

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1. Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang paling banyak digunakan di Indonesia karena memiliki kapasitas besar dan mampu beroperasi secara kontinu dalam memenuhi kebutuhan energi listrik. PLTU bekerja dengan memanfaatkan energi panas hasil pembakaran bahan bakar, umumnya batu bara, untuk menghasilkan uap air bertekanan dan bertemperatur tinggi. Uap tersebut digunakan untuk memutar turbin yang terhubung dengan generator sehingga menghasilkan energi listrik.



Gambar 2. 1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

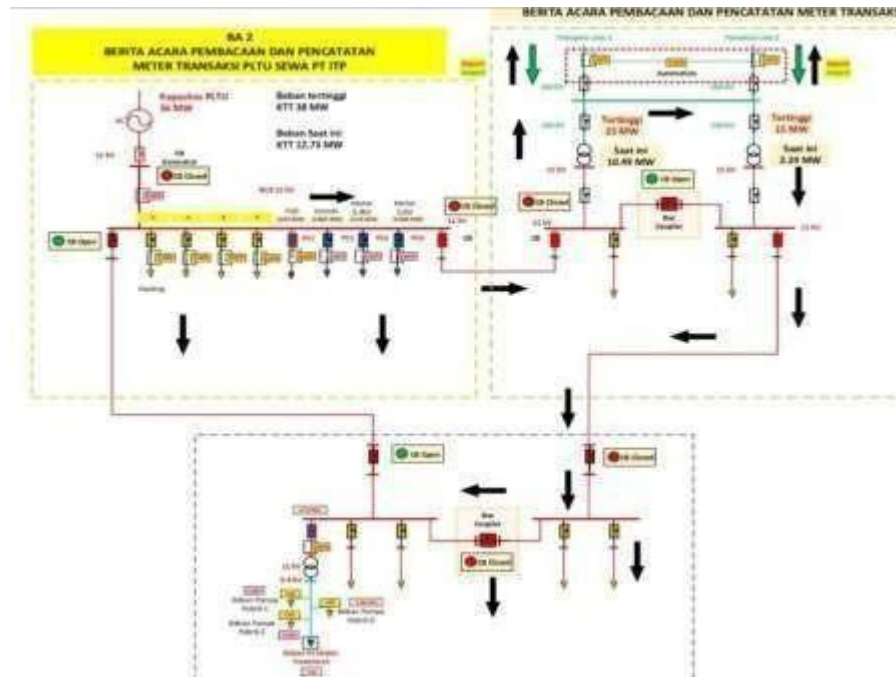
(Sumber : <https://web.pln.co.id/cms/media/siaran-pers/2020/02/gunakan-teknologi-ultra-super-critical-pltu-jawa-7-lebih-efisien-dan-ramah-lingkungan/>)

Secara umum, prinsip kerja PLTU mengikuti siklus Rankine yang terdiri dari empat

tahapan utama, yaitu proses pemanasan air pada boiler, ekspansi uap pada turbin, kondensasi uap pada kondensor, serta pemompaan kembali air menuju boiler. Pada tahap pemanasan, batu bara dibakar di dalam ruang bakar untuk menghasilkan energi panas yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap. Uap bertekanan tinggi kemudian dialirkan ke turbin untuk memutar poros turbin dan menghasilkan energi mekanik. Energi mekanik tersebut selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik melalui generator. Setelah melewati turbin, uap dikondensasikan kembali menjadi air dan dipompa menuju boiler sehingga siklus dapat berlangsung secara berulang.

Efisiensi pembangkitan listrik pada PLTU sangat dipengaruhi oleh kualitas batu bara yang digunakan. Parameter utama yang mempengaruhi kualitas batu bara antara lain nilai kalor (calorific value), kadar abu (ash content), kadar air (moisture), dan kandungan sulfur. Batu bara dengan nilai kalor rendah akan menghasilkan energi panas yang lebih kecil sehingga meningkatkan konsumsi bahan bakar. Selain itu, kadar abu yang tinggi dapat menyebabkan fouling dan slagging pada boiler, yang berdampak pada penurunan efisiensi serta peningkatan frekuensi perawatan. Variasi kualitas batu bara juga dapat menyebabkan fluktuasi pembakaran dan ketidakstabilan daya keluaran pembangkit.

Oleh karena itu, pengendalian kualitas bahan bakar melalui proses pencampuran atau blending menjadi salah satu strategi penting dalam operasi PLTU. Dengan melakukan blending, kualitas batu bara dapat disesuaikan dengan spesifikasi yang dibutuhkan oleh boiler, sehingga kestabilan pembakaran, efisiensi energi, serta keandalan sistem pembangkitan dapat ditingkatkan.



Gambar 2. 2 Flow Diagram Transaksi PLTU Sewa ITP

(Sumber : Dokumentasi Pribadi, Desember 2025)

Flow diagram tersebut menunjukkan alur pembangkitan dan penyaluran energi listrik pada PLTU Sewa ITP Tarjun. Proses diawali dari generator yang menghasilkan energi listrik dengan kapasitas tertentu sesuai kebutuhan beban. Energi listrik yang dihasilkan kemudian disalurkan ke bus utama 11 kV yang berfungsi sebagai pusat distribusi daya. Dari bus tersebut, daya didistribusikan ke berbagai feeder untuk memenuhi kebutuhan beban internal pembangkit seperti pompa, sistem pendingin, serta peralatan bantu lainnya yang mendukung proses operasi PLTU. Selain itu, daya juga dapat disalurkan ke sistem interkoneksi melalui transformator step-up yang menaikkan tegangan dari 11 kV menjadi 150 kV agar dapat ditransmisikan ke jaringan tenaga listrik.

Diagram tersebut juga menunjukkan bahwa sistem PLTU Sewa ITP Tarjun terhubung dengan jaringan transmisi melalui dua jalur utama, sehingga memungkinkan proses ekspor maupun impor daya sesuai kondisi operasi pembangkit. Pada saat pembangkit menghasilkan daya lebih, energi listrik dapat disalurkan ke sistem jaringan, sedangkan pada kondisi kekurangan daya, sistem dapat menerima suplai dari jaringan interkoneksi. Keberadaan bus coupler dalam sistem berfungsi untuk meningkatkan keandalan dan fleksibilitas operasi, karena memungkinkan pengalihan beban dan menjaga kontinuitas suplai apabila terjadi gangguan pada

salah satu jalur. Dengan adanya sistem monitoring dan pengendalian tersebut, operator dapat memantau kondisi tegangan, arus, serta status peralatan secara real time, sehingga kestabilan operasi pembangkit dan distribusi daya dapat terjaga dengan baik.

2.1.2. Coal Feeder

Coal feeder merupakan salah satu peralatan penting dalam sistem pengumpanan bahan bakar pada PLTU. Peralatan ini berfungsi untuk mengatur laju aliran batu bara dari coal bunker menuju pulverizer atau langsung ke ruang bakar boiler. Stabilitas aliran bahan bakar sangat berpengaruh terhadap kestabilan proses pembakaran dan efisiensi pembangkitan listrik.

