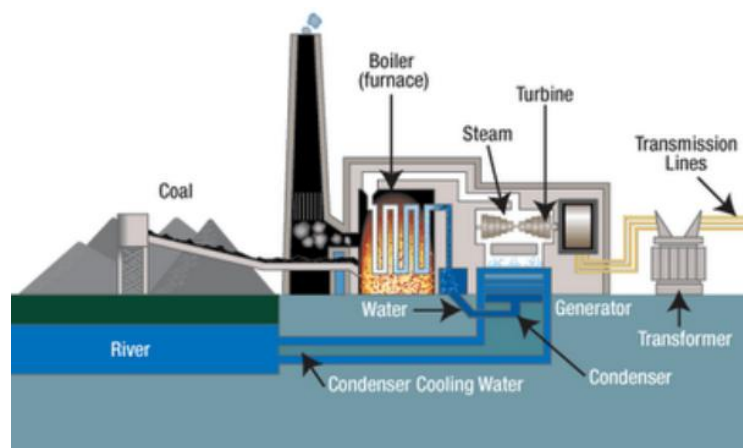
Rekomendasi ini menjadi dasar penting bagi pengembangan teknologi mekanis pencegah penyumbatan, seperti *Rotary Antiblocking System (RAS)*, yang bekerja dengan prinsip menjaga rotasi dan pergerakan material di bagian bawah *bunker* agar aliran batubara tetap stabil meskipun dalam kondisi kelembapan tinggi.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

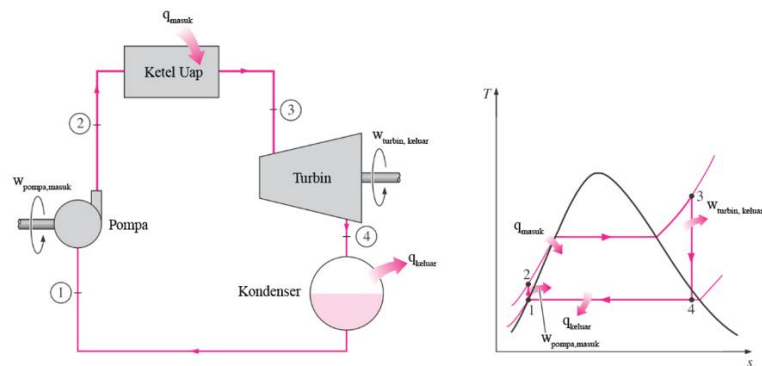
PLTU memanfaatkan energi panas hasil pembakaran batubara untuk menghasilkan uap bertekanan yang menggerakkan turbin dalam siklus tertutup (siklus Rankine). Dalam siklus ini, air dipanaskan, diuapkan, diekspansikan di turbin, kemudian dikondensasikan kembali untuk digunakan ulang.

Stabilitas suplai batubara sangat menentukan keberhasilan proses pembakaran di boiler. Gangguan aliran batubara menurunkan tekanan uap dan efisiensi pembangkitan, serta dapat menyebabkan penurunan beban hingga trip unit. Oleh karena itu, *Coal Handling System* memegang peranan penting dalam menjaga kontinuitas operasi PLTU (Pambudi, 2020).



Gambar 2.1. Proses Kerja pada Sistem PLTU

Gambar 2.1 menunjukkan alur konversi energi pada PLTU mulai dari pembakaran batubara di boiler, pembentukan uap, pemutaran turbin, hingga pembangkitan energi listrik. Diagram ini digunakan sebagai dasar untuk memahami pentingnya kontinuitas suplai batubara terhadap kestabilan operasi unit. Siklus Rankine, air mengalami proses pemanasan, penguapan, ekspansi, dan kondensasi secara berulang. Air yang telah berubah menjadi uap diekspansikan di turbin untuk menghasilkan energi mekanik, kemudian dikondensasikan kembali menjadi air di *condenser* sebelum dipompa ke boiler untuk digunakan kembali. Siklus tertutup ini menjadikan PLTU efisien dan mampu beroperasi secara berkelanjutan. Namun, efisiensi termal PLTU sangat dipengaruhi oleh stabilitas pembakaran di boiler, sehingga kontinuitas suplai bahan bakar batubara menjadi faktor yang sangat kritis dalam operasi unit pembangkit.

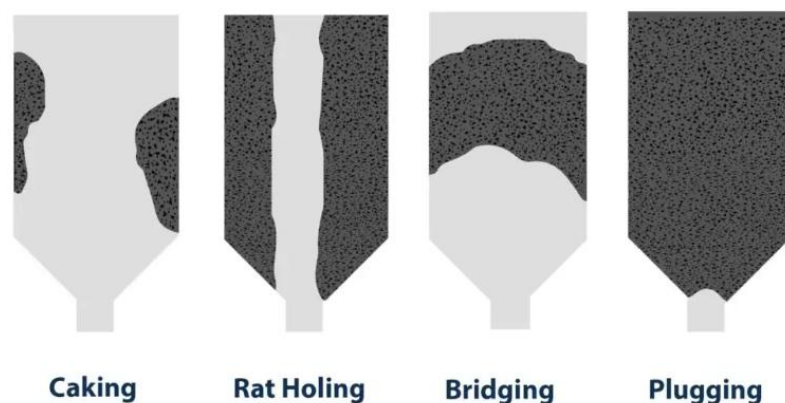


Gambar 2.2 Siklus *Rankine* PLTU

Pada PLTU Banten 2 Labuan dengan kapasitas 2×300 MW, sistem pembangkit terdiri dari beberapa subsistem utama seperti Sistem Penanganan Batubara (*Coal Handling System*), yang bertanggung jawab atas penerimaan, penyimpanan, dan penyaluran batubara ke ruang bakar, Sistem Pembakaran (*Boiler System*), tempat berlangsungnya proses konversi energi kimia batubara menjadi energi panas, Sistem Turbin Uap dan Generator, yang mengubah energi panas uap menjadi energi mekanik dan kemudian menjadi energi listrik, Sistem Penanganan Abu (*Ash Handling System*), yang mengelola residu hasil pembakaran batubara seperti *fly ash* dan *bottom ash*, Sistem Pendinginan

(*Cooling System*), yang menjaga keseimbangan termal dengan mendinginkan uap di *condenser*.

