TUGAS AKHIR

ANALISIS KINERJA SISTEM KENDALI LEVEL DRUM BOILER DALAM MENJAGA KEANDALAN OPERASI PLTU DI SICANANG

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat memperoleh Gelar Sarjana Teknik (S,T) Pada Fakultas Teknik Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Disusun Oleh :

MUHAMMAD ADE FARHAN

2207220031

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2026

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap	: Muhammad Ade Farhan
Tempat/Tgl Lahir	: Medan , 12 Juni 2004
NPM	: 2207220031
Fakultas	: Teknik
Program Studi	: Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul:

"ANALISIS KINERJA SISTEM KENDALI LEVEL DRUM BOILER DALAM MENJAGA KEANDALAN OPERASI PLTU DI SICANANG"

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan,13 September 2026
Saya yang menyatakan,



Muhammad Ade Farhan

ABSTRAK

Sistem kendali level drum boiler merupakan salah satu sistem kendali paling kritis dalam operasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), karena kestabilan level air di dalam drum sangat menentukan keandalan proses pembangkitan listrik. Ketidakterkendalian level air dapat menyebabkan gangguan operasional hingga kerusakan peralatan utama. Karakteristik dinamis sistem yang bersifat nonlinier dan memiliki waktu tunda, ditambah perubahan beban turbin yang fluktuatif, menuntut sistem kendali mampu merespons dengan cepat agar level air tetap berada pada batas aman. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik dinamika sistem kendali level drum boiler pada PLTU, mengevaluasi kinerjanya berdasarkan parameter respon sistem seperti *overshoot* , *rise time*, dan *settling time*, serta menganalisis kemampuan sistem kendali dalam menjaga kestabilan level air drum pada berbagai kondisi operasi beban. Penelitian dilakukan dengan pendekatan deskriptif-analitis menggunakan data operasional dan data historis sistem kendali, serta studi literatur dan referensi penelitian terdahulu yang relevan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran evaluatif terhadap kinerja sistem kendali level drum boiler yang digunakan di PLTU, sekaligus menjadi bahan pertimbangan dalam upaya peningkatan keandalan, keselamatan, dan efisiensi operasi pembangkit, serta menjadi referensi ilmiah bagi pengembangan sistem kendali PLTU di masa mendatang.

Kata kunci: sistem kendali, drum boiler, PLTU, kinerja, keandalan operasi, *PID*

ABSTRACT

The boiler drum level control system is one of the most critical control systems in the operation of a Steam Power Plant (PLTU), as the stability of the water level in the drum largely determines the reliability of the power generation process. Uncontrolled water levels can lead to operational disturbances and even damage to the plant's main equipment. The nonlinear dynamic characteristics of the system, combined with inherent time delays and fluctuating turbine load changes, require the control system to respond quickly in order to keep the water level within safe limits. This study aims to analyze the dynamic characteristics of the boiler drum level control system in a PLTU, evaluate its performance based on system response parameters such as overshoot , rise time, and settling time, and examine the ability of the control system to maintain water level stability under various load operating conditions. The research employs a descriptive-analytical approach using operational data and historical control system data, supported by a literature study and relevant prior research references. The results of this study are expected to provide an evaluative overview of the performance of the boiler drum level control system used in the PLTU, serve as a consideration for improving the reliability, safety, and operational efficiency of the power plant, and become a scientific reference for the future development of PLTU control systems.

Keywords: *control system, boiler drum, PLTU, performance, operational reliability, PID*

KATA PENGANTAR

بِسْـــــــــــــمِ اللهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيْمِ

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala Puji dan Syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul "Analisis Kinerja sistem kendali level drum boiler dalam menjaga keandalan operasi PLTU di sicanang " sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU).

Laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik, tentunya tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak. Untuk itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Akrim, M.Pd, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
2. Yang teristimewa kepada Ayahanda Fahmi dan Almh. ibunda tercinta Vivi Zulviani yang telah memberikan dukungan bagi penulis dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
3. Kepada keluarga saya, Abang Muhammad Ibrahim, Kakak Rizkhia Favi Annisa, Adik Nicky Savica Affifah, Adik Muhammad Albie Raihan yang selalu mendoakan, memberikan perhatian, serta kasih sayang yang menjadi sumber kekuatan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Bapak Prof.Ir. Ade Faisal, Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Ibu Dr. Elvy Sahnur, S.T., M.Pd selaku Kepala Prodi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Bapak Benny Oktorialdi, S.T., M.T, selaku Sekretaris Prodi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
7. Bapak Affandi, S.T., M.T. selaku Wakil Dekan III Bidang Kemahasiswaan Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Bapak Benny Oktorialdi, S.T., M.T, selaku Dosen Pembimbing yang telah membantu menyelesaikan serta memberikan ide-ide dan masukan dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.

9. Teruntuk teman – teman angkatan 22 yang sama dengan saya Tomi Sitepu, Firmansyah, Rizki Pratama, Muhammad Sodiqih Dalimunthe. Terimakasih atas dukungan, bantuan dan motivasi dalam penyelesaian skripsi dan kebersamaannya selama di kuliah ini.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan maupun dalam susunan kalimat sehingga penulis menerima kritikan dan saran yang sifatnya membangun demi kesempurnaan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengharapkan semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembaca. Akhirnya kepada Allah SWT penulis serahkan segala ketercapaian dan keberhasilan yang sepenuhnya.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Medan 5 Februari 2026
Penulis

MHD ADE FARHAN

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **iii**
DAFTAR ISI ..... **ii**
DAFTAR GAMBAR ..... **iv**
DAFTAR TABEL ..... **v**
BAB 1 PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Batasan Masalah 3
1.5 Manfaat Penelitian 5
1.6 Sistematik
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA **6**
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan 6
2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) 6
2.1.2 Peran Boiler dalam Sistem PLTU 8
2.1.3 Fungsi dan Karakteristik Drum Boiler 10
2.1.4 Permasalahan Level Air Drum Boiler 12
2.2 Sistem Kendali 13
2.2.1 Pengertian Sistem Kendali 14
2.2.3 Klasifikasi Sistem Kendali 15
2.3 Sistem Kendali Level Drum Boiler 18
2.3.1 Single Element Control 18
2.3.2 Two Element Control 19
2.3.3 Three Element Control 21
2.4 Pengendali *PID* 22
2.4.1 Prinsip Kerja Pengendali PID 24
2.4.2 Parameter P, I, dan D 26
2.4.3 Metode Penalaan PID 27
2.5 Kinerja Sistem Kendali 28
2.5.1 Parameter Kinerja Sistem Kendali 30
2.6 Keandalan Operasi PLTU 32
2.6.1 Konsep Keandalan Sistem 32
2.6.2 Hubungan Sistem Kendali terhadap Keandalan Operasi 34
2.7 Penelitian Terkait 35
2.8 Instrumentasi dan Sensor pada Sistem Kendali Level Drum Boiler 37
2.9 Sistem Kendali Digital Berbasis DCS dan PLC pada PLTU 38