Secara umum, coal feeder diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu volumetric feeder dan gravimetric feeder. Volumetric feeder mengatur aliran batu bara berdasarkan volume material tanpa mempertimbangkan perubahan densitas material. Sistem ini memiliki kelemahan karena perubahan densitas batu bara dapat menyebabkan ketidakakuratan dalam laju aliran. Sebaliknya, gravimetric feeder mengatur aliran berdasarkan massa batu bara menggunakan sensor berat seperti load cell atau belt scale. Oleh karena itu, gravimetric feeder memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi dan banyak digunakan pada sistem pembangkit modern.

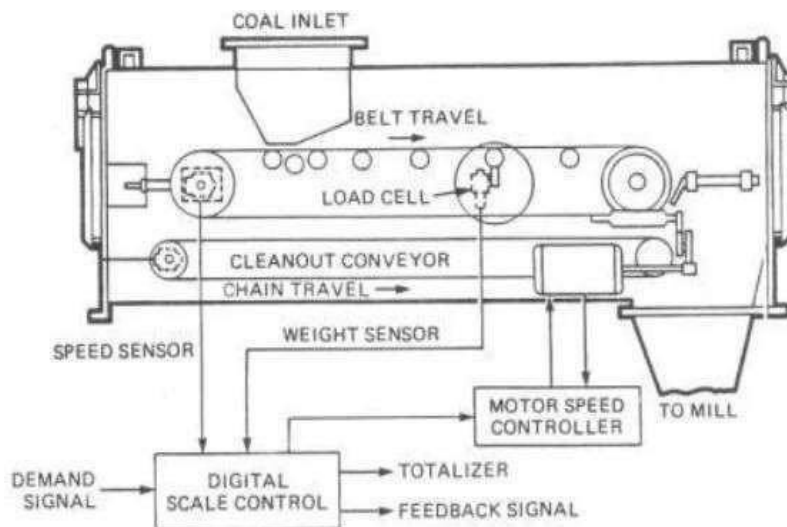
Komponen utama coal feeder meliputi hopper sebagai tempat penampungan sementara batu bara, belt conveyor sebagai media transportasi, motor penggerak, sensor berat, sensor kecepatan belt, serta sistem pengendali. Load cell digunakan untuk mengukur berat batu bara yang berada pada belt conveyor, sedangkan sensor kecepatan belt digunakan untuk menentukan kecepatan aliran material. Data dari kedua sensor tersebut digunakan untuk menghitung laju aliran massa batu bara secara real time.

Dalam sistem operasi PLTU, coal feeder harus mampu merespon perubahan beban pembangkit dengan cepat dan akurat. Ketidaktepatan pengaturan aliran bahan bakar dapat menyebabkan ketidakstabilan pembakaran, peningkatan emisi, serta penurunan efisiensi. Oleh karena itu, penerapan sistem kendali otomatis pada coal feeder menjadi sangat penting untuk menjaga stabilitas suplai bahan bakar dan kualitas pembakaran.



Gambar 2. 3 Coal Feeder PLTU Sewa ITP Tarjun

(Sumber : Pribadi, Desember 2025)



Gambar 2. 4 Komponen Coal Feeder

Berdasarkan Gambar 2.3 dan Gambar 2.4, coal feeder terdiri dari beberapa komponen utama yaitu hopper sebagai penampung sementara batu bara, belt conveyor sebagai media pengangkut, motor penggerak, load cell, speed sensor, serta motor speed controller. Batu bara dari coal bunker terlebih dahulu masuk ke hopper, kemudian dialirkan melalui belt conveyor menuju pulverizer atau mill untuk proses penggilingan sebelum pembakaran.

Load cell yang terpasang pada sistem berfungsi untuk mendeteksi berat material yang berada di atas belt conveyor, sedangkan speed sensor digunakan untuk membaca kecepatan pergerakan belt. Kedua sensor tersebut memberikan sinyal umpan balik ke sistem pengendali

sehingga laju aliran batu bara dapat dipantau secara terus-menerus.

Sinyal dari sensor kemudian diproses oleh sistem kendali berbasis PLC untuk dibandingkan dengan nilai set point yang telah ditentukan. Apabila terjadi penyimpangan, PLC akan mengirimkan perintah koreksi ke pengendali kecepatan motor sehingga suplai batu bara tetap stabil dan sesuai kebutuhan pembakaran. Dengan mekanisme ini, coal feeder tidak hanya berfungsi sebagai alat pengumpan bahan bakar, tetapi juga sebagai bagian dari sistem kendali otomatis yang menjaga kestabilan dan efisiensi operasi pembangkit.

2.1.3. Programmable Logic Controller (PLC)

Programmable Logic Controller (PLC) merupakan perangkat elektronik yang dirancang untuk mengendalikan proses otomatisasi industri secara fleksibel dan andal. PLC bekerja dengan membaca sinyal input dari sensor, memproses data berdasarkan program logika yang telah ditentukan, kemudian menghasilkan sinyal output untuk mengendalikan aktuator seperti motor, inverter, katup, dan peralatan lainnya.\



Gambar 2. 5 PLC

(Sumber : <https://industrial.omron.co.uk/en/products/programmable-logic-controllers>)

Pada sistem coal feeder, PLC berfungsi sebagai pengendali utama yang mengatur kecepatan motor feeder berdasarkan data dari load cell dan sensor kecepatan belt. PLC akan membandingkan nilai aktual dengan nilai setpoint rasio blending yang telah ditentukan. Jika terjadi deviasi, PLC akan memberikan sinyal koreksi kepada inverter untuk menyesuaikan kecepatan motor sehingga rasio pencampuran tetap stabil.

Selain itu, PLC juga memungkinkan integrasi dengan sistem Human Machine Interface (HMI) dan Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) untuk monitoring dan

pengendalian secara real time. Operator dapat mengatur setpoint, memantau aliran batu bara, serta mengetahui kondisi sistem melalui tampilan visual. Dengan sistem ini, ketergantungan terhadap pengaturan manual dapat dikurangi dan keandalan sistem meningkat.

Keunggulan PLC antara lain memiliki respon cepat, fleksibilitas tinggi, tahan terhadap lingkungan industri, serta mudah dikembangkan sesuai kebutuhan. Oleh karena itu, PLC menjadi pilihan utama dalam sistem otomasi industri, termasuk pada pengendalian coal feeder di PLTU.

2.1.4. Sistem Pengumpanan Batu Bara (*Fuel Feeding System*)

Kualitas batu bara merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi performa, efisiensi, dan keandalan operasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Parameter kualitas batu bara yang penting antara lain nilai kalor (calorific value), kadar abu (ash content), kadar air (moisture), kandungan sulfur, serta ukuran partikel batu bara. Nilai kalor menentukan jumlah energi panas yang dihasilkan selama proses pembakaran, sehingga batu bara dengan nilai kalor rendah akan menghasilkan energi panas yang lebih kecil. Kondisi ini menyebabkan kebutuhan konsumsi bahan bakar meningkat untuk menghasilkan daya listrik yang sama, sehingga berdampak pada meningkatnya biaya operasional dan menurunnya efisiensi pembangkitan.