Salah satu subsistem yang berperan vital dalam menjamin kelancaran operasi PLTU adalah *Coal Handling System* (CHS), karena sistem ini berfungsi sebagai jalur utama pasokan bahan bakar dari *unloading* area hingga ke *boiler*. Gangguan yang timbul pada sistem ini, terutama pada area *Coal bunker* dan *Coal Feeder*, dapat mengakibatkan gangguan pada suplai batubara yang menyebabkan penurunan beban pembangkit bahkan trip unit. Hal yang sering terjadi yaitu penyumbatan (*Coal bunker blocking*) menjadi salah satu penyebab utama gangguan di PLTU berbahan bakar batubara, terutama pada kondisi curah hujan tinggi yang meningkatkan kadar kelembapan batubara. Hal ini dikarenakan batubara pada PLTU Labuan merupakan batubara *sub-bituminous coal*. *Sub-bituminous coal* adalah tingkat maturitas di antara *lignite* (batubara muda) dan *bituminous coal* (batubara matang), *Sub-bituminous coal* sendiri memiliki kadar kelembapan inheren 4 – 10 %, sedangkan batubara tersebut ketika musim hujan meningkat kelembapan di atas 12% cenderung dapat mengalami potensi menempel pada dinding *bunker*, sehingga menghambat aliran material ke *Coal Feeder*. Akibatnya, suplai bahan bakar ke boiler menjadi tidak stabil, menurunkan tekanan uap dan efisiensi termal unit (Chen et al., 2020).



Gambar 2.3. *Blocking* Batubara pada *Bunker*

Fenomena penyumbatan batubara (*blocking*) pada *Coal bunker*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3, terjadi akibat terbentuknya jembatan material (*bridging*) di dalam *bunker*. Kondisi ini menghambat aliran batubara menuju

Coal Feeder dan berpotensi menurunkan keandalan unit. Kelancaran suplai batubara menjadi kunci stabilitas operasi PLTU Banten 2 Labuan.

Sistem penanganan batubara telah menggunakan peralatan utama seperti *belt conveyor*, *crusher*, *Coal bunker*, dan *Coal Feeder*, gangguan *blocking* masih sering terjadi. Gangguan ini menghentikan aliran batubara, meningkatkan *downtime* peralatan, serta memerlukan penanganan manual yang memakan waktu. Akibatnya, keandalan unit pembangkit ikut menurun.

PLTU Banten 2 Labuan menerapkan *Rotary Antiblocking System* (RAS) sebagai sistem mekanis aktif di area bawah *bunker*. Sistem ini menjaga pergerakan batubara agar tidak menggumpal di keluaran *bunker*. Penerapan RAS diharapkan mampu mengurangi potensi penyumbatan secara signifikan dan meningkatkan nilai *availability*, *reliability*, serta efisiensi sistem *Coal Handling*.

2.2.2 Sistem Penanganan Batubara (*Coal Handling System*)

Coal Handling System (CHS) mencakup rangkaian peralatan yang berfungsi menerima, memindahkan, menghancurkan, menyimpan, dan menyalurkan batubara hingga tiba di *Coal Feeder*. Rangkaian sistem ini meliputi conveyor, crusher, *bunker*, dan feeder. Tingkat keandalan sistem ini berpengaruh langsung terhadap performa dan efisiensi unit pembangkit, sebab gangguan kecil pada aliran batubara dapat menyebabkan terhambatnya suplai batubara menuju *boiler*, yang akhirnya berdampak pada penurunan daya listrik yang dihasilkan (Djafar, 2021).

Secara garis besar, sistem penanganan batubara terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu sistem penerimaan dan penimbunan batubara (*coal unloading & stacking system*) serta sistem penyaluran batubara ke *boiler* (*bunker & feeder system*). Berikut adalah uraian fungsi dan alur prosesnya :

a. Penerimaan dan Pengangkutan Batubara

Batubara yang diterima dari kapal atau tongkang dipindahkan melalui *conveyor* menuju *stockpile* untuk dilakukan blending dan penyimpanan sementara.

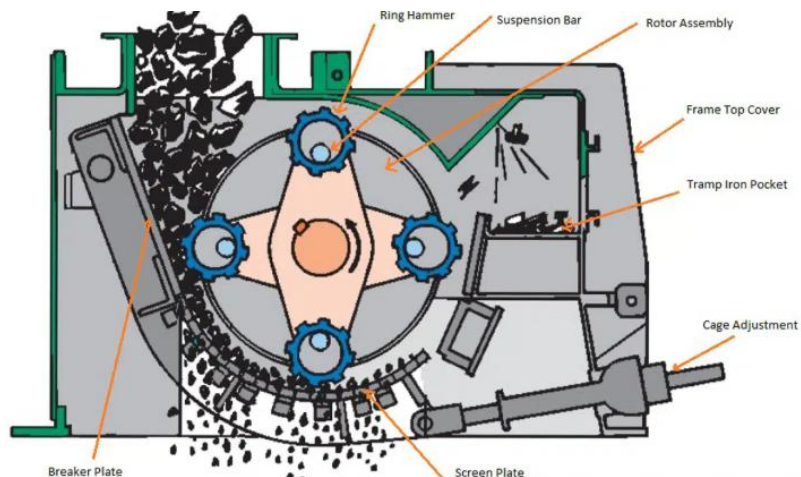


Gambar 2.4. Peralatan Ship Unloader dan Kapal Tongkang Batubara

Menjaga kualitas batubara, sistem *stacker reclaimer* digunakan untuk menumpuk dan mengambil batubara secara bergantian sehingga terjadi pencampuran homogen (*blending*). Hal ini penting karena variasi kadar air, ukuran partikel, dan kandungan abu dapat memengaruhi kestabilan pembakaran di boiler (Suryana et al., 2022).

b. Sistem Penghancuran Batubara (*Crushing System*)

Sebelum dialirkan ke *Coal bunker*, batubara harus melalui proses penghancuran agar ukurannya seragam dan sesuai dengan kebutuhan *Coal Feeder* dan *pulverizer*. Alat yang digunakan adalah *ring granulator crusher* atau *double roll crusher*.



Gambar 2.5. Coal Crusher PLTU

Tujuan utama dari proses crushing adalah Mengurangi ukuran batubara hingga 0–20 mm untuk memastikan kelancaran aliran di dalam *bunker*, Menghindari penyumbatan akibat ukuran batuan besar (*oversized lumps*), Meningkatkan efisiensi proses pembakaran dengan memperluas permukaan kontak batubara terhadap udara panas di boiler (Rahardjo, 2020). *Crusher* menurunkan ukuran batubara agar sesuai dengan spesifikasi pembakaran. Ukuran yang terlalu besar dapat menjadi pemicu *blocking* di *bunker*.

c. Sistem Penyimpanan dan Penyaluran Batubara (*Coal bunker System*)

Setelah melalui proses penghancuran, batubara dialirkan ke *Coal bunker* sebagai tempat penyimpanan sementara sebelum menuju *Coal Feeder*. *Coal bunker* berfungsi sebagai *buffer* agar suplai batubara tetap stabil meskipun terjadi variasi kecepatan aliran di sistem Conveyor.