2.10 Metode Kendali Lanjutan: Fuzzy Logic, Adaptive Control, dan Hybrid PID.. 39
2.11 Pemodelan dan Simulasi Sistem Kendali Level Drum Boiler..... 40
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN..... 43
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian..... 43
3.1.1 Waktu Penilitian ..... **Error! Bookmark not defined.**
3.2 Alat dan Perangkat Penelitian..... 43
3.3 Teknik Pengumpulan Data 43
3.4 Variabel Penelitian..... 44
3.5 Diagram Alir Penelitian..... 45
3.5.1 Penjelasan Diagram Alir: 45
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN..... 48
4.1 Gambaran Umum PLTU Sicanang..... 48
4.2.1 Variabel Data Sistem Kendali Boiler 50
4.3 Penyajian Data Hasil Simulasi 51
4.3.1 Respons Level Drum terhadap Pengendalian..... 57
4.3.2 Respons Valve Output 60
4.3.4 Analisis Awal Kinerja Sistem 63
4.4 Evaluasi Parameter Kinerja 63
4.4.2 Analisis *Rise Time* 66
4.4.3 Analisis *Settling Time* 67
4.4.4 Rekapitulasi Hasil Evaluasi Parameter Kinerja..... 69
4.5 Analisis Keandalan PLTU 69
4.5.1 Analisis Respons terhadap Gangguan 70
4.5.2 Kemampuan Pemulihan Sistem 70
4.5.4 Hubungan Parameter Kinerja dengan Operasi 73
4.5.5 Analisis Keandalan Berdasarkan Hasil Simulasi..... 73
4.6 Kesimpulan Analisis Keandalan..... 74
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN..... 75
5.1 KESIMPULAN 75
5.2 SARAN..... 76
DAFTAR PUSTAKA 77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Steam Drum Boiler 10
Gambar 2. 2 Karakteristik Respon PID 23

Gambar 4. 1 Respons Level Drum terhadap Setpoint 56
Gambar 4. 2 Respon sistem Kendali PID 60
Gambar 4. 3 Respon Valve Output Sistem Kendali Terhadap Respon Level 61
Gambar 4. 4 Respons Valve Output terhadap Waktu 62
Gambar 4. 5 Analisis Overshoot Respons Level Drum 65
Gambar 4. 6 Analisis Rise Time Respons Level Drum 67
Gambar 4. 7 Analisis Settling Time Respons Level Drum 68
Gambar 4. 8 Respons Level Drum terhadap Gangguan 72

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Data Sistem Kendai Level Drum……..…..45

Tabel 4. 2 Rekapitulasi Parameter Kinerja Sistem Kendali 69
Tabel 4. 3 Respons Sistem Setelah Gangguan..... 71

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem kendali level drum boiler merupakan salah satu sistem kendali paling kritis dalam operasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Steam drum berfungsi sebagai tempat pemisahan uap dan air yang akan disalurkan ke turbin, sehingga kestabilan level air di dalam drum sangat menentukan keandalan proses pembangkitan listrik. Ketidakterkendalian level air dapat menyebabkan gangguan operasional hingga kerusakan peralatan utama PLTU[1].

Dalam praktiknya, pengendalian level drum boiler menghadapi tantangan besar akibat karakteristik dinamis sistem yang bersifat nonlinier dan memiliki waktu tunda. Perubahan beban turbin secara tiba-tiba akan mempengaruhi tekanan dan laju aliran uap, sehingga sistem kendali harus mampu merespons dengan cepat untuk menjaga level air tetap berada pada batas aman[2].

Dalam sistem PLTU modern, pengendalian level drum boiler tidak terlepas dari peran sistem kelistrikan dan instrumentasi sebagai tulang punggung proses otomasi. Sistem kendali level drum boiler melibatkan berbagai komponen elektrik seperti sensor level (level transmitter), sensor aliran (flow transmitter), aktuator elektrik berupa control valve, serta pengendali berbasis PLC atau *Distributed Control System* (DCS). Keandalan sinyal listrik dari sensor dan ketepatan respon aktuator sangat menentukan akurasi sistem kendali dalam menjaga kestabilan level air drum boiler[3].

Selain itu, sistem kendali level drum boiler merupakan bagian dari sistem kendali tertutup (closed-loop control system) yang sangat dipengaruhi oleh karakteristik sinyal listrik, kesalahan kalibrasi sensor, maupun keterlambatan pengiriman sinyal pada sistem kontrol digital dapat menyebabkan penyimpangan respon kendali yang berpotensi mengganggu keselamatan operasi boiler[4].

Penggunaan pengendali *PID* dalam PLTU diimplementasikan secara elektrik melalui modul kontrol pada PLC atau DCS yang bekerja berdasarkan pemrosesan sinyal analog dan digital. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik respon sistem kendali secara elektrik, seperti kestabilan sinyal, waktu respon, dan keandalan sistem kontrol, menjadi aspek penting dalam evaluasi kinerja kendali level drum boiler. Analisis sistem kendali dari sudut pandang teknik elektro memungkinkan identifikasi permasalahan kendali secara lebih komprehensif, baik dari sisi algoritma kontrol maupun performa perangkat keras elektrik yang digunakan[5].

Dengan meningkatnya tuntutan efisiensi dan keandalan pembangkitan listrik, sistem kendali level drum boiler dituntut tidak hanya stabil secara proses, tetapi juga andal secara elektrik dan sistem kontrol. Oleh karena itu, analisis kinerja sistem kendali level drum boiler dari perspektif teknik elektro menjadi penting untuk memastikan integrasi yang optimal antara sistem proses termal dan sistem kendali berbasis listrik pada PLTU (IEA, 2022).Pengendali *PID* masih menjadi pilihan utama dalam industri PLTU karena struktur yang sederhana dan mudah diimplementasikan. Namun, pengendali *PID* sangat bergantung pada parameter tuning yang tepat dan kurang adaptif terhadap perubahan karakteristik sistem. Ketidaktepatan tuning dapat mengakibatkan respon lambat, *overshoot* besar, atau osilasi yang berbahaya bagi sistem boiler[1].

Seiring berkembangnya teknologi sistem kendali, berbagai metode kendali lanjutan seperti fuzzy logic control, adaptive control, dan hybrid *PID* mulai banyak diteliti untuk meningkatkan performa kendali level drum boiler. Penelitian menunjukkan bahwa metode tersebut mampu meningkatkan stabilitas dan ketahanan sistem terhadap gangguan beban dibandingkan kendali konvensional [6].

Selain aspek keselamatan, kinerja sistem kendali level drum boiler juga berpengaruh langsung terhadap efisiensi energi PLTU. Ketidakseimbangan suplai air umpan dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar dan menurunkan efisiensi termal pembangkit. Oleh karena itu, sistem kendali yang optimal sangat diperlukan untuk mendukung operasi PLTU yang efisien dan berkelanjutan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan suatu analisis kinerja sistem kendali level drum boiler untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menjaga

stabilitas level air pada berbagai kondisi operasi. Analisis ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam peningkatan performa sistem kendali serta memberikan kontribusi ilmiah bagi pengembangan sistem kendali PLTU di masa mendatang[7].