Gambar 2. 6 Pembongkaran Batu Bara Dari Jetty

(Sumber : Pribadi, Desember 2025)

Selain itu, kadar abu yang tinggi dapat menyebabkan terbentuknya deposit pada permukaan perpindahan panas di dalam boiler, yang dikenal sebagai fouling dan slagging. Kondisi tersebut dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas, meningkatkan temperatur gas buang, serta mempercepat kerusakan komponen boiler. Akibatnya, frekuensi pemeliharaan meningkat dan dapat mengganggu kontinuitas operasi pembangkit. Kandungan sulfur yang tinggi juga berpotensi menyebabkan korosi pada peralatan serta meningkatkan emisi gas buang yang berdampak terhadap lingkungan.

Kadar air yang tinggi pada batu bara juga berpengaruh terhadap efisiensi pembakaran, karena sebagian energi panas digunakan untuk menguapkan air yang terkandung dalam bahan bakar. Hal ini menyebabkan temperatur pembakaran menurun dan proses pembentukan uap menjadi kurang optimal. Selain itu, ukuran partikel batu bara yang tidak seragam dapat mempengaruhi proses penggilingan pada pulverizer dan kestabilan pembakaran di dalam furnace.

Variasi kualitas batu bara yang tidak terkendali dapat menyebabkan fluktuasi temperatur furnace, tekanan uap, dan daya keluaran pembangkit. Kondisi ini berpotensi menurunkan keandalan sistem serta meningkatkan risiko trip pada pembangkit. Oleh karena itu, pengendalian kualitas batu bara melalui proses blending sangat diperlukan untuk menjaga kestabilan pembakaran, meningkatkan efisiensi energi, serta memperpanjang umur peralatan pembangkit. Dengan kualitas campuran yang stabil, proses pembakaran dapat berlangsung secara optimal sehingga performa dan keandalan PLTU dapat ditingkatkan secara keseluruhan.

2.1.5. Gravimetric Coal Feeder

Gravimetric coal feeder merupakan jenis coal feeder yang mengatur laju aliran batu bara berdasarkan massa material secara langsung. Sistem ini menggunakan sensor berat seperti load cell untuk mengukur berat batu bara yang berada pada belt conveyor. Data berat tersebut kemudian dikombinasikan dengan kecepatan belt conveyor untuk menghitung laju aliran massa batu bara dalam satuan ton per jam (TPH). Penggunaan sistem gravimetric memberikan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan volumetric feeder karena mampu mengkompensasi perubahan densitas, ukuran partikel, serta kadar air batu bara.



Gambar 2. 7 Gravimetric coal feeder

(Sumber : <https://www.google.com/search?q=2.1.5.%09Gravimetric+Coal+FeederI>)

Pada PLTU modern, gravimetric feeder banyak digunakan karena kestabilan dan akurasi pengumpanan bahan bakar sangat berpengaruh terhadap efisiensi pembakaran dan performa boiler. Apabila densitas batu bara berubah akibat variasi kualitas dari pemasok, sistem gravimetric tetap mampu menjaga kestabilan laju aliran karena pengendalian dilakukan berdasarkan massa aktual, bukan volume. Hal ini sangat penting dalam proses blending batu bara yang membutuhkan rasio pencampuran yang akurat.

Selain itu, gravimetric feeder juga dilengkapi dengan sistem kalibrasi untuk menjaga akurasi sensor load cell. Kalibrasi dilakukan secara berkala agar kesalahan pengukuran dapat diminimalkan. Akurasi yang tinggi akan menghasilkan kestabilan pembakaran dan menurunkan fluktuasi operasi pembangkit.

2.1.6. Perhitungan Laju Aliran Batu Bara (Ton Per Hour)

Laju aliran batu bara merupakan parameter penting dalam pengendalian coal feeder karena menentukan jumlah bahan bakar yang masuk ke boiler. Perhitungan laju aliran dilakukan berdasarkan berat material dan kecepatan belt conveyor. Secara umum, laju aliran massa batu bara dapat dihitung dengan mengalikan berat batu bara per satuan panjang belt dengan kecepatan belt conveyor.

Parameter utama yang digunakan dalam perhitungan meliputi:

1. Berat batu bara pada belt conveyor yang diukur oleh load cell.
2. Kecepatan belt conveyor yang diukur oleh speed sensor.
3. Lebar belt conveyor dan densitas material.

Dengan mengetahui laju aliran massa secara real time, sistem kendali dapat menyesuaikan suplai bahan bakar sesuai kebutuhan pembakaran. Pengendalian laju aliran yang stabil akan menjaga temperatur furnace, tekanan uap, serta daya keluaran pembangkit tetap stabil. Hal ini berpengaruh langsung terhadap efisiensi dan keandalan operasi PLTU.

2.1.7. Sistem Blending Otomatis Berbasis PLC

Blending batu bara secara otomatis merupakan metode pencampuran bahan bakar menggunakan sistem kendali berbasis PLC untuk mengatur rasio pencampuran secara real time. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan dua atau lebih coal feeder yang mengalirkan batu bara dengan kualitas berbeda. PLC akan mengatur kecepatan masing-masing feeder berdasarkan setpoint rasio pencampuran yang telah ditentukan.

Proses blending otomatis dilakukan berdasarkan nilai kalor, kadar abu, dan parameter kualitas lainnya. Sensor load cell memberikan data laju aliran masing-masing feeder, kemudian PLC membandingkan nilai aktual dengan setpoint. Apabila terjadi penyimpangan, PLC akan memberikan sinyal koreksi kepada inverter untuk menyesuaikan kecepatan motor feeder.

Keunggulan sistem blending otomatis antara lain:

1. Meningkatkan akurasi rasio pencampuran.
2. Mengurangi kesalahan operator.
3. Meningkatkan kestabilan pembakaran.
4. Mengoptimalkan efisiensi bahan bakar.
5. Menjaga kualitas campuran sesuai standar boiler.

Dengan sistem ini, kualitas bahan bakar yang masuk ke boiler menjadi lebih stabil sehingga operasi pembangkit lebih efisien dan andal.

2.1.8. Hubungan Coal Feeder dengan Efisiensi dan Heat Rate

Efisiensi pembangkitan listrik sangat dipengaruhi oleh kestabilan suplai bahan bakar. Coal feeder yang tidak stabil dapat menyebabkan fluktuasi pembakaran, peningkatan konsumsi bahan bakar, serta penurunan efisiensi pembangkitan. Salah satu indikator efisiensi adalah heat rate, yaitu jumlah energi bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan energi listrik.

Penggunaan sistem kendali otomatis pada coal feeder dapat menurunkan heat rate karena kualitas campuran bahan bakar lebih stabil. Dengan pengendalian rasio blending yang tepat, pembakaran menjadi lebih efisien, temperatur furnace lebih stabil, serta kehilangan energi dapat

diminimalkan. Hal ini berdampak pada pengurangan konsumsi batu bara dan peningkatan performa pembangkit.

Selain itu, kestabilan suplai bahan bakar juga mengurangi tekanan termal pada peralatan seperti boiler dan pulverizer. Dengan demikian, umur peralatan menjadi lebih panjang dan biaya pemeliharaan dapat ditekan. Oleh karena itu, optimalisasi coal feeder merupakan salah satu strategi penting dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan PLTU.

2.1.9. Sistem Kendali Closed Loop pada Coal Feeder

Sistem kendali closed loop merupakan metode pengendalian yang menggunakan umpan balik (feedback) untuk menjaga variabel proses sesuai dengan nilai referensi atau setpoint. Pada sistem ini, nilai aktual yang diukur oleh sensor akan dibandingkan dengan nilai setpoint. Jika terjadi penyimpangan, sistem akan melakukan koreksi secara otomatis untuk mengurangi error.