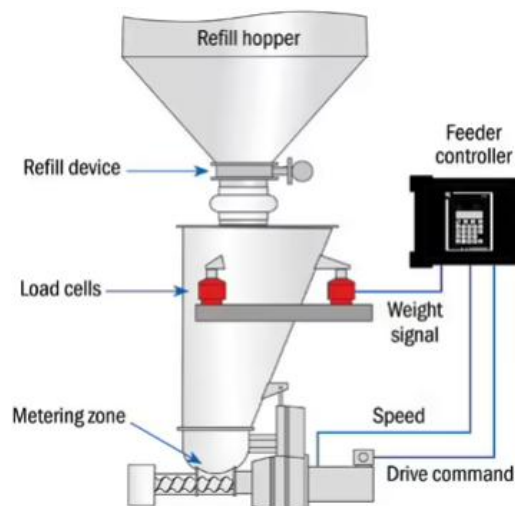
Gambar 2.6. Desain *Coal bunker* PLTU

Bentuk geometris *bunker* pada gambar 2.6 yang mempengaruhi pola aliran batubara. Sudut kemiringan dinding dan posisi *outlet* berperan penting terhadap kemungkinan terjadinya fenomena *bridging* dan *rat-holing*. *Bunker* berbentuk kerucut terbalik dengan dinding miring (misalnya 50° – 65°), menyesuaikan sifat aliran batubara. Namun, dalam praktiknya sering terjadi permasalahan penyumbatan (*blocking*) akibat kadar air tinggi, distribusi ukuran partikel yang tidak merata, atau adanya kandungan lempung (*clay*). Fenomena ini menghambat aliran batubara secara gravitasi dan menyebabkan ketidakstabilan suplai ke *Coal Feeder*. Untuk mengatasi hal tersebut, beberapa sistem bantu telah digunakan seperti *vibrator system*, *air cannon*, dan kini

dikembangkan *Rotary Antiblocking System* (RAS) sebagai solusi aktif berbasis rotasi mekanis (Chen et al., 2020).

d. Sistem Pengumpanan Batubara (*Coal Feeder System*)

Coal Feeder merupakan komponen yang berfungsi mengatur laju aliran batubara dari *bunker* menuju *pulverizer* atau langsung ke furnace, tergantung jenis boiler yang digunakan. *Coal Feeder* harus mampu menjaga suplai batubara dalam jumlah konstan agar pembakaran berlangsung stabil. Jenis *Coal Feeder* yang umum dipakai pada PLTU seperti *Gravimetric Feeder* dan *Volumetric Feeder*. *Gravimetric Feeder* bekerja dengan prinsip pengukuran massa aktual batubara yang mengalir, menggunakan sensor beban (*load cell*) untuk mengatur laju aliran secara presisi. Sedangkan, *Volumetric Feeder* bekerja berdasarkan volume aliran batubara yang dikendalikan oleh kecepatan putar screw atau belt.

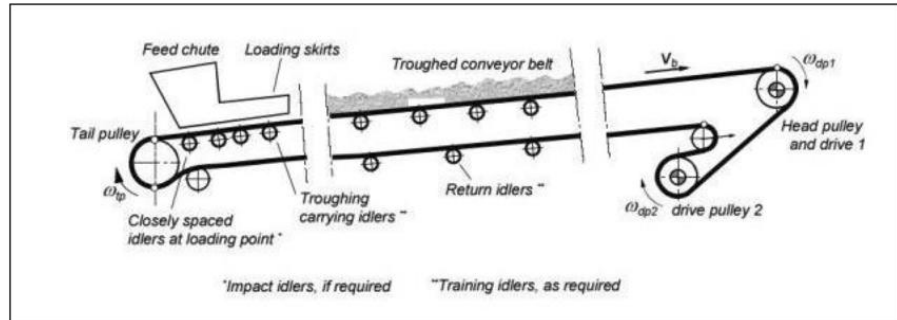


Gambar 2.7. *Gravimetric Feeder* (Pharmaceutical Technology, 2013)

Pada PLTU Banten 2 Labuan untuk *Coal Feeder* yang digunakan adalah *Gravimetric Coal Feeder*. Gangguan seperti *Coal bunker blocking* akan langsung memengaruhi kinerja *feeder*, menimbulkan kondisi “*coal flow interruption*” yang dapat menyebabkan *flame instability* bahkan *boiler trip* jika tidak segera ditangani (Widodo, 2021).

e. Sistem Transportasi Internal (*Belt Conveyor System*)

Sistem konveyor merupakan tulang punggung dalam distribusi batubara di PLTU. Batubara dipindahkan dari *unloading area* ke *coal yard*, kemudian dari *crusher house* ke *bunker*. Komponen utama *belt conveyor* meliputi *head pulley*, *tail pulley*, *idler roller*, *belt cleaner*, dan *drive motor gearbox*.

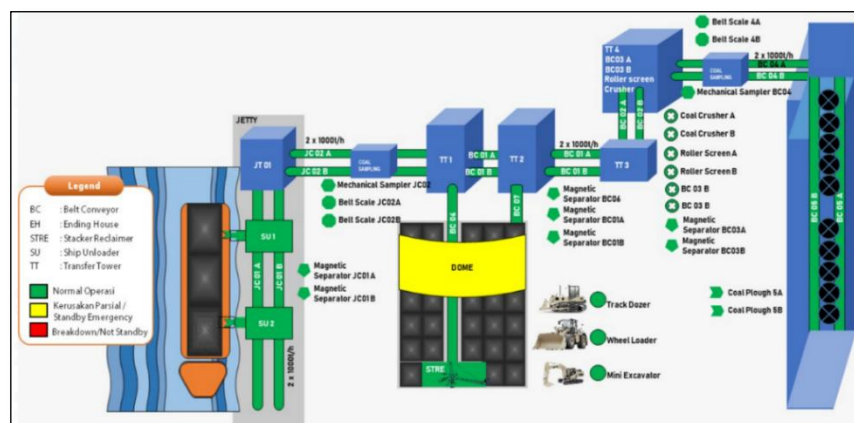


Gambar 2.8. *Belt conveyor* dan peralatan pendukung

Faktor-faktor penting yang memengaruhi keandalan sistem ini antara lain ketegangan sabuk, keselarasan (*alignment*), kondisi *bearing*, dan sistem pelumasan gearbox. Gangguan pada konveyor seperti *belt misalignment*, *idler jammed*, atau *motor trip* dapat menyebabkan keterlambatan suplai ke *bunker*, yang berpotensi mengganggu kestabilan pembakaran di boiler (Hernowo & Prasetya, 2021).

f. Peranan *Coal Handling System* terhadap Keandalan Unit PLTU

Keandalan sistem *Coal Handling* berhubungan langsung dengan keandalan unit pembangkit. Ketika sistem ini mampu menjaga pasokan batubara secara konsisten, maka operasi boiler menjadi stabil, tekanan uap konstan, dan efisiensi termal meningkat.