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana karakteristik respon sistem kendali level drum boiler pada PLTU terhadap perubahan beban operasi?
2. Bagaimana kinerja sistem kendali level drum boiler yang digunakan ditinjau dari parameter respon sistem seperti *overshoot* , settling time, dan kestabilan sistem?
3. Bagaimana sistem kendali level drum boiler mampu menjaga level air drum tetap pada batas aman operasi PLTU?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis karakteristik dinamika sistem kendali level drum boiler pada PLTU.
2. Mengevaluasi kinerja sistem kendali level drum boiler berdasarkan parameter respon sistem kendali.
3. Menganasis sistem kendali dalam menjaga kestabilan level air drum pada berbagai kondisi operasi beban.

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian difokuskan pada sistem kendali level air steam drum boiler pada PLTU.
2. Analisis dilakukan pada sistem kendali yang ada tanpa membahas secara mendalam desain mekanik boiler.
3. Parameter evaluasi kinerja sistem kendali dibatasi pada respon transien dan kestabilan sistem, seperti *overshoot* , *rise time,* dan *settling time*.

4. Data dan model sistem diperoleh dari studi literatur, data simulasi, dan

referensi penelitian terdahulu yang relevan serta memberikan kontribusi ilmiah bagi pengembangan sistem kendali PLTU di masa mendatang.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah bagi mahasiswa dan peneliti dalam memahami karakteristik dan kinerja sistem kendali level drum boiler PLTU.
2. Hasil penelitian ini dapat memberikan gambaran evaluatif terhadap sistem kendali level drum boiler yang digunakan di PLTU sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan dalam upaya peningkatan keandalan, keselamatan, dan efisiensi operasi pembangkit.

1.6 Sistematik

BAB 1 Pendahuluan

Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat dan sistematik.

BAB 2 Tinjauan Pustaka.

Berisi teori dasar sistem kendali, karakteristik drum boiler, fenomena *swell* dan *shrink*, serta kajian penelitian terdahulu yang relevan dengan sistem kendali level drum boiler.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Menjelaskan metode penelitian, pemodelan sistem kendali level drum boiler, serta tahapan analisis dan evaluasi kinerja sistem.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Menyajikan hasil analisis dan evaluasi kinerja sistem kendali level drum boiler beserta pembahasannya.

BAB 5 Penutup

Berisi kesimpulan dari penelitian dan direkomendasikan untuk pengembangan selanjutnya.

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan sistem pembangkit energi listrik yang memanfaatkan energi panas dari pembakaran bahan bakar fosil untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang menggerakkan turbin uap. PLTU masih menjadi tulang punggung penyediaan energi listrik di Indonesia karena keandalannya dalam menyuplai daya skala besar secara kontinu. Dalam sistem ketenagalistrikan nasional, PLTU berperan penting dalam menjaga kestabilan beban dasar (base load) jaringan listrik. Oleh karena itu, pengoperasian PLTU dituntut memiliki tingkat efisiensi dan keandalan yang tinggi[4].

Secara umum, PLTU bekerja berdasarkan siklus Rankine yang terdiri dari proses pemanasan air menjadi uap, ekspansi uap pada turbin, kondensasi uap, dan pemompaan kembali air ke boiler. Setiap tahapan dalam siklus ini saling berkaitan dan memerlukan pengendalian yang presisi agar tidak menimbulkan gangguan operasi. Ketidakseimbangan pada salah satu subsistem dapat berdampak pada penurunan efisiensi dan meningkatnya risiko kegagalan peralatan. Oleh sebab itu, sistem kendali menjadi bagian integral dalam operasi PLTU modern[4].

Perkembangan teknologi PLTU saat ini mengarah pada peningkatan efisiensi termal dan pengurangan emisi melalui penerapan sistem kontrol digital dan otomasi tingkat lanjut. Sistem *Distributed Control System* (DCS) digunakan untuk memantau dan mengendalikan seluruh parameter operasi secara real time. Implementasi teknologi ini memungkinkan respons cepat terhadap perubahan beban dan kondisi operasi yang dinamis. Dengan demikian, stabilitas operasi PLTU dapat terjaga dalam berbagai kondisi[8].

Selain aspek teknis, PLTU juga menghadapi tantangan operasional berupa fluktuasi beban listrik dan degradasi peralatan akibat operasi jangka panjang. Tantangan ini menuntut sistem kendali yang adaptif dan andal, khususnya pada subsistem kritis seperti boiler dan drum boiler. Pengendalian yang tidak optimal

Menyebabkan trip unit dan kerugian ekonomi yang signifikan. Oleh karena itu, analisis kinerja sistem kendali menjadi sangat penting dalam konteks keandalan PLTU[8].

Dengan mempertimbangkan kompleksitas sistem dan tuntutan keandalan, studi mengenai sistem kendali pada PLTU, khususnya kendali level drum boiler, menjadi relevan dan strategis. Pengendalian level air drum boiler yang baik berkontribusi langsung terhadap keselamatan, efisiensi, dan kontinuitas operasi pembangkit. Hal ini menjadikan topik penelitian ini memiliki nilai akademik dan praktis yang tinggi[9].

PLTU merupakan jenis pembangkit yang memanfaatkan energi termal hasil pembakaran bahan bakar fosil untuk mengubah air menjadi uap bertekanan tinggi guna memutar turbin generator. Secara termodinamika, PLTU bekerja berdasarkan prinsip Siklus Rankine Ideal.

Efisiensi termal (Nth) dari siklus ini dapat dihitung menggunakan rumus entalpi fluida pada masing-masing tahapan proses:

$$(Nth) = \frac{W}{Qin} + \frac{\mathrm{W}(1)-\mathrm{W}(2)}{Qin} = \frac{(h3-h4)-(h2-h1)}{h3-h2} \ldots \quad (1)$$