Pada sistem coal feeder, metode closed loop digunakan untuk menjaga kestabilan laju aliran batu bara dan rasio pencampuran. Sensor load cell berfungsi sebagai pengukur massa aktual batu bara yang berada pada belt conveyor, sedangkan sensor kecepatan belt digunakan untuk menentukan laju aliran. Data tersebut kemudian diproses oleh PLC untuk dibandingkan dengan setpoint blending yang telah ditentukan.

Apabila terjadi deviasi akibat perubahan densitas batu bara, variasi ukuran partikel, atau perubahan beban boiler, sistem kendali akan memberikan sinyal koreksi kepada inverter untuk menyesuaikan kecepatan motor feeder. Dengan demikian, suplai bahan bakar tetap stabil dan pembakaran dapat berlangsung optimal.

Penggunaan sistem closed loop memiliki keunggulan dibandingkan sistem open loop, yaitu mampu mengoreksi gangguan secara real time, meningkatkan akurasi, serta menjaga stabilitas operasi pembangkit.

2.1.10. Metode Kendali PID pada Coal Feeder

Metode Proportional Integral Derivative (PID) merupakan salah satu metode kendali yang paling banyak digunakan dalam sistem industri, termasuk pada sistem pengumpanan bahan bakar. Kendali PID bertujuan mengurangi error antara nilai aktual dan setpoint dengan mempertimbangkan respon sistem secara dinamis.

Komponen Proportional berfungsi memberikan respon langsung terhadap error, sehingga sistem mampu merespon perubahan secara cepat. Komponen Integral berfungsi

mengurangi error secara kumulatif agar nilai steady state mendekati setpoint. Sedangkan komponen Derivative berfungsi meredam overshoot dan meningkatkan kestabilan sistem.

Pada sistem coal feeder, kendali PID digunakan untuk mengatur kecepatan motor berdasarkan sinyal dari sensor load cell dan sensor kecepatan belt. Dengan tuning parameter PID yang tepat, sistem mampu menjaga kestabilan laju aliran batu bara, mengurangi fluktuasi pembakaran, serta meningkatkan efisiensi operasi pembangkit.

Penerapan kendali PID berbasis PLC juga memungkinkan sistem lebih fleksibel, mudah dikembangkan, serta terintegrasi dengan HMI dan SCADA.

2.1.11. Sistem Monitoring dan SCADA pada Coal Feeder

Sistem Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) merupakan bagian penting dalam sistem otomasi industri modern yang berfungsi untuk melakukan monitoring, pengawasan, dan pengendalian proses secara terpusat. Dalam sistem coal feeder berbasis PLC, SCADA digunakan untuk memantau parameter operasional seperti laju aliran batu bara, rasio pencampuran, kecepatan motor feeder, status inverter, serta kondisi sensor load cell dan speed sensor secara real time. Dengan adanya sistem ini, operator dapat mengetahui kondisi sistem secara menyeluruh tanpa harus melakukan pengawasan langsung di lapangan.

Pada proses pencampuran batu bara, kestabilan rasio blending dan total flow sangat menentukan kualitas pembakaran. Oleh karena itu, sistem SCADA memiliki peran penting dalam memastikan bahwa nilai setpoint yang telah ditentukan dapat tercapai. Operator dapat melakukan pengaturan setpoint rasio pencampuran, batas toleransi error, serta parameter kontrol lainnya melalui tampilan Human Machine Interface (HMI) yang terintegrasi dengan PLC. Selain itu, sistem ini juga mampu menampilkan grafik trend data historis sehingga perubahan kualitas batu bara, fluktuasi aliran, serta respon sistem terhadap gangguan dapat dianalisis secara lebih akurat.

Sistem SCADA juga berfungsi sebagai sistem alarm dan proteksi. Apabila terjadi gangguan seperti sensor error, overload motor, atau deviasi laju aliran yang melebihi batas toleransi, sistem akan memberikan peringatan secara otomatis. Hal ini memungkinkan operator untuk mengambil tindakan koreksi dengan cepat sehingga gangguan operasi dapat diminimalkan. Selain itu, penyimpanan data operasional secara historis memungkinkan analisis performa sistem dalam jangka panjang, termasuk evaluasi efisiensi blending, konsumsi bahan

bakar, serta stabilitas pembakaran.

Integrasi PLC dan SCADA pada sistem coal feeder memberikan keunggulan dalam meningkatkan keandalan operasi pembangkit, mengurangi kesalahan operator, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Dengan demikian, sistem monitoring dan SCADA menjadi salah satu komponen penting dalam optimalisasi proses pencampuran batu bara berbasis otomatisasi.

2.1.12. Stabilitas Sistem Pembakaran dan Dampak Blending Otomatis

Stabilitas pembakaran merupakan faktor utama dalam menjaga performa dan efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Proses pembakaran yang stabil akan menghasilkan temperatur furnace yang konstan, tekanan uap yang stabil, serta daya keluaran generator yang sesuai dengan kebutuhan sistem. Sebaliknya, fluktuasi kualitas bahan bakar dapat menyebabkan perubahan temperatur dan tekanan secara mendadak, sehingga berpotensi menimbulkan gangguan operasi bahkan trip pembangkit.

Salah satu penyebab utama ketidakstabilan pembakaran adalah variasi kualitas batu bara yang digunakan. Batu bara dari berbagai pemasok memiliki karakteristik berbeda seperti nilai kalor, kadar air, kadar abu, dan ukuran partikel. Apabila rasio pencampuran tidak terkontrol dengan baik, maka kualitas campuran akan berubah-ubah sehingga pembakaran menjadi tidak optimal. Hal ini dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar, menurunkan efisiensi boiler, serta meningkatkan emisi gas buang.

Penerapan sistem kendali coal feeder berbasis PLC pada proses blending memberikan solusi dalam menjaga stabilitas pembakaran. Sistem ini mampu mengatur rasio pencampuran secara otomatis berdasarkan setpoint yang telah ditentukan. Sensor load cell memberikan umpan balik terhadap laju aliran masing-masing jenis batu bara, sehingga PLC dapat melakukan koreksi secara real time. Dengan metode ini, kualitas campuran bahan bakar menjadi lebih stabil, temperatur furnace lebih terkendali, dan tekanan uap lebih konstan.

Selain itu, blending otomatis juga berpengaruh terhadap pengurangan fluktuasi beban pada sistem pembangkitan. Respon sistem menjadi lebih cepat terhadap perubahan kebutuhan energi, sehingga kestabilan daya keluaran generator dapat terjaga. Dengan demikian, penerapan sistem blending otomatis berbasis PLC tidak hanya meningkatkan efisiensi pembakaran, tetapi juga meningkatkan keandalan dan kontinuitas operasi PLTU secara keseluruhan.

2.1.13. Peran Sensor dalam Sistem Kendali Coal Feeder

Sensor merupakan komponen penting dalam sistem kendali coal feeder karena berfungsi sebagai sumber data utama dalam proses pengendalian. Pada sistem ini, sensor yang digunakan meliputi load cell, belt scale, speed sensor, dan level sensor. Sensor tersebut memberikan informasi mengenai berat batu bara, kecepatan belt conveyor, serta level material pada bunker.