Gambar 2.9. *Coal Handling System* PLTU Labuan

Sebaliknya, gangguan seperti penyumbatan *bunker*, kerusakan *Coal Feeder*, atau kegagalan konveyor dapat menyebabkan penurunan *availability* unit, peningkatan *downtime*, serta potensi kehilangan produksi listrik (*generation loss*). Dengan demikian, peningkatan efektivitas sistem *Coal Handling* melalui penerapan inovasi mekanis seperti *Rotary Antiblocking System* (RAS) menjadi strategi penting untuk mencapai target keandalan unit PLTU Banten 2 Labuan sebesar $\geq 90\%$ *availability factor*.

2.2.3 *Coal bunker* dan Fenomena Penyumbatan (*Blocking*)

Coal bunker bekerja mengandalkan gravitasi sehingga batubara dapat mengalir dari bagian atas menuju *outlet*. Namun, beberapa kondisi dapat membuat aliran material menjadi terhambat, terutama ketika batubara memiliki kelembapan yang tinggi atau ukuran butiran tidak seragam. Kapasitas *bunker* pada PLTU skala besar, seperti PLTU Banten 2 Labuan (2×300 MW), umumnya mencapai 200–400 ton per unit, dengan waktu penyangga suplai sekitar 2 – 4 jam operasi (PLN Engineering, 2021).

Fenomena *blocking* menyebabkan aliran batubara terhambat atau berhenti sama sekali untuk menuju *Coal Feeder*, yang pada akhirnya mengganggu proses pembakaran di boiler dan menurunkan *availability* unit pembangkit.

2.2.3.1 Mekanisme Terjadinya Penyumbatan (*Blocking Mechanism*)

Penyumbatan pada *bunker* disebabkan oleh interaksi antara karakteristik material, kondisi lingkungan, serta desain geometris *bunker* (Chen et al., 2020 dan Suryana et al, 2022), terdapat tiga bentuk utama gangguan aliran material granular di dalam *bunker*, yaitu :

a. *Bridging (Arching Formation)*

Fenomena *bridging* terjadi ketika partikel batubara saling mengunci dan membentuk lengkungan padat yang menutupi area keluaran (*outlet*) pada *bunker*. Formasi ini mampu menopang beban material di atasnya sehingga aliran batubara terhenti dari bagian bawah. Kondisi tersebut umumnya dipicu oleh peningkatan kadar air batubara yang menyebabkan kohesi

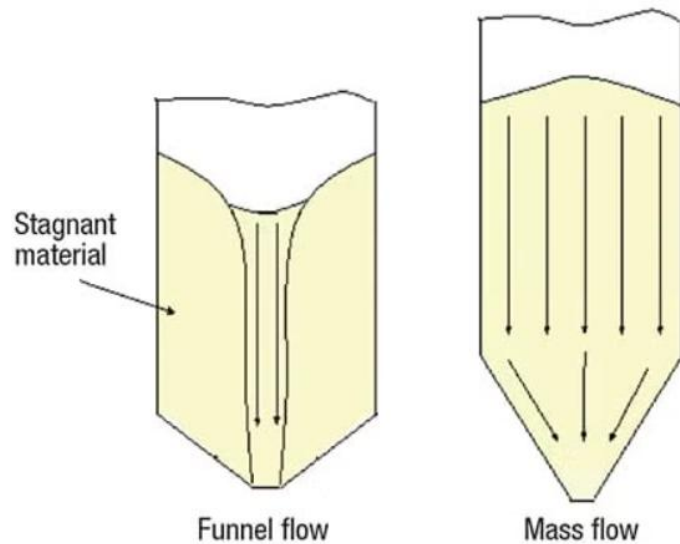
antarpartikel menjadi meningkat, serta dipengaruhi oleh geometri *bunker* yang kurang ideal, khususnya jika bagian bawahnya memiliki sudut atau ruang yang terlalu sempit sehingga mempermudah terjadinya penguncian material atau *bridging*.

b. *Rat-holing*

Rat-holing adalah kondisi ketika batubara hanya dapat mengalir melalui satu saluran sempit di tengah *bunker*, sementara material di sekitar dinding tetap tidak bergerak (*stagnant zone*). Akibatnya, sebagian besar volume *bunker* tidak digunakan secara optimal untuk aliran batubara ke bawah. Hal ini dapat muncul pada material dengan ukuran butiran yang tidak seragam atau memiliki kadar kelembapan tinggi, yang meningkatkan gaya adhesi antara partikel dan dinding *bunker*.

c. *Wall Adhesion (Material Sticking)*

Pada kondisi tertentu, batubara dapat melekat pada dinding *bunker* akibat dari tingginya kadar air dan adanya fraksi lempung (*clay*) dalam material. Seiring berjalannya waktu, material yang menempel tersebut membentuk lapisan yang semakin tebal, sehingga volume efektif *bunker* semakin berkurang. Jika penumpukan ini terus berlanjut, aliran batubara ke bagian *outlet* dapat terhambat atau bahkan terhenti sama sekali.



Gambar 2.10. Laju Aliran Batubara

Gambar 2.10 menunjukkan kondisi *mass flow*, seluruh material di dalam *bunker* bergerak secara seragam dari atas ke bawah, menghasilkan aliran yang stabil dan terkendali. Sedangkan pada *funnel flow*, material hanya bergerak di bagian tengah, sementara sisi dinding mengalami *stagnation*. *Funnel flow* inilah yang sering menjadi cikal bakal terjadinya *bridging* dan *rat-holing*.