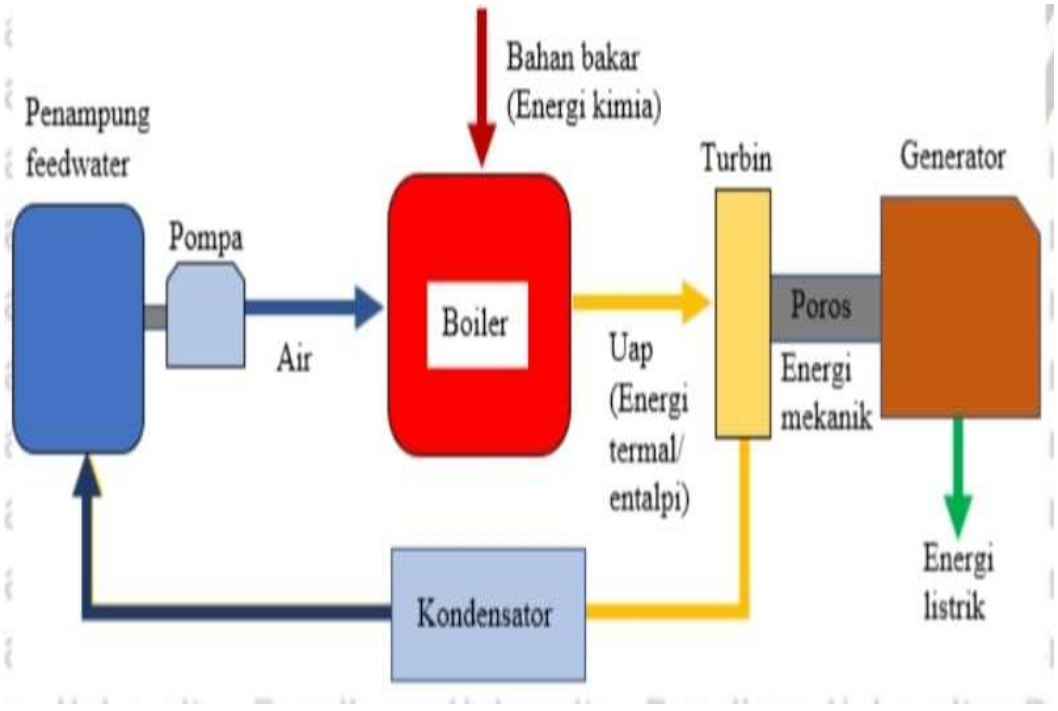
Dimana :

- h1 = Entalpi air keluar kondensor / masuk pompa (kJ/kg)
- h2 = Entalpi air keluar pompa / masuk boiler (kJ/kg)
- h3 = Entalpi uap superheated keluar boiler / masuk turbin (kJ/kg)
- h4 = Entalpi uap keluar turbin / masuk kondensor (kJ/kg)
- Wnet = Kerja bersih sistem (kW)
- Qin = Energi panas yang dimasukkan ke dalam boiler (kW)

2.1.2 Peran Boiler dalam Sistem PLTU

Boiler merupakan komponen utama dalam PLTU yang berfungsi mengubah air menjadi uap melalui proses pemanasan. Boiler bekerja dengan mentransfer energi panas dari hasil pembakaran bahan bakar ke air di dalam pipa-pipa pemanas hingga mencapai kondisi jenuh atau superheated. Kualitas dan kontinuitas uap yang dihasilkan oleh boiler sangat menentukan performa turbin dan efisiensi pembangkitan listrik secara keseluruhan[10].

Salah satu bagian terpenting dari boiler adalah steam drum, yang berfungsi sebagai tempat pemisahan antara fase air dan uap. Steam drum juga berperan sebagai penyangga sistem terhadap fluktuasi beban, sehingga kestabilan level air di dalamnya menjadi parameter kritis. Ketidakseimbangan level air dapat menyebabkan gangguan serius seperti kerusakan pipa pemanas, terbawanya air ke turbin, atau bahkan trip unit pembangkit[11].



Gambar 2. 1 Diagram aliran energi dan proses pada PLTU

Boiler (Uap)	→	Turbin (Mekanik)	→	Generator (Listrik)	→	Kondensor (Cair)	→	Pompa Feedwater

Gambar 2.2 Diagram Blok Rangkaian Komponen PLTU (Siklus Rankine)[

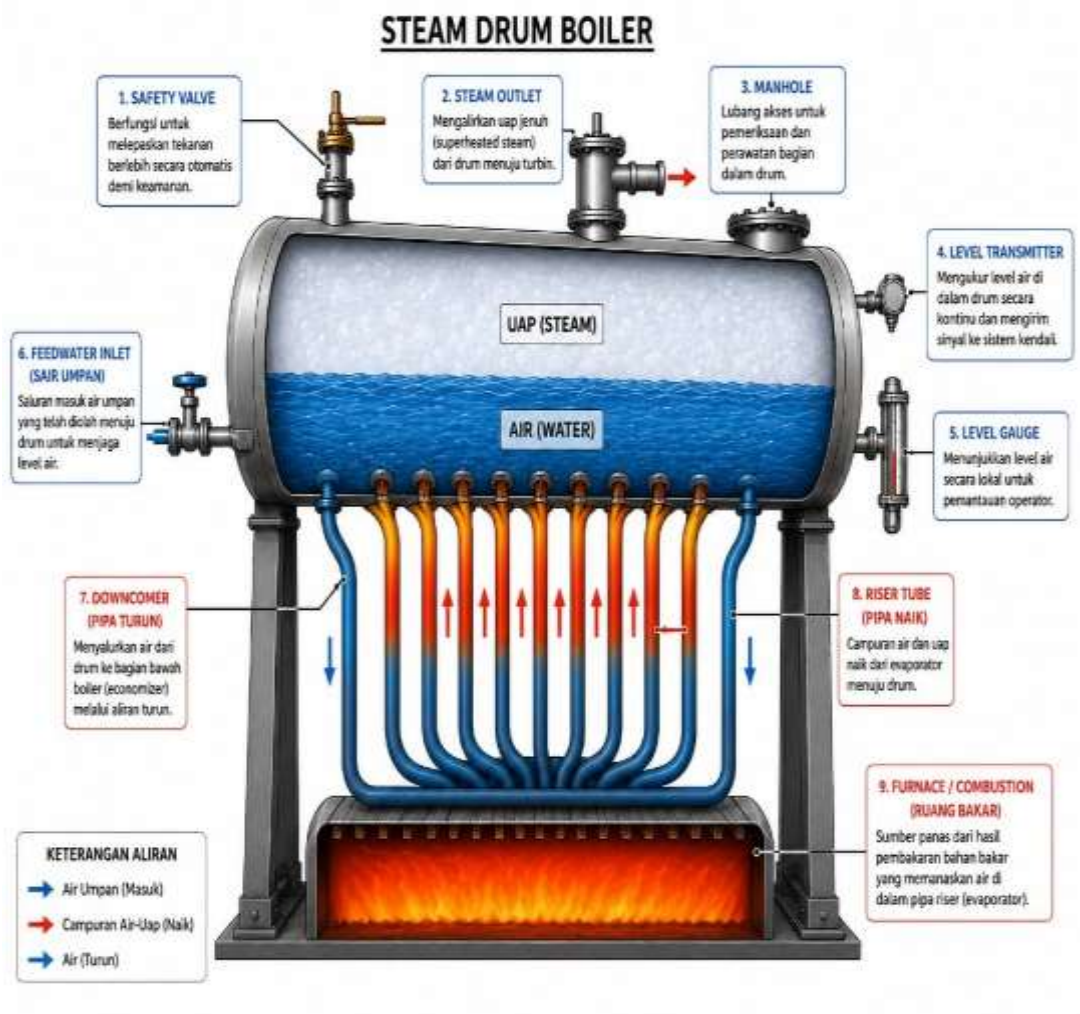
Drum boiler merupakan komponen utama pada sistem boiler tipe drum yang berfungsi sebagai pemisah antara uap dan air. Drum boiler menerima campuran uap-air dari pipa riser dan memisahkan uap jenuh untuk dialirkan ke turbin, sementara air dikembalikan ke sistem sirkulasi. Fungsi ini menjadikan drum boiler sebagai elemen kritis dalam menjaga kualitas uap dan kestabilan proses pembangkitan[11].