Gambar 2. 8 Load Cell

Data yang diperoleh dari sensor akan dikirimkan ke PLC untuk diproses sebagai umpan balik (feedback). Informasi ini digunakan untuk menentukan apakah laju aliran batu bara telah sesuai dengan setpoint atau masih terjadi deviasi. Dengan adanya sensor yang akurat dan stabil, sistem kendali dapat bekerja secara optimal.

Peran sensor dalam sistem coal feeder antara lain:

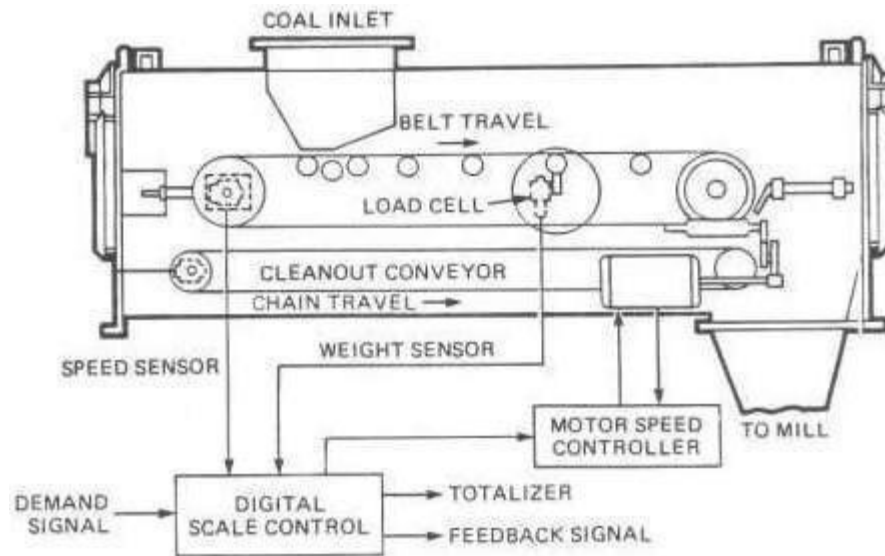
- Mengukur berat dan laju aliran batu bara secara real time.
- Memberikan data untuk pengendalian rasio pencampuran.
- Mendeteksi gangguan seperti belt slip atau ketidakseimbangan aliran.
- Mendukung kestabilan suplai bahan bakar.

Keakuratan sensor sangat berpengaruh terhadap kualitas pencampuran batu bara. Oleh karena itu, kalibrasi dan perawatan sensor menjadi hal penting dalam menjaga performa sistem.

2.1.14. Integrasi PLC, Sensor, dan Inverter dalam Sistem Coal Feeder

Sistem coal feeder modern menggunakan integrasi antara PLC, sensor, dan inverter untuk menciptakan sistem kendali otomatis yang stabil dan efisien. PLC berfungsi sebagai pengendali utama yang menerima data dari sensor, kemudian memproses data tersebut

berdasarkan logika kontrol yang telah diprogram.



Gambar 2. 9 Bagian bagian Pada Coal Feeder

(Sumber : <https://instrumentasipembangkit.wordpress.com/2017/02/07/equipment-pltu-coal-feeder/>)

Selanjutnya, PLC mengirimkan sinyal kendali ke inverter (VFD) untuk mengatur kecepatan motor feeder. Dengan perubahan frekuensi dan tegangan, inverter mampu mengontrol laju aliran batu bara sesuai kebutuhan pembakaran.

Integrasi sistem ini memberikan beberapa keuntungan, antara lain:

- Respon cepat terhadap perubahan kualitas batu bara.
- Stabilitas suplai bahan bakar yang lebih baik.
- Pengurangan kesalahan operator.
- Peningkatan efisiensi energi.
- Kemudahan monitoring dan kontrol jarak jauh.

Sistem ini juga mendukung konsep otomatisasi industri yang mengutamakan akurasi, kecepatan, dan keandalan.

2.1.15. Pengaruh Sistem Kendali terhadap Kinerja Coal Feeder

Penerapan sistem kendali otomatis pada coal feeder memberikan dampak signifikan terhadap kinerja sistem pengumpanan bahan bakar. Dengan pengaturan laju aliran yang stabil, kualitas campuran batu bara menjadi lebih konsisten.

Hal ini berdampak pada:

- Stabilitas pembakaran yang lebih baik.
- Penurunan fluktuasi temperatur furnace.
- Pengurangan konsumsi bahan bakar.
- Penurunan emisi gas buang.
- Peningkatan efisiensi boiler.



Gambar 2. 10 Pemutus Pengumpan Batu Bara

(Sumber : <https://www.excteng.com/id/plc-control-system-of-coal-feeder-breaker/>)

Selain itu, sistem kendali otomatis juga mampu meningkatkan fleksibilitas operasi pembangkit. Sistem dapat menyesuaikan suplai bahan bakar terhadap perubahan beban secara real time, sehingga operasi menjadi lebih optimal.

2.1.16. Analisis Kinerja Sistem Coal Feeder

Analisis kinerja sistem coal feeder dilakukan untuk mengetahui tingkat efektivitas sistem kendali dalam menjaga kestabilan pencampuran batu bara. Parameter yang digunakan dalam analisis antara lain:

- Stabilitas rasio blending.
- Laju aliran batu bara.

-
- The screenshot shows the INDOCEMENT software interface. The top menu bar includes 'INDOCENT', 'HELP', 'FILE', 'EDIT', 'VIEW', 'SIMULATION', 'REPORT', 'PLOT', 'HELP'. The toolbar contains icons for file operations, simulation control, and data management. The main area displays a 3D model of industrial equipment and piping. The equipment is labeled with 'TUNDRER 7/6' and 'TUNDRER 7/6'. The piping is color-coded (red, blue, green) and labeled with flow rates and pressures. The interface also shows a 'PD FAN' section on the right and a 'TUNDRER 7/6' section at the bottom. The bottom status bar displays various numerical values.

Data operasional sebelum dan sesudah penerapan sistem kendali dibandingkan untuk mengetahui peningkatan performa. Analisis ini penting untuk memastikan bahwa sistem yang diterapkan memberikan manfaat nyata terhadap operasi pembangkit.

[illegible]

(Sumber : [https://id.linkedin.com/pulse/siklus-dalam-pltu-coal-power-plant-utility-boiler-didit-](https://id.linkedin.com/pulse/siklus-dalam-pltu-coal-power-plant-utility-boiler-didit)

prasetyo-budi)

Optimalisasi operasi PLTU dapat dilakukan melalui peningkatan stabilitas suplai bahan bakar dan kualitas pencampuran batu bara. Sistem coal feeder berbasis PLC berperan dalam menjaga kualitas bahan bakar sesuai kebutuhan pembakaran.

Dengan kualitas bahan bakar yang stabil, proses pembangkitan menjadi lebih efisien, konsumsi energi berkurang, serta keandalan pembangkit meningkat. Selain itu, sistem ini juga mendukung pengurangan biaya operasional dan peningkatan produktivitas.

Oleh karena itu, penerapan sistem kendali coal feeder berbasis PLC menjadi salah satu strategi penting dalam modernisasi pembangkit listrik dan peningkatan efisiensi energi.