2.2.3.2 Faktor-Faktor Penyebab *Blocking*

Berdasarkan hasil penelitian terdahulu (Chen et al., 2020; Prasetyo & Hidayat, 2021; Putra et al., 2023), faktor-faktor utama yang mempengaruhi terjadinya *Coal bunker blocking* antara lain,

a. Kelembapan Material (Moisture Content)

Kelembapan tinggi yang dapat meningkatkan gaya kohesi antarpartikel akibat terbentuknya jembatan kapiler (*capillary bridge*). Semakin tinggi kadar air (di atas 12%), semakin besar gaya tarik antarpartikel dan potensi pembentukan gumpalan (Chen et al., 2020).

b. Distribusi Ukuran Partikel (*Particle Size Distribution*)

Perbedaan ukuran butiran batubara dapat menyebabkan partikel kecil mengisi rongga antarpartikel besar, meningkatkan

kepadatan massa dan memperkecil ruang udara di antaranya. Hal ini memperbesar gaya gesek internal dan dapat juga memperlambat laju aliran.

c. Sudut Dinding *Bunker* (*Bunker Wall Angle*)

Apabila sudut kemiringan dinding *bunker* terlalu kecil (misal kurang dari 55°), luas bidang kontak antara batubara dan dinding menjadi lebih besar. Kondisi ini meningkatkan gaya gesek yang bekerja pada material dan memicu terbentuknya area *stagnan* atau *dead zone* pada bagian bawah *bunker*.

d. Sifat Material Dinding (*Wall Roughness*)

Permukaan dinding yang kasar meningkatkan gesekan dan memicu terbentuknya zona mati.

e. Kandungan Lempung dan Debu Halus (*Clay & Fine Particles*)

Partikel halus bersifat mudah menyerap air, sehingga memperkuat ikatan antarpartikel dan menyebabkan batubara menggumpal berpotensi menempel pada dinding dan antar material.

f. Getaran dan Aktivitas Mekanis (*Mechanical Agitation*)

Tidak adanya gerakan mekanis atau getaran membuat material cenderung stagnan di bagian bawah *bunker*. Getaran membantu memutus ikatan antarpartikel. Tanpa agitasi, daerah bawah *bunker* rentan stagnasi.

2.2.3.3 Dampak *Blocking* terhadap Operasional PLTU

Penyumbatan batubara di *Coal bunker* dapat menimbulkan berbagai dampak operasional, antara lain :

a. Gangguan Suplai ke *Coal Feeder*

Feeder tidak mendapatkan pasokan material secara kontinu sehingga laju pembakaran di boiler cenderung tidak stabil.

b. Penurunan Efisiensi Pembakaran

Ketika suplai batubara tersendat, rasio udara-bahan bakar (*air-fuel ratio*) menjadi tidak seimbang, menurunkan efisiensi termal pada boiler.

c. Peningkatan *Downtime* dan Beban Kerja Operator

Penanganan manual *blocking* biasanya membutuhkan waktu lama dan risiko keselamatan tinggi karena melibatkan aktivitas pembersihan langsung di *bunker*.

d. Menurunnya Nilai *Availability* dan *Reliability*

Frekuensi gangguan tinggi akibat *blocking* menyebabkan penurunan *Mean Time Between Failure* (MTBF) dan peningkatan *Mean Time To Repair* (MTTR) pada sistem *Coal Handling*.

Penurunan efektivitas sistem mekanik pada *Coal Handling* sebesar 10% dapat menyebabkan penurunan *availability* unit hingga 3–5%, tergantung kapasitas dan durasi gangguan (Widodo, 2021).

2.2.3.4 Solusi Penanganan Penyumbatan

Berbagai pendekatan telah dilakukan untuk mencegah atau mengatasi fenomena penyumbatan pada *Coal bunker*, di antaranya :

a. Metode Pasif

Perbaikan desain *bunker* seperti memperbesar sudut dinding, melapisi permukaan dengan material rendah gesek (misal *stainless steel* atau UHMWPE), dan mengontrol kadar air batubara dengan cara drying batuabara pada line conveyor.

b. Metode Aktif

Pemasangan sistem mekanis atau pneumatik seperti *vibrator system*, *air cannon system*, atau *Rotary Antiblocking System* (RAS). Metode aktif dinilai lebih efektif karena bekerja secara langsung pada zona bawah *bunker* untuk menjaga pergerakan material agar tidak stagnan. Sistem RAS, misalnya, memanfaatkan putaran pisau pengaduk (*rotary blades*) berkecepatan rendah untuk mengurai material yang mulai

menggumpal di sekitar *outlet* dinding *bunker*, sehingga mencegah terbentuknya *bridging* dan *rat-holing* (Putra et al., 2023).

2.2.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kelancaran Aliran Batubara

Aliran batubara di dalam *Coal bunker* merupakan fenomena kompleks yang dipengaruhi oleh faktor fisik, mekanis, dan geometris. Perilaku aliran material granular seperti batubara dipengaruhi oleh sifat material ukuran partikel, kelembapan, densitas, dan sudut gesek serta desain *bunker* yang mengatur pengaruh gaya gravitasi, gesekan, dan tekanan di dalam sistem (Chen et al., 2020 dan Suryana et al., 2022). Kombinasi faktor tersebut menentukan apakah batubara mengalir lancar (*mass flow*) atau mengalami hambatan (*funnel flow*) hingga penyumbatan (*blocking*) di dalam *Coal bunker*.

a. Kelembapan Batubara (*Moisture Content*)

Kelembapan (*moisture content*) adalah kandungan air dalam batubara yang dinyatakan dalam persen massa. Semakin tinggi kelembapan, semakin besar gaya kohesi antarpartikel pada setiap material batubara. Air membentuk jembatan tipis (*capillary bridge*) yang mengikat butiran batubara satu sama lain seperti lem. Hal ini dijelaskan dengan gaya kohesi kapiler :

$$F_c = \pi \gamma R \cos \theta_c$$

F_c : gaya kohesi antarpartikel (N)

γ : tegangan permukaan air (~0,072 N/m)

R : jari-jari partikel (m)

θ_c : sudut kontak air terhadap permukaan partikel. (°)

Dampaknya terhadap aliran Jika kadar air < 8%, material bersifat bebas (*free-flowing*). Jika pada kisaran 10 – 12%, hal tersebut mulai membentuk *bridging*. Di atas 14%, material menjadi kohesif — menyebabkan *rat-holing* dan *blocking*. Kelembapan tinggi juga menyebabkan material menjadi lebih berat dan meningkatkan gaya normal terhadap dinding *bunker*, sehingga memperbesar gaya gesek dan memperlambat aliran gravitasi.

b. Sudut Dinding *Bunker* (*Bunker Wall Angle*)

Sudut dinding *bunker* menentukan apakah aliran material bersifat *mass flow* atau *funnel flow*. Rumus yang berlaku ;

$$\tan(\theta) > \mu$$

θ : sudut dinding *bunker* ($^{\circ}$),

μ : koefisien gesek antara material dan dinding.