Karakteristik utama drum boiler adalah kapasitasnya yang besar, dinamika nonlinier, serta keterlambatan waktu (*time delay)* dalam respons sistem. Perubahan beban turbin secara tiba-tiba dapat menyebabkan fluktuasi level air yang signifikan di dalam drum. Fenomena *swell* dan *shrink* sering terjadi akibat perubahan tekanan dan aliran uap, sehingga menyulitkan proses pengendalian. Kondisi ini menuntut desain sistem kendali yang robust[12].

Permasalahan level air pada drum boiler merupakan isu krusial dalam operasi PLTU. Level air yang terlalu tinggi dapat menyebabkan *carryover* air ke turbin, yang berpotensi merusak sudu turbin. Sebaliknya, level air yang terlalu rendah dapat mengakibatkan overheating pipa boiler dan kegagalan material. Oleh karena itu, batas toleransi level air drum boiler sangat ketat[9].

Pengukuran level drum boiler umumnya dilakukan menggunakan sensor diferensial tekanan yang dipengaruhi oleh densitas fluida dan tekanan sistem. Akurasi pengukuran ini sangat penting karena kesalahan pengukuran dapat menyebabkan kesalahan pengendalian. Untuk meningkatkan keandalan, sistem redundansi sensor sering diterapkan pada PLTU skala besar[12].

Dengan kompleksitas dinamika dan risiko operasional yang tinggi, drum boiler menjadi fokus utama dalam pengembangan dan evaluasi sistem kendali. Analisis kinerja kendali level drum boiler diperlukan untuk memastikan bahwa sistem mampu merespons gangguan secara cepat dan stabil. Hal ini mendukung operasi PLTU yang aman dan berkelanjutan[12].



Gambar 2. 1 Steam Drum Boiler

2.1.3 Fungsi dan Karakteristik Drum Boiler

Drum boiler adalah bejana bertekanan yang berfungsi sebagai tempat akumulasi air dan uap sebelum uap dialirkan ke tahap berikutnya. Drum ini berperan penting dalam menjaga kualitas uap dengan memisahkan tetesan air dari uap jenuh. Selain itu, drum boiler juga berfungsi sebagai reservoir yang menjaga kontinuitas pasokan air selama perubahan kondisi operasi[11].

Karakteristik utama drum boiler adalah dinamika nonlinier yang disebabkan oleh perubahan densitas air dan uap akibat variasi tekanan dan temperatur. Kondisi ini membuat sistem level drum memiliki respon yang kompleks, sehingga pengendalian level air menjadi salah satu tantangan terbesar dalam sistem kendali boiler. Ketidaktepatan pengendalian dapat menimbulkan osilasi level yang

berdampak negatif terhadap keselamatan dan keandalan operasi PLTU[13].

Selain berfungsi sebagai pemisah uap dan air, drum boiler juga berperan sebagai elemen penyeimbang termal dan hidrolik dalam sistem boiler. Drum berfungsi menstabilkan sirkulasi alami air-uap dengan mengakomodasi perubahan laju aliran akibat variasi beban. Kapasitas penyimpanan air di dalam drum memungkinkan sistem tetap beroperasi aman pada kondisi transien jangka pendek, seperti perubahan beban mendadak atau gangguan feedwater sementara[14].

Dari sisi mekanik, drum boiler dirancang sebagai bejana bertekanan tinggi yang harus memenuhi standar keselamatan ketat karena beroperasi pada tekanan dan temperatur ekstrem. Tegangan termal dan mekanik yang timbul akibat fluktuasi operasi dapat menyebabkan kelelahan material (fatigue) jika tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, kestabilan level air drum menjadi faktor penting dalam menjaga integritas struktural drum boiler dan pipa-pipa pemanas yang terhubung dengannya[14] .

Karakteristik dinamika drum boiler juga dipengaruhi oleh fenomena interaksi multivariabel antara tekanan, temperatur, aliran uap, dan aliran air umpan. Perubahan pada satu variabel dapat memengaruhi variabel lainnya secara simultan, sehingga sistem bersifat coupled dan sulit dimodelkan secara linier. Kondisi ini menyebabkan sistem level drum boiler sangat sensitif terhadap gangguan dan memerlukan pendekatan pengendalian yang mempertimbangkan dinamika proses secara menyeluruh[15].

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa karakteristik nonlinier drum boiler semakin kompleks pada PLTU berkapasitas besar yang beroperasi dalam mode fleksibel untuk mengikuti fluktuasi beban jaringan. Operasi fleksibel meningkatkan frekuensi dan amplitudo perubahan level drum, sehingga memperbesar risiko osilasi dan ketidakstabilan jika sistem kendali tidak dirancang dengan baik. Hal ini menegaskan pentingnya pemahaman karakteristik dinamis drum boiler dalam desain sistem kendali level air [16].

Dengan mempertimbangkan fungsi vital dan karakteristik dinamis yang kompleks, drum boiler tidak hanya dipandang sebagai komponen mekanik, tetapi juga sebagai objek utama dalam analisis dan pengembangan sistem kendali PLTU.

Karakteristik ini menjadikan drum boiler sebagai fokus utama penelitian pengendalian lanjutan, baik menggunakan *PID* konvensional maupun pendekatan adaptif dan berbasis optimasi, guna meningkatkan keselamatan dan keandalan operasi pembangkit [15].

2.1.4 Permasalahan Level Air Drum Boiler

Permasalahan utama pada level air drum boiler adalah terjadinya fenomena *swell* dan *shrink*, yaitu kenaikan atau penurunan level air secara semu akibat perubahan beban uap. Ketika beban meningkat, tekanan di dalam drum menurun sehingga volume uap bertambah dan level air tampak naik *(swell)*, meskipun massa air sebenarnya berkurang. Sebaliknya, saat beban menurun, level air tampak turun [12].

Fenomena tersebut sering menyebabkan sistem kendali memberikan respons yang kurang tepat apabila hanya mengandalkan satu variabel pengukuran. Jika tidak ditangani dengan strategi kendali yang sesuai, fluktuasi level ini dapat memicu alarm, trip unit, serta menurunkan umur peralatan boiler. Selain fenomena *swell* dan *shrink*, permasalahan level air drum boiler juga dipengaruhi oleh ketidakpastian pengukuran yang disebabkan oleh variasi densitas fluida akibat perubahan tekanan dan temperatur. Sensor level berbasis diferensial tekanan sangat sensitif terhadap perubahan kondisi termodinamika, sehingga dapat menghasilkan pembacaan level yang bias. Kesalahan pengukuran ini berpotensi menyebabkan aksi kendali yang tidak proporsional dan memperburuk fluktuasi level drum[17].

Permasalahan lain yang sering muncul adalah keterlambatan respons sistem (*time delay*) antara perubahan aliran air umpan dan perubahan level aktual di dalam drum. Dinamika lambat ini disebabkan oleh volume drum yang besar serta waktu yang dibutuhkan air untuk bersirkulasi melalui pipa riser dan downcomer. Akibatnya, sistem kendali cenderung mengalami *overshoot* atau osilasi jika parameter pengendali tidak dituning secara tepat[11].