2.1.18. Pengaruh Variasi Kualitas Batu Bara terhadap Kinerja Boiler



Gambar 2. 13 Pembangkitan Batu Bara

Variasi kualitas batu bara merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi kinerja boiler dan stabilitas pembakaran pada PLTU. Parameter utama seperti nilai kalor, kadar abu, kadar air, serta ukuran partikel batu bara berperan langsung dalam menentukan efisiensi proses pembakaran. Batu bara dengan nilai kalor rendah akan menghasilkan energi panas yang

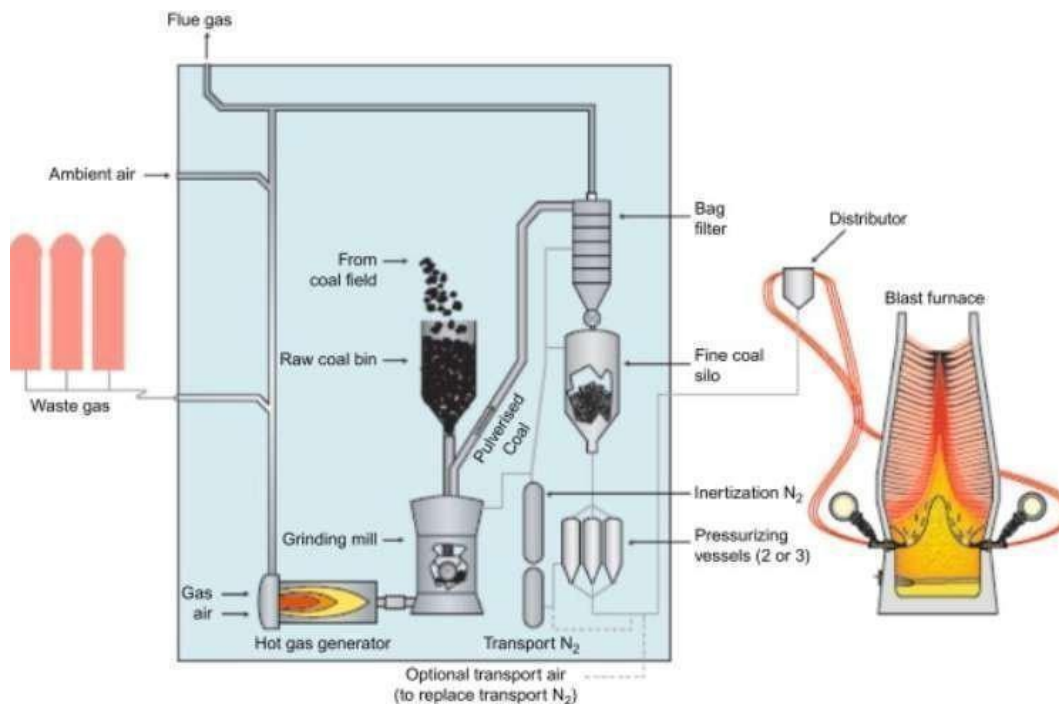
lebih kecil sehingga membutuhkan konsumsi bahan bakar lebih banyak untuk menghasilkan daya listrik yang sama. Hal ini dapat meningkatkan biaya operasional dan menurunkan efisiensi pembangkitan.

Selain itu, kadar abu yang tinggi dapat menyebabkan fouling dan slagging pada permukaan perpindahan panas boiler. Kondisi ini menghambat transfer panas, meningkatkan temperatur gas buang, serta mempercepat kerusakan komponen boiler. Variasi kadar air juga berpengaruh terhadap efisiensi pembakaran karena sebagian energi digunakan untuk menguapkan kandungan air dalam batu bara.

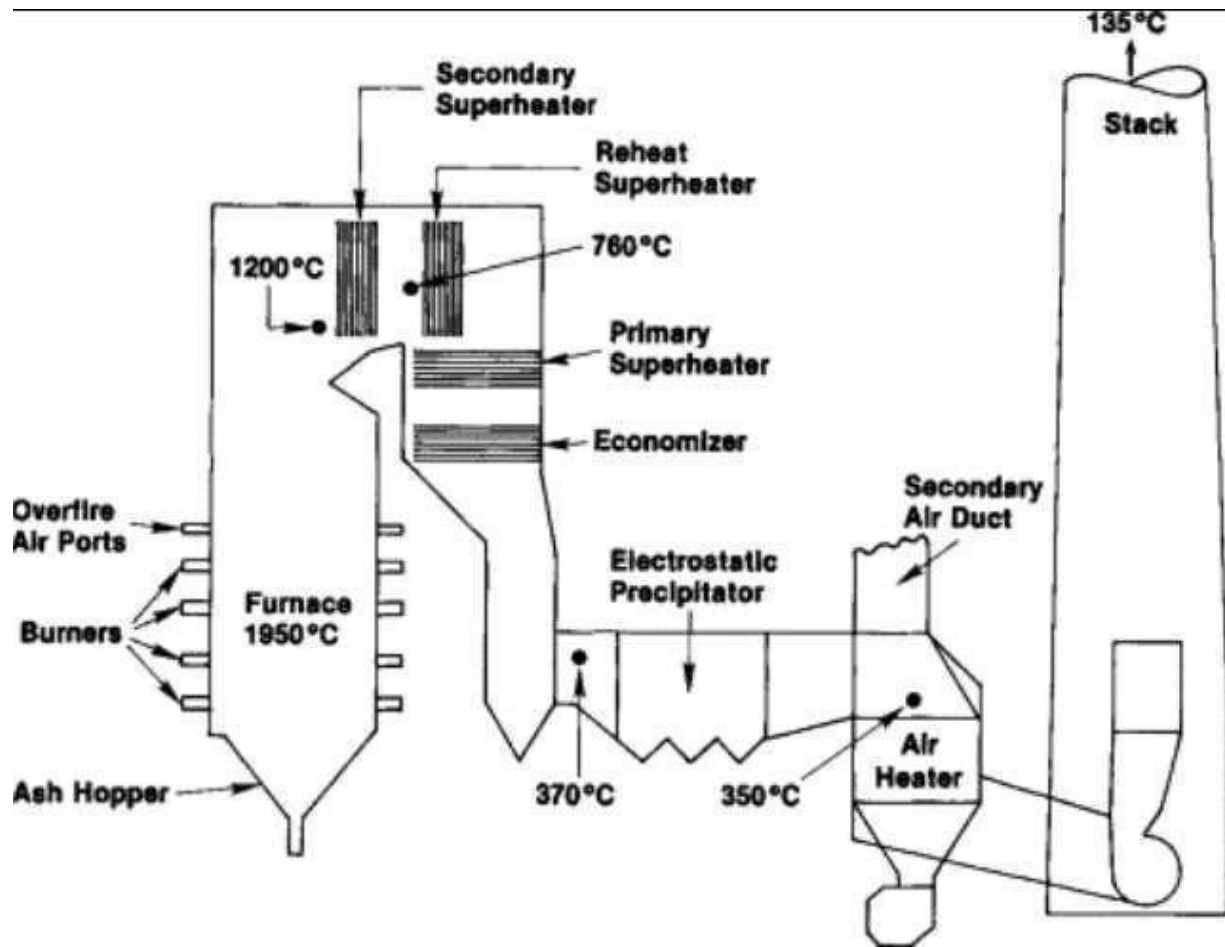
Dengan adanya sistem blending otomatis, kualitas bahan bakar dapat dikontrol sehingga variasi kualitas batu bara dapat diminimalkan. Hal ini berdampak pada kestabilan temperatur furnace, tekanan uap, serta efisiensi pembangkitan.