Jika $\tan(\theta) < \mu$, maka gaya gesek lebih besar sehingga material menempel pada dinding akan membentuk *funnel flow*. Sudut *bunker* untuk batubara kering untuk amannya sekitar (θ) $25^{\circ} - 30^{\circ}$ dan batubara lembap $35^{\circ} - 40^{\circ}$

c. Kekasaran dan Material Dinding (Wall Roughness & Material)

Kondisi permukaan dinding *bunker* juga menjadi faktor penting. Dinding *bunker* yang kasar, berkarat, atau tertutup lapisan debu akan memiliki koefisien gesek yang cukup tinggi terhadap batubara. Semakin tinggi nilai koefisien gesek (μ), semakin besar gaya tahanan terhadap gerakan partikel. Dinding baja tanpa pelapis memiliki nilai,

$$\mu = 0.55$$

Sedangkan jika dilapisi material *low-friction* seperti stainless steel atau UHMWPE, nilai (μ) dapat diturunkan hingga 0.25, yang berarti peningkatan kelancaran aliran hingga 40%. Selain itu, kondisi dinding yang bersih dari kerak dan residu pembakaran juga berpengaruh signifikan terhadap kestabilan aliran material di dalam *bunker*.

d. Getaran dan Aktivitas Mekanis (*Mechanical Agitation*)

Keberadaan getaran atau gerakan mekanis di dalam *bunker* sangat membantu mencegah stagnasi material. *Vibrator system* dan *air cannon* adalah dua metode umum yang digunakan untuk menstimulasi aliran material. Namun, keduanya bersifat periodik dan pasif, sehingga efektivitasnya menurun seiring waktu, terutama untuk material dengan kadar air tinggi. Sebaliknya, sistem *Rotary Antiblocking System* (RAS) bekerja dengan prinsip rotasi kontinu di area outlet *bunker* untuk menjaga material tetap bergerak. Gerakan rotasi ini menciptakan distribusi gaya geser lokal yang memecah gumpalan batubara dan mencegah terbentuknya jembatan material (*bridging*). *Rotary Antiblocking System* (RAS) dapat meningkatkan *flow rate* batubara hingga 70% dibandingkan kondisi tanpa

sistem agitasi, dengan konsumsi energi relatif rendah karena hanya membutuhkan motor berkecepatan rendah (~15 rpm) (Putra et al., 2023).

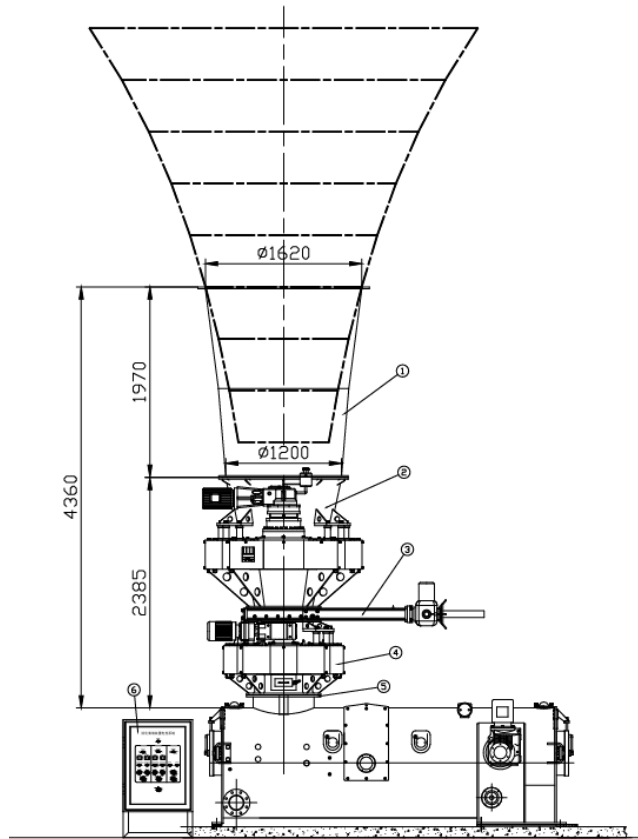
e. Kondisi Operasional Lingkungan

Faktor eksternal seperti suhu dan kelembapan udara sekitar juga dapat memengaruhi perilaku material. Suhu rendah dan kelembapan tinggi di sekitar *bunker* mempercepat terjadinya kondensasi air di dinding *bunker*, yang memperburuk potensi *sticking* dan *blocking*. PLTU yang berlokasi di pesisir seperti PLTU Banten 2 Labuan, kadar garam udara laut (*saline humidity*) juga berkontribusi terhadap peningkatan korosi dan kekasaran dinding *bunker* sendiri.

Faktor-faktor di atas membuat penelitian ini menekankan bahwa pengendalian aliran batubara tidak hanya bergantung pada desain pasif *bunker*, tetapi juga memerlukan solusi mekanis aktif agar selalu berjalan kontinu seperti *Rotary Antiblocking System (RAS)* untuk menjaga kontinuitas suplai batubara secara berkelanjutan.

2.2.5 *Rotary Antiblocking System (RAS)*

Rotary Antiblocking System (RAS) merupakan sistem mekanis yang dirancang untuk mencegah dan mengatasi fenomena penyumbatan (*blocking*) material batubara di area bawah *Coal bunker*. Sistem ini bekerja dengan prinsip proses pencampuran atau pengadukan fluida atau material padat dan cair dengan cara rotasi kontinu pada zona *outlet bunker* dengan cara menggunakan poros berputar yang dilengkapi pisau pengaduk (*rotary blades*). Melalui pergerakan rotasi yang konstan dan torsi rendah, sistem ini menjaga material agar tetap bergerak aktif atau kontinu, sehingga mengurangi risiko terbentuknya jembatan material (*bridging*) dan saluran sempit (*rat-holing*).



Gambar 2.11 Drawing *Rotary Antiblocking System* PLTU Labuan

Gambar 2.11 menunjukkan konfigurasi dan posisi pemasangan *Rotary Antiblocking System* pada bagian bawah *bunker*. Sistem ini bekerja dengan mekanisme rotasi untuk menjaga pergerakan material batubara agar tidak membentuk gumpalan.

Keterangan :

1. *Transition Bin*
2. *Rotating Blocking Device*
3. *Electric Flashboard door*
4. *Block removing for cool chute*
5. *Inlet chute Coal Feeder*
6. *Control box*

Penerapan sistem *rotary agitator* sebagai teknologi yang cukup menjadi solusi untuk mencegah penyumbatan material granular terbukti mampu meningkatkan *flow rate* hingga 70% dibandingkan kondisi tanpa sistem agitasi

(Putra et al., 2023). Prinsip dasar yang sama diadaptasi dalam desain RAS untuk aplikasi di *Coal bunker* PLTU, dengan tujuan utama meningkatkan efektivitas aliran batubara menuju *Coal Feeder* terus menerus dan mendukung keandalan operasi unit pembangkit. Kondisi aktual pemasangan RAS di lapangan ditunjukkan pada gambar 2.12 di bawah ini. Sistem ini berfungsi sebagai solusi aktif untuk mencegah terjadinya penyumbatan dan menjaga kestabilan suplai batubara menuju *Coal Feeder*.