Pada kondisi operasi fleksibel PLTU modern, perubahan beban yang cepat dan berulang memperparah permasalahan level drum boiler. Operasi fleksibel

meningkatkan frekuensi gangguan proses dan memperbesar amplitudo *swell–shrink,* sehingga sistem kendali konvensional sering kali bekerja mendekati batas kestabilannya. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa kondisi ini menjadi salah satu penyebab utama meningkatnya frekuensi alarm level drum pada PLTU besar.

Permasalahan level air juga berkaitan erat dengan ketidakseimbangan antara aliran air umpan dan aliran uap keluar. Gangguan pada sistem feedwater, seperti fluktuasi tekanan pompa atau karakteristik katup kontrol yang nonlinier, dapat menyebabkan deviasi level yang signifikan. Jika tidak dikompensasi dengan baik, kondisi ini dapat memicu ketidakstabilan level drum meskipun beban turbin relatif konstan[18].

Dengan kompleksitas permasalahan tersebut, pengendalian level air drum boiler memerlukan strategi kendali yang mampu memisahkan efek *swell–shrink* dari perubahan massa air yang sebenarnya. Oleh karena itu, pendekatan kendali multivariabel seperti *two element* dan *three element control* menjadi solusi yang banyak direkomendasikan dalam penelitian lima tahun terakhir karena mampu meningkatkan stabilitas dan mengurangi risiko trip unit akibat gangguan level drum[12].

2.2 Sistem Kendali

Sistem kendali dirancang untuk menjaga level air dalam batas aman selama berbagai kondisi operasi. Sistem ini harus mampu mengatasi gangguan akibat perubahan beban, tekanan, dan aliran uap. Oleh karena itu, strategi kendali yang digunakan harus mempertimbangkan dinamika kompleks drum boiler[19].

Single element control merupakan metode paling sederhana yang hanya menggunakan sinyal level drum sebagai masukan. Metode ini efektif pada kondisi beban stabil, namun kurang responsif terhadap perubahan beban yang cepat. Keterbatasan ini membuat single element control jarang digunakan pada PLTU modern[20].

Two element control menambahkan sinyal aliran uap sebagai variabel pengendali tambahan. Dengan mempertimbangkan laju konsumsi uap, sistem ini mampu memberikan respons yang lebih baik terhadap perubahan beban. Namun,

metode ini masih memiliki keterbatasan dalam menghadapi gangguan dari sisi aliran air umpan[17].

Three element control merupakan metode yang paling banyak diterapkan pada PLTU besar. Sistem ini menggunakan tiga variabel utama, yaitu level drum, aliran uap, dan aliran air umpan. Dengan pendekatan ini, sistem kendali mampu memberikan kestabilan dan akurasi yang tinggi[21].

Pemilihan jenis sistem kendali level drum boiler harus disesuaikan dengan kapasitas unit, karakteristik beban, dan tingkat keandalan yang diinginkan. Evaluasi kinerja masing-masing metode menjadi penting untuk menentukan strategi kendali yang paling optimal[22].

2.2.1 Pengertian Sistem Kendali

Sistem kendali adalah suatu sistem yang dirancang untuk mengatur dan mempertahankan variabel proses agar berada pada nilai yang diinginkan (setpoint) meskipun terjadi gangguan dari luar. Sistem kendali bekerja dengan membandingkan nilai keluaran aktual dengan setpoint, kemudian menghasilkan sinyal koreksi untuk mengurangi selisih atau error yang terjadi[18].

Dalam konteks PLTU, sistem kendali digunakan untuk mengatur berbagai parameter penting seperti tekanan, temperatur, aliran, dan level. Sistem kendali level drum boiler secara khusus bertujuan menjaga ketinggian air pada batas aman agar proses pembangkitan berjalan stabil dan tidak menimbulkan risiko kerusakan peralatan

Secara konseptual, sistem kendali tidak hanya berfungsi mempertahankan variabel proses pada nilai setpoint, tetapi juga mengoptimalkan respons sistem terhadap gangguan dan perubahan kondisi operasi. Sistem kendali yang baik dirancang untuk memiliki kestabilan tinggi, respons cepat, serta kemampuan menekan kesalahan keadaan tunak. Dalam sistem industri kompleks seperti PLTU, karakteristik ini menjadi krusial karena gangguan proses dapat terjadi secara kontinu dan saling berinteraksi[23].

Perkembangan teknologi kendali industri dalam lima tahun terakhir

menunjukkan pergeseran dari sistem kendali konvensional menuju kendali berbasis digital dan terintegrasi. Implementasi *Distributed Control System* (DCS) memungkinkan pemantauan dan pengendalian variabel proses secara real time dengan tingkat akurasi yang tinggi. Integrasi ini meningkatkan kemampuan sistem kendali dalam merespons perubahan beban secara cepat dan menjaga stabilitas operasi pembangkit[24].

Dalam lingkungan PLTU, sistem kendali juga berperan sebagai lapisan proteksi awal terhadap kondisi operasi abnormal. Ketika variabel proses menyimpang dari batas aman, sistem kendali akan memberikan aksi koreksi atau sinyal alarm sebelum sistem proteksi bekerja. Peran preventif ini menjadikan sistem kendali sebagai faktor kunci dalam menjaga keselamatan peralatan dan kontinuitas operasi pembangkit.

Sistem kendali level drum boiler merupakan contoh penerapan kendali proses yang memiliki tingkat kompleksitas tinggi karena harus mengatasi dinamika nonlinier, keterlambatan waktu, serta gangguan multivariabel. Oleh karena itu, desain sistem kendali tidak hanya mempertimbangkan aspek regulasi level, tetapi juga interaksi dengan tekanan uap dan aliran air umpan. Pendekatan ini diperlukan agar sistem mampu menjaga kestabilan level drum dalam berbagai kondisi operasi, termasuk saat terjadi perubahan beban mendadak[25].

Selain menjaga kestabilan proses, sistem kendali pada PLTU modern juga diarahkan untuk mendukung efisiensi dan keandalan operasi jangka panjang. Sistem kendali yang dirancang dengan baik dapat mengurangi frekuensi trip unit, meminimalkan fluktuasi operasi, serta memperpanjang umur peralatan utama. Dengan demikian, sistem kendali tidak hanya dipandang sebagai alat regulasi, tetapi sebagai komponen strategis dalam peningkatan kinerja dan keandalan PLTU secara keseluruhan[22].

2.2.3 Klasifikasi Sistem Kendali

A. Sistem Kendali Loop Terbuka

Sistem kendali loop terbuka adalah sistem kendali yang tidak menggunakan umpan balik dari keluaran sistem. Aksi kendali dilakukan berdasarkan perintah awal tanpa mempertimbangkan hasil aktual dari proses. Sistem ini memiliki

struktur sederhana, namun kurang mampu mengatasi gangguan dan perubahan kondisi operasi sehingga jarang digunakan pada sistem kritis seperti boiler PLTU[26].