2.1.19. Dinamika Pembakaran Batu Bara pada Furnace

Pembakaran batu bara di dalam furnace merupakan proses kompleks yang melibatkan reaksi kimia antara bahan bakar dan oksigen. Proses ini dipengaruhi oleh rasio udara-bahan bakar, temperatur, distribusi partikel, serta waktu tinggal bahan bakar di dalam ruang bakar. Kestabilan pembakaran sangat penting untuk menjaga temperatur furnace dan tekanan uap.



Gambar 2. 14 Dinamika Pembakaran



Gambar 2. 15 Skema Pembakaran Batu Bara

Ketidakstabilan suplai bahan bakar dapat menyebabkan fluktuasi temperatur yang berdampak pada efisiensi boiler dan emisi gas buang. Sistem kendali coal feeder berperan penting dalam menjaga kestabilan suplai bahan bakar sehingga proses pembakaran berlangsung optimal. Dengan sistem kendali otomatis, variasi pembakaran dapat dikurangi dan respon terhadap perubahan beban menjadi lebih cepat.

2.1.20. Respon Sistem Coal Feeder terhadap Perubahan Beban

Pada operasi PLTU, perubahan beban listrik terjadi secara dinamis sesuai kebutuhan sistem. Perubahan ini memerlukan respon cepat dari sistem coal feeder agar suplai bahan bakar tetap stabil. Jika respon sistem lambat, maka dapat terjadi fluktuasi pembakaran yang berdampak pada kestabilan daya.



Gambar 2. 16 Coal Feeder

Sistem kendali berbasis PLC memiliki keunggulan dalam merespon perubahan beban secara real time. Dengan metode closed-loop control, sistem dapat menyesuaikan laju aliran bahan bakar berdasarkan kebutuhan boiler. Hal ini meningkatkan fleksibilitas operasi pembangkit.

Selain itu, respon sistem yang cepat juga berpengaruh terhadap pengurangan overshoot dan undershoot pada temperatur furnace.

2.1.21. Keandalan Sistem Kendali pada PLTU

Keandalan sistem kendali merupakan faktor penting dalam menjaga kontinuitas dan stabilitas operasi pembangkit listrik tenaga uap. Sistem kendali yang memiliki tingkat keandalan tinggi mampu meminimalkan gangguan operasi, meningkatkan keselamatan peralatan, serta menjaga kestabilan proses pembangkitan. Pada sistem coal feeder, keandalan sangat diperlukan karena gangguan pada suplai bahan bakar dapat menyebabkan penurunan daya atau bahkan trip pembangkit.



Gambar 2. 17 Panel Kontrol Perangkat Listrik

Penggunaan Programmable Logic Controller (PLC) pada sistem coal feeder memberikan keunggulan dalam hal kecepatan respon, akurasi, serta kemampuan integrasi dengan sistem proteksi. PLC mampu melakukan pengolahan data sensor secara real time dan memberikan perintah kontrol dengan presisi tinggi. Selain itu, sistem ini juga dapat mendeteksi kondisi abnormal seperti overload, slip belt, atau kegagalan sensor, sehingga tindakan koreksi dapat dilakukan secara cepat.

Dengan sistem kendali otomatis, risiko kesalahan manusia dapat dikurangi dan proses pengendalian menjadi lebih konsisten. Hal ini meningkatkan keandalan operasi pembangkit serta mendukung sistem pembangkitan yang lebih stabil dan efisien.

2.1.22. Strategi Optimasi Energi pada PLTU



Gambar 2. 18 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Optimasi energi pada pembangkit listrik tenaga uap bertujuan untuk meningkatkan efisiensi pembangkitan dan menurunkan konsumsi bahan bakar. Salah satu strategi utama adalah pengendalian kualitas bahan bakar melalui sistem blending otomatis. Dengan menjaga kualitas batu bara yang stabil, proses pembakaran dapat berlangsung lebih optimal dan kehilangan energi dapat diminimalkan.

Kestabilan kualitas bahan bakar berpengaruh terhadap penurunan nilai heat rate, peningkatan efisiensi boiler, serta pengurangan emisi gas buang. Selain itu, optimasi energi juga dapat dilakukan melalui integrasi sistem kendali, peningkatan sistem monitoring, serta pemanfaatan teknologi digital.

Penggunaan sistem kendali otomatis berbasis PLC merupakan salah satu langkah penting dalam mendukung optimasi energi pada pembangkit listrik modern.

2.2 Penelitian Relevan

Beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan sistem kendali coal feeder berbasis PLC untuk optimalisasi pencampuran batu bara pada PLTU antara lain sebagai berikut.

1. Penelitian oleh Putra et al. (2022) membahas sistem kendali mesin coal feeder tipe

EG2610 yang digunakan pada PLTU Tanjung Jati B, Jepara. Fokus utama penelitian ini adalah analisis kinerja sistem kontrol motor pengumpan batu bara, meliputi performa sensor berat, pengaturan kecepatan motor, serta sistem proteksi terhadap kondisi overload dan overcurrent. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sistem kendali berbasis PLC yang terintegrasi dengan inverter mampu menjaga kestabilan laju suplai batu bara menuju pulverizer. Selain itu, sistem tersebut juga dapat mengurangi potensi gangguan operasi akibat fluktuasi beban. Penelitian ini relevan dengan tugas akhir karena menekankan pentingnya stabilitas laju aliran batu bara dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan pembangkit.

2. Penelitian oleh Nugroho et al. (2023) berfokus pada perancangan dan simulasi sistem pembacaan laju aliran batu bara menggunakan perangkat lunak PAC8000 Workbench. Sistem ini dirancang untuk memantau dan mengatur flow batu bara secara otomatis melalui sensor berat dan sinyal analog. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengaturan setpoint dan respon kontrol dapat disesuaikan secara real time melalui Human Machine Interface (HMI). Penelitian ini menegaskan bahwa penggunaan sistem kendali digital mampu meningkatkan akurasi pengukuran dan kestabilan aliran bahan bakar. Relevansi penelitian ini dengan tugas akhir terletak pada konsep optimasi flow coal feeder berbasis sistem kendali otomatis.
3. Penelitian Zhou et al. (2021) mengembangkan sistem kendali pengumpanan batu bara pada PLTU berbasis Programmable Logic Controller (PLC) yang terintegrasi dengan Variable Frequency Drive (VFD). Sistem ini dirancang untuk menyesuaikan kecepatan motor coal feeder sesuai kebutuhan beban boiler. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem tersebut mampu meningkatkan stabilitas suplai batu bara serta efisiensi pembakaran hingga sekitar 10%. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan PLC memberikan respon kontrol yang cepat, akurat, serta mendukung monitoring dan pengendalian jarak jauh. Hal ini sangat relevan dengan penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini.
4. Penelitian Saputra dan Yuliana (2022) membahas perancangan sistem kendali kecepatan motor induksi pada coal feeder menggunakan PLC Siemens S7-1200. Metode yang digunakan meliputi pemrograman ladder diagram, integrasi Variable Speed Drive

(VSD), serta penggunaan sensor berat sebagai sistem umpan balik. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan stabilitas suplai batu bara sebesar 12% serta pengurangan kesalahan pengukuran hingga 8% dibandingkan sistem manual. Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan PLC mampu meningkatkan respon sistem dan efisiensi operasi. Relevansi dengan tugas akhir ini terletak pada penggunaan PLC dalam menjaga kestabilan rasio dan flow pencampuran batu bara.