Gambar 2.12 *Rotary Antiblocking System* PLTU Labuan

a. Prinsip Kerja *Rotary Antiblocking System*

Sistem *Rotary Antiblocking System (RAS)* beroperasi dengan menghasilkan gerakan rotasi perlahan di bagian bawah *Coal bunker*, tepatnya di sekitar lubang keluaran material (*discharge outlet*). Pada sistem ini, poros utama (*shaft*) dilengkapi dengan pisau pemecah (*blade*) yang berputar secara konstan pada kecepatan rendah, umumnya berkisar antara *10–20 rpm*. Putaran tersebut menimbulkan gaya geser (*shear force*) yang bekerja langsung pada material batubara di sekitarnya, sehingga mendorong partikel agar tetap bergerak dan tidak mengalami penggumpalan. Prinsip kerjanya dapat dijelaskan melalui tiga fungsi utama :

- Gerakan rotasi pisau menghasilkan gaya geser yang mampu memisahkan partikel batubara yang menggumpal akibat kelembapan

tinggi. Dengan demikian, material batubara yang semula saling melekat akan kembali terurai dan mudah mengalir di dalam *Coal bunker*.

- Agitasi di area *outlet* membuat material batubara di bagian bawah *bunker* tetap bergerak secara kontinu, sehingga batubara lembap tidak menempel pada dinding *bunker* dan tetap mengalir lancar menuju *Coal Feeder*.
- Putaran poros membantu menyebarkan tekanan beban batubara yang menumpuk di atasnya. Dengan tekanan yang lebih seragam atau sama, potensi terbentuknya jembatan material (*bridging*) dapat diminimalkan bahkan tidak terjadi.

Dari perspektif *mekanika fluida* dan *material granular*, kerja sistem RAS dapat dijelaskan sebagai proses pengurangan gaya kohesi efektif antarpartikel (F_a atau F_c) melalui pergeseran relatif (*shearing motion*) di sekitar dinding bawah *bunker*. Pergeseran ini mengganggu keseimbangan antarbutiran batubara, sehingga material tidak sempat membentuk ikatan antarpartikel yang dapat menyebabkan penyumbatan (*blocking*). Hubungan ini dapat dijelaskan secara sederhana melalui rumus,

$$F_c = k \cdot A_c \cdot \dot{\gamma}^\alpha$$

Keterangan :

- F_c : gaya kohesi antarpartikel (N)
- A_c : luas kontak antarpartikel (m^2)
- $\dot{\gamma}$: laju geser akibat rotasi RAS (s^{-1})
- k, α : Konstanta material ($N/m^2 \cdot s^\alpha$)

Dengan catatan, semakin tinggi laju geser yang dihasilkan oleh rotasi pisau, semakin kecil nilai gaya kohesi antarpartikel (F_c), sehingga material batubara menjadi lebih mudah mengalir saat ditransferkan dari *bunker* ke *Coal Feeder*.

b. Komponen Utama *Rotary Antiblocking System*

Sistem RAS terdiri dari beberapa komponen mekanis yang dirancang agar dapat bekerja pada material atau beban yang keras, salah satunya seperti *Coal bunker*. Komponen utamanya meliputi :

- Motor listrik berkecepatan rendah
- Gearbox reducer sebagai penghasil torsi
- Poros rotasi (*main shaft*)
- Bilah pengaduk (*rotary blades*)
- Bearing dan sistem *seal*
- Panel kontrol dengan proteksi arus dan suhu.

c. Desain dan Konfigurasi Pemasangan *Rotary Antiblocking System* (RAS)

Desain dan konfigurasi *Rotary Antiblocking System* (RAS) pada *Coal bunker* mengacu pada prinsip mekanis yang menghasilkan gaya geser dan rotasi untuk mengurai kohesi material batubara di sekitar *outlet bunker*. Sistem ini beroperasi pada kecepatan putar rendah dengan torsi tinggi untuk mencegah terjadinya *bridging*, *rat-holing*, dan *wall adhesion* yang menghambat aliran batubara menuju *Coal Feeder*. Rotasi pisau pengaduk (*scraper/blades*) secara kontinu menjaga material tetap bergerak aktif dan mencegah terbentuknya zona mati (*dead zone*) di bagian bawah *bunker*.

Secara struktural, satu unit RAS terdiri dari motor listrik, gearbox reducer, poros penggerak (*main shaft*), pisau pengaduk (*rotary blade*), serta sistem *bearing housing*. Motor listrik tiga fasa berfungsi sebagai sumber tenaga utama dengan daya sekitar 0,5–1,0 kW, bergantung pada kebutuhan torsi untuk memutar poros utama. Energi dari motor diteruskan melalui *gearbox reducer* tipe *helical* atau *worm gear* dengan rasio reduksi 40–80:1, menghasilkan kecepatan keluaran dari motor ke gearbox sekitar 10–20 rpm. *Output gearbox* dihubungkan dengan poros penggerak yang memutar *Rotary Blades* di dalam *bunker*. *Rotary Blades* berfungsi memberikan gaya geser di dalam *bunker* terhadap material batubara, dengan luas bidang kerja efektif di area *bunker* bisa disebut $A_b(\text{m}^2)$ dan jari-jari rotasi efektif *bunker* $r(\text{m})$.

2.2.5.1 Prinsip Kerja *Rotary Antiblocking System* (RAS)

Prinsip kerja *Rotary Antiblocking System* (RAS) mengandalkan gaya rotasi mekanis berkecepatan rendah dengan torsi tinggi untuk menghasilkan gaya geser (*shear stress*) yang mengurai kohesi antarpartikel batubara di dalam *Coal bunker*. Sistem ini menjaga aliran batubara tetap kontinu menuju *Coal Feeder*, termasuk pada kondisi batubara berkadar kelembapan tinggi atau mudah menggumpal. RAS mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa rotasi yang bekerja langsung pada zona *outlet bunker* berbentuk kerucut sebelum *Coal Feeder*, sehingga mampu mengatasi *blocking* dan *bridging* akibat kohesi dan adhesi material.