Pada sistem kendali loop terbuka, aksi pengendalian sepenuhnya ditentukan oleh sinyal masukan tanpa mempertimbangkan kondisi aktual keluaran proses. Karakteristik ini menyebabkan sistem tidak memiliki kemampuan koreksi otomatis apabila terjadi gangguan atau perubahan parameter proses. Akibatnya, performa sistem sangat bergantung pada ketepatan perancangan awal dan asumsi bahwa kondisi operasi relatif konstan[21].

Keunggulan utama sistem kendali loop terbuka terletak pada kesederhanaan struktur dan kemudahan implementasi. Sistem ini tidak memerlukan sensor umpan balik atau algoritma koreksi yang kompleks, sehingga biaya instalasi dan pemeliharaannya relatif rendah. Namun, kesederhanaan tersebut menjadi kelemahan utama ketika sistem dihadapkan pada lingkungan operasi yang dinamis dan penuh ketidakpastian seperti pada PLTU[25].

Dalam aplikasi industri modern, sistem kendali loop terbuka umumnya hanya digunakan pada proses-proses nonkritis atau sebagai bagian dari sistem bantu (auxiliary system), seperti pengaturan urutan start-up atau pengendalian berbasis waktu. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan loop terbuka pada proses utama pembangkitan dapat meningkatkan risiko deviasi parameter operasi dan menurunkan tingkat keselamatan sistem[18].

Pada sistem boiler PLTU, ketidakmampuan sistem loop terbuka dalam mengompensasi gangguan beban uap, fluktuasi tekanan, dan variasi aliran air umpan menjadikannya tidak sesuai untuk pengendalian level drum. Studi empiris menyatakan bahwa tanpa umpan balik, sistem tidak mampu membedakan antara perubahan level semu akibat fenomena *swell–shrink* dan perubahan level aktual, sehingga berpotensi menyebabkan aksi kendali yang tidak tepat

Oleh karena itu, sistem kendali loop terbuka lebih tepat dipandang sebagai pendekatan dasar dalam teori kendali dibandingkan sebagai solusi praktis pada sistem kritis PLTU. Dalam praktiknya, sistem ini sering dijadikan pembanding konseptual untuk menegaskan keunggulan sistem kendali loop tertutup dalam

menjaga stabilitas, keselamatan, dan keandalan operasi pembangkit listrik[27].

B. Sistem Kendali Loop Tertutup

Sistem kendali loop tertutup menggunakan umpan balik dari variabel proses untuk menyesuaikan aksi kendali secara terus-menerus. Dengan adanya umpan balik, sistem dapat mengoreksi kesalahan yang timbul akibat gangguan atau perubahan beban. Sistem ini lebih andal dan umum digunakan dalam pengendalian level drum boiler karena mampu menjaga stabilitas operasi dalam berbagai kondisi beban[20].

Sistem kendali loop tertutup bekerja dengan membandingkan nilai keluaran aktual yang diperoleh dari sensor dengan nilai referensi atau setpoint, kemudian menghasilkan sinyal koreksi berdasarkan selisih (error) yang terjadi. Mekanisme umpan balik ini memungkinkan sistem secara otomatis menyesuaikan aksi kendali untuk meminimalkan error, sehingga performa pengendalian menjadi lebih stabil dan adaptif terhadap gangguan proses[19].

Keunggulan utama sistem kendali loop tertutup adalah kemampuannya dalam meningkatkan ketahanan sistem terhadap gangguan eksternal dan ketidakpastian parameter proses. Pada sistem industri seperti PLTU, gangguan berupa fluktuasi beban, variasi tekanan, dan perubahan karakteristik peralatan merupakan kondisi yang tidak dapat dihindari. Sistem loop tertutup mampu mengoreksi deviasi ini secara real time, sehingga menjaga variabel proses tetap berada dalam batas operasi yang aman[23].

Dalam pengendalian level drum boiler, sistem loop tertutup memiliki peran krusial karena dinamika sistem yang bersifat nonlinier dan memiliki keterlambatan waktu. Umpan balik level memungkinkan sistem mendeteksi perubahan level aktual dan memberikan aksi koreksi yang sesuai, meskipun terjadi fenomena *swell* dan *shrink*. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa sistem loop tertutup dengan struktur pengendalian yang tepat mampu menekan osilasi level dan meningkatkan stabilitas operasi boiler[15]

Implementasi sistem kendali loop tertutup pada PLTU modern umumnya terintegrasi dalam *Distributed Control System* (DCS) yang memungkinkan

pemantauan dan pengendalian multivariabel secara simultan. Integrasi ini meningkatkan keandalan sistem kendali karena memungkinkan koordinasi antar subsistem, seperti boiler, turbin, dan sistem feedwater. Dengan demikian, sistem loop tertutup tidak berfungsi sebagai pengendali lokal, tetapi juga sebagai bagian dari sistem pengendalian pembangkit secara menyeluruh[17].

Meskipun memiliki banyak keunggulan, sistem kendali loop tertutup tetap memerlukan perancangan dan penalaan yang tepat agar tidak menimbulkan ketidakstabilan. Parameter pengendali yang tidak sesuai dapat menyebabkan *overshoot* atau osilasi berlebih, terutama pada sistem dengan dinamika lambat seperti drum boiler. Oleh karena itu, evaluasi dan optimasi kinerja sistem kendali loop tertutup menjadi aspek penting dalam meningkatkan keandalan dan keselamatan operasi PLTU[21].

2.3 Sistem Kendali Level Drum Boiler

2.3.1 Single Element Control

Single element control merupakan metode pengendalian level drum yang hanya menggunakan satu variabel, yaitu level air drum. Metode ini mengatur aliran feedwater berdasarkan selisih antara level aktual dan setpoint. Meskipun sederhana, metode ini kurang efektif dalam menghadapi perubahan beban yang cepat karena tidak mempertimbangkan laju aliran uap keluar.

Single element control bekerja dengan prinsip umpan balik tunggal, di mana sinyal level air drum digunakan sebagai satu-satunya dasar pengambilan keputusan kendali. Perubahan level air akan langsung direspons oleh pengendali dengan mengatur bukaan katup feedwater untuk mengembalikan level ke nilai setpoint. Struktur kendali yang sederhana ini menjadikan single element control mudah diimplementasikan dan relatif stabil pada kondisi operasi dengan beban yang konstan[19].

Namun, keterbatasan utama *single element control* terletak pada ketidakmampuannya membedakan antara perubahan level aktual dan perubahan level semu akibat fenomena *swell* dan *shrink*. Pada saat terjadi perubahan beban uap yang cepat, level air drum dapat meningkat atau menurun secara sementara

tanpa perubahan massa air yang signifikan. Kondisi ini sering menyebabkan pengendali memberikan aksi yang tidak tepat, sehingga memperbesar fluktuasi level dan menurunkan kualitas pengendalian[18].