5. Penelitian oleh Lestari dan Firmansyah (2023) mengkaji implementasi sistem kontrol otomatis pada motor induksi coal feeder menggunakan PLC dan inverter. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan kestabilan suplai bahan bakar ke boiler melalui pengaturan kecepatan motor secara otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kecepatan motor dalam toleransi $\pm 2\%$ dari setpoint serta meningkatkan efisiensi energi hingga 7% dibandingkan sistem manual. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi PLC dan inverter dapat menghasilkan sistem kendali yang responsif, efisien, serta mudah diintegrasikan dengan sistem monitoring dan SCADA.

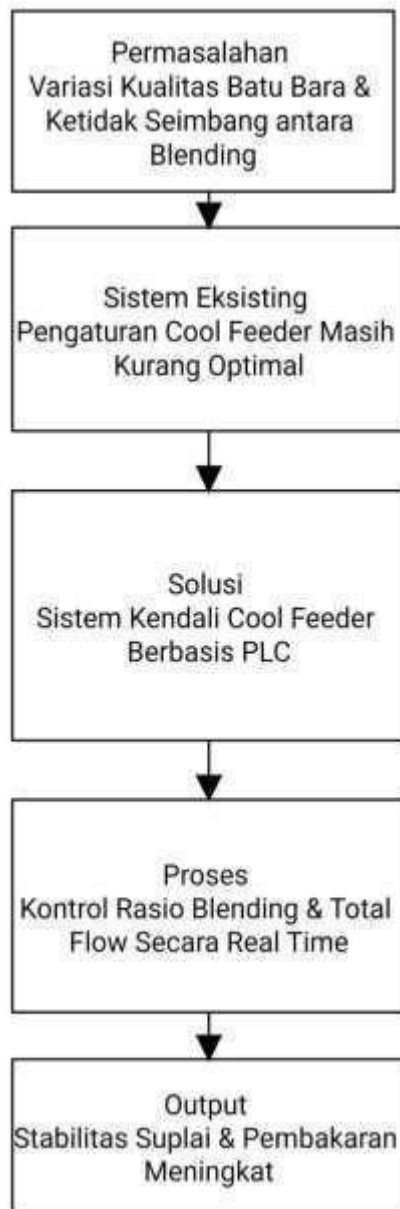
Tabel 2. 1 Penelitian Relevan

No	Peneliti	Metode Penelitian	Persamaan	Perbedaan
1	Putra et al. (2022)	Analisis sistem kendali coal feeder berbasis PLC dan inverter	Sama-sama menggunakan PLC untuk stabilitas suplai batu bara	Penelitian ini hanya analisis sistem existing, sedangkan penelitian ini optimasi blending
2	Nugroho et al. (2023)	Simulasi flow coal feeder dengan PAC8000	Sama-sama fokus pada kontrol flow dan sensor berat	Penelitian ini simulasi, sedangkan penelitian ini implementasi langsung
3	Zhou et al. (2021)	Pengembangan kontrol PLC dan VFD	Sama-sama menggunakan PLC dan VFD	Fokus efisiensi pembakaran, sedangkan penelitian ini fokus rasio blending

No	Peneliti	Metode Penelitian	Persamaan	Perbedaan
4	Saputradan Yuliana (2022)	Kontrol motor coal feeder berbasis PLC	Sama-sama closed-loop dan sensor berat	Fokus kontrol motor, sedangkan penelitian ini kontrol blending dan total flow
5	Lestari dan Firmansyah (2023)	Implementasi PLC dan inverter	Sama-sama PLC dan inverter	Fokus stabilitas motor, sedangkan penelitian ini optimasi blending dan efisiensi

2.3 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran penelitian ini menggambarkan hubungan antara permasalahan variasi kualitas batu bara dan ketidakstabilan suplai bahan bakar terhadap efisiensi dan keandalan operasi PLTU. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini mengusulkan penerapan sistem kendali coal feeder berbasis PLC guna mengatur rasio pencampuran dan laju aliran batu bara secara otomatis. Sistem ini diharapkan mampu meningkatkan stabilitas pembakaran, efisiensi energi, dan kinerja pembangkit.



Gambar 2. 19 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran pada penelitian ini menggambarkan alur pemecahan masalah terkait proses pencampuran batu bara pada sistem coal feeder di PLTU. Tahap awal dimulai dari identifikasi permasalahan utama, yaitu adanya variasi kualitas batu bara yang meliputi perbedaan nilai kalor, kadar air, dan kadar abu. Kondisi ini menyebabkan ketidakseimbangan rasio pencampuran (blending), sehingga kualitas bahan bakar yang masuk ke boiler menjadi tidak stabil. Akibatnya, proses pembakaran mengalami fluktuasi yang berdampak pada penurunan efisiensi pembangkitan dan keandalan operasi.

Selanjutnya, ditinjau kondisi sistem eksisting, di mana pengaturan coal feeder masih belum optimal. Pengendalian rasio pencampuran dan laju aliran batu bara masih bergantung pada operator atau sistem semi otomatis, sehingga respon terhadap perubahan beban dan variasi kualitas batu bara menjadi lambat. Hal ini menyebabkan deviasi terhadap target nilai kalor dan ketidakstabilan suplai bahan bakar.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengusulkan solusi berupa penerapan sistem kendali coal feeder berbasis Programmable Logic Controller (PLC). Sistem ini dirancang untuk mengatur kecepatan motor feeder secara otomatis dengan memanfaatkan sensor berat (load cell) dan sensor kecepatan belt sebagai umpan balik. Dengan integrasi inverter (VFD), sistem mampu menyesuaikan laju aliran batu bara secara lebih akurat.

Pada tahap proses, sistem kendali melakukan pengaturan rasio blending dan total flow batu bara secara real time sesuai dengan kebutuhan beban boiler. Metode kendali tertutup (closed-loop control) digunakan untuk mengoreksi penyimpangan terhadap setpoint, sehingga kualitas campuran tetap stabil meskipun terjadi perubahan densitas batu bara atau variasi beban.

Hasil dari penerapan sistem ini ditunjukkan pada bagian output, yaitu meningkatnya stabilitas suplai bahan bakar dan proses pembakaran. Stabilitas ini berdampak pada temperatur furnace dan tekanan uap yang lebih konstan, sehingga efisiensi pembangkitan meningkat, konsumsi bahan bakar menjadi lebih optimal, serta keandalan operasi PLTU dapat ditingkatkan.

Dengan demikian, kerangka pemikiran ini menunjukkan bahwa optimalisasi sistem kendali coal feeder berbasis PLC merupakan solusi yang efektif dalam meningkatkan stabilitas pencampuran batu bara dan performa pembangkit secara keseluruhan.