Secara mekanis, RAS terdiri dari motor listrik yang terhubung dengan gearbox *reducer*, poros utama (*main shaft*), dan pisau pengaduk (*rotary blades*) di dalam *bunker*. Saat motor beroperasi, putaran poros menghasilkan gaya tangensial pada *blades* yang menciptakan tegangan geser lokal di area *outlet bunker*. Mekanisme ini menjaga batubara tetap bergerak dan mengalir menuju *Coal Feeder*. Tegangan geser ini dapat dinyatakan dengan hubungan :

$$\tau = \eta \frac{d\omega}{dr}$$

Keterangan :

τ = tegangan geser akibat rotasi (Pa)

η = viskositas efektif material granular (Pa·s)

$\frac{d\omega}{dr}$ = gradien kecepatan sudut terhadap jari-jari pisau (s⁻¹)

Nilai (τ) ini berfungsi untuk menyamakan atau melebihi gaya kohesi material (F_c) yang menyebabkan material menempel dan membentuk penumpukan batubara yang berbentuk jembatan. Berdasarkan model *capillary cohesion*, gaya kohesi antarpartikel batubara yang lembap dapat dinyatakan sebagai :

$$F_c = \pi \cdot \gamma \cdot R \cos \theta_c$$

Keterangan :

- F_c = gaya kohesi antarpartikel (N)
- γ = tegangan permukaan air ($\approx 0,072$ N/m)
- R = jari-jari partikel batubara (m)
- θ_c = sudut kontak antara air dan permukaan partikel.

Apabila gaya geser yang dihasilkan *blades* (F_s) lebih besar dari gaya kohesi (F_c), maka ikatan antarpartikel dapat terurai atau terpisahkan dan aliran material kembali lancar seperti saat batubara tidak lembab. Hubungan antara gaya geser dan luas bidang kerja pisau dapat dijabarkan sebagai :

$$F_s = \tau \times A_b$$

Keterangan :

- F_s = Gaya geser blade (N)
- τ = tegangan geser akibat rotasi (Pa)
- A_b = luas permukaan *blades* (m²)

Dengan *blades* berdiameter efektif r (m), torsi total yang dihasilkan sistem RAS sebagai berikut,

$$T = F_s \times r$$

- T = Torsi (Nm)
- F_s = Gaya geser blade (N)
- R = Diameter Pisau (m)

Torsi inilah yang menjadi parameter utama efektivitas mekanis sistem RAS. Nilai torsi tipikal yang dibutuhkan untuk memecah jembatan material batubara yang terbentuk berkisar antara 200–400 N·m, dengan kecepatan putar 10–20 rpm. Energi mekanik yang dihasilkan oleh sistem RAS berasal dari konversi daya listrik motor menjadi daya rotasi, yang dirumuskan sebagai berikut,

$$P = T \times \omega$$

Keterangan :

- P = Daya mekanik (W)
- T = Torsi (Nm)
- Ω = kecepatan sudut (rad/s).

Sistem RAS yang berada di PLTU Labuan saat ini dengan torsi 250 Nm dan kecepatan 15 rpm setara (1,57 rad/s), sehingga daya yang diperlukan adalah sekitar $P = 392$ W atau 0,4 kW. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem RAS mampu bekerja dengan efisiensi energi tinggi karena hanya memerlukan daya yang relatif kecil untuk mencegah terjadinya *blocking* besar yang dapat menyebabkan *downtime* operasional pada *Coal Feeder* Unit Pembangkit. Selain menghasilkan gaya geser, rotasi *blades* pada RAS juga menimbulkan getaran mikro (*micro-vibration*) yang membantu memutus jembatan air (*capillary bridge*) antarpartikel batubara lembap. Akibatnya, gaya adhesi total yang timbul antara batubara dan dinding *bunker* ($F_{adhesion}$) menurun secara signifikan. Secara teoritis, gaya adhesi ini merupakan hasil penjumlahan dari gaya kontak padat dan gaya kapiler, sebagaimana dinyatakan oleh :

$$F_{Adhesion} = F_{Solid} + F_{Capillary}$$

$F_{capillary}$ berkurang menimbulkan partikel batubara lebih mudah bergerak mengikuti gravitasi ke area *Coal Feeder*, sehingga pola aliran di dalam *bunker* berubah dari *funnel flow* yang mana pola tersebut menjadi mendekati kondisi *mass flow*. Proses kerja ini menyebabkan tekanan vertikal pada material di sekitar *outlet* menjadi lebih seragam dan mengurangi kemungkinan terbentuknya *rat-holing* atau penumpukan material batubara di sisi dinding *bunker*. Dengan demikian, pemasangan RAS mampu mengoptimalkan distribusi gaya normal dan gaya geser di dalam *bunker*, yang secara tidak langsung memperbaiki kontinuitas suplai batubara ke *Coal Feeder* dari *Coal bunker*.

2.3 Perbandingan *Rotary Antiblocking System* (RAS) dengan Teknologi Antiblokade Lain

Penelitian ini membandingkan teknologi RAS dengan Teknologi lain dalam industri yang menangani material granular seperti batubara, semen, mineral, dan agroindustri. Berbagai metode digunakan untuk mengatasi masalah *bridging*, *ratholing*, dan ketidakstabilan aliran material pada *bunker* atau silo. Beberapa teknologi yang umum digunakan meliputi *Rotary Antiblocking System* (RAS), sistem vibrasi, dan *air cannon*. Setiap teknologi memiliki karakteristik kerja, keunggulan, dan keterbatasan tertentu sehingga pemilihannya bergantung pada sifat material, kondisi operasi, dan kebutuhan keandalan sistem. Berikut Perbandingan Teknologi Antiblokade Material :

Tabel 2.1 Perbandingan Parameter Teknologi Antiblokade Material

Parameter	RAS	Vibrasi	Air Cannon
Cara Kerja	Rotasi mekanis kontinu	Getaran dinding silo	Impuls udara bertekanan
Efektivitas pada batubara lembap	Sangat Baik	Rendah (cenderung memadatkan)	Sedang
Efektivitas jangka panjang	Stabil	Menurun seiring keausan dinding	Bergantung tekanan & siklus
Dampak pada struktur	Rendah	Tinggi (risiko retak/lelah)	Rendah
Kontinuitas aliran	Sangat stabil	Fluktuatif	Tergantung siklus tembakan

2.4 Ringkasan Tinjauan Pustaka

Berdasarkan kajian literatur, dapat disimpulkan bahwa penyumbatan batubara pada *bunker* merupakan salah satu gangguan signifikan dalam sistem penanganan batubara PLTU. Fenomena tersebut dipengaruhi oleh karakteristik material, desain geometri *bunker*, dan kondisi lingkungan. Solusi berbasis perbaikan desain *bunker* atau metode pembersihan periodik belum cukup efektif untuk mengatasi *blocking* yang terjadi secara terus-menerus.

Penelitian terdahulu cenderung memunculkan kebutuhan akan sistem mekanis aktif seperti *Rotary Antiblocking System* (RAS), yang bekerja langsung pada zona kritis di *outlet bunker*. Hal inilah yang menjadi dasar penelitian ini dalam mengevaluasi efektivitas penerapan RAS sebagai solusi peningkatan keandalan *Coal Handling* di PLTU Banten 2 Labuan.