Penelitian lima tahun terakhir menunjukkan bahwa performa single element control sangat dipengaruhi oleh dinamika sistem dan karakteristik beban. Pada boiler dengan kapasitas kecil atau sistem dengan variasi beban yang lambat, metode ini masih dapat memberikan kinerja yang dapat diterima. Namun, pada PLTU skala menengah hingga besar yang beroperasi dalam kondisi beban dinamis, metode ini cenderung menghasilkan *overshoot* dan osilasi level yang signifikan.

Selain itu, *single element control* juga tidak mampu mengantisipasi gangguan yang berasal dari sisi aliran uap maupun fluktuasi feedwater. Ketergantungan pada satu variabel umpan balik membuat sistem kurang robust terhadap ketidakpastian proses. Studi empiris menunjukkan bahwa sistem dengan single element control memiliki kecenderungan frekuensi alarm level yang lebih tinggi dibandingkan sistem dengan kendali multivariabel[25].

Berdasarkan keterbatasan tersebut, single element control saat ini lebih banyak digunakan sebagai solusi sementara atau pada kondisi operasi tertentu, seperti saat start-up atau operasi beban rendah. Dalam praktik PLTU modern, metode ini umumnya digantikan atau dilengkapi dengan two element atau *three element control* untuk meningkatkan stabilitas, keselamatan, dan keandalan operasi pembangkit[21].

2.3.2 Two Element Control

Two element control menggunakan dua variabel masukan, yaitu level air drum dan aliran uap. Dengan menambahkan informasi aliran uap, sistem kendali dapat merespons perubahan beban dengan lebih baik dibandingkan single element control. Metode ini cukup efektif untuk boiler berkapasitas menengah dengan variasi beban yang tidak terlalu ekstrem.

Two element control merupakan pengembangan dari single element control dengan menambahkan variabel aliran uap sebagai sinyal umpan maju

(*feedforward*). Pada metode ini, sinyal aliran uap digunakan untuk mengantisipasi perubahan beban, sementara sinyal level drum tetap berfungsi sebagai umpan balik utama. Kombinasi ini memungkinkan sistem kendali merespons perubahan beban uap secara lebih cepat sebelum deviasi level air menjadi signifikan[28].

Keunggulan utama *two element control* terletak pada kemampuannya dalam mengurangi dampak fenomena *swell* dan *shrink*. Dengan memanfaatkan informasi aliran uap, sistem kendali dapat membedakan antara perubahan level semu dan perubahan massa air aktual. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu menurunkan amplitudo fluktuasi level drum secara signifikan dibandingkan single element control, terutama pada kondisi transien akibat perubahan beban.[21].

Dalam implementasinya, *two element control* umumnya digunakan pada boiler dengan kapasitas menengah yang mengalami variasi beban moderat. Sistem ini memberikan kompromi antara kompleksitas dan kinerja, karena hanya memerlukan satu sensor tambahan dibandingkan single element control. Namun demikian, kinerjanya masih sangat bergantung pada akurasi pengukuran aliran uap dan karakteristik dinamika sistem boiler[29].

Keterbatasan *two element control* muncul ketika terjadi gangguan signifikan pada sisi aliran air umpan, seperti fluktuasi tekanan pompa feedwater atau perubahan karakteristik katup kontrol. Karena sistem ini belum mempertimbangkan aliran air umpan sebagai variabel pengendali, gangguan tersebut dapat menyebabkan deviasi level drum yang cukup besar. Studi empiris menunjukkan bahwa pada kondisi ini, *two element control* cenderung mengalami keterlambatan koreksi level[20].

Meskipun memiliki keterbatasan, *two element control* masih banyak diterapkan sebagai solusi transisi menuju sistem kendali yang lebih kompleks. Pada beberapa PLTU, metode ini digunakan sebagai cadangan atau mode operasi alternatif ketika sensor aliran air umpan mengalami gangguan. Namun, untuk PLTU berkapasitas besar dengan tuntutan keandalan tinggi, *two element control* umumnya dikombinasikan atau digantikan oleh *three element control*[20].

2.3.3 Three Element Control

Three element control merupakan metode pengendalian yang paling lengkap karena menggunakan tiga variabel, yaitu level air drum, aliran uap, dan aliran feedwater. Metode ini mampu mengkompensasi gangguan secara lebih akurat dan memberikan kestabilan yang lebih baik, sehingga banyak digunakan pada PLTU berkapasitas besar dengan tuntutan keandalan tinggi[28].

Berikut pengembangan teori lanjutan untuk Subbab 2.4.3 Three Element Control, disusun ilmiah, sistematis, dan kritis, serta diperkuat dengan kutipan 5 tahun terakhir, sehingga selaras dengan konteks pengendalian level drum boiler PLTU:

1. *Three element control* merupakan strategi pengendalian multivariabel yang mengombinasikan umpan balik (*feedback*) dan umpan maju (*feedforward*) secara simultan. Pada metode ini, sinyal level air drum digunakan sebagai variabel umpan balik utama, sementara sinyal aliran uap dan aliran feedwater digunakan untuk mengantisipasi perubahan beban dan gangguan proses. Kombinasi ketiga variabel ini memungkinkan sistem kendali merespons gangguan secara cepat dan akurat sebelum deviasi level air menjadi signifikan
2. Keunggulan utama *three element control* terletak pada kemampuannya dalam memisahkan efek perubahan beban uap dan gangguan feedwater terhadap level drum. Dengan mempertimbangkan keseimbangan massa antara aliran masuk dan aliran keluar, sistem kendali dapat membedakan antara perubahan level semu akibat fenomena *swell–shrink* dan perubahan level aktual. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa metode ini secara signifikan mampu menurunkan osilasi level drum dan meningkatkan stabilitas operasi boiler dibandingkan metode single dan *two element control* [28].

Dalam implementasi industri, *three element control* banyak diterapkan pada PLTU berkapasitas besar yang beroperasi dalam kondisi beban dinamis dan fleksibel. beradaptasi terhadap perubahan beban yang cepat dan berulang. Studi

empiris lima tahun terakhir menunjukkan bahwa *three element control* mampu mempertahankan level drum dalam batas aman meskipun terjadi fluktuasi beban yang ekstrem, sehingga mengurangi risiko trip unit.

Meskipun menawarkan kinerja yang unggul, *three element control* memiliki tingkat kompleksitas yang lebih tinggi dibandingkan metode lainnya. Keberhasilan implementasi sangat bergantung pada akurasi sensor aliran uap dan feedwater serta sinkronisasi sinyal kendali. Kesalahan pengukuran atau keterlambatan sinyal dapat memengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, sistem ini umumnya diintegrasikan dalam *Distributed Control System* (DCS) dengan tingkat redundansi sensor yang tinggi untuk meningkatkan keandalan[25].

Dengan mempertimbangkan kinerja dan kompleksitasnya, *three element control* saat ini dipandang sebagai standar industri dalam pengendalian level drum boiler PLTU modern. Metode ini tidak hanya meningkatkan kestabilan dan keselamatan operasi, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi dan keandalan pembangkit secara keseluruhan. Oleh karena itu, *three element control* menjadi fokus utama dalam analisis kinerja sistem kendali level drum boiler pada penelitian ini[26].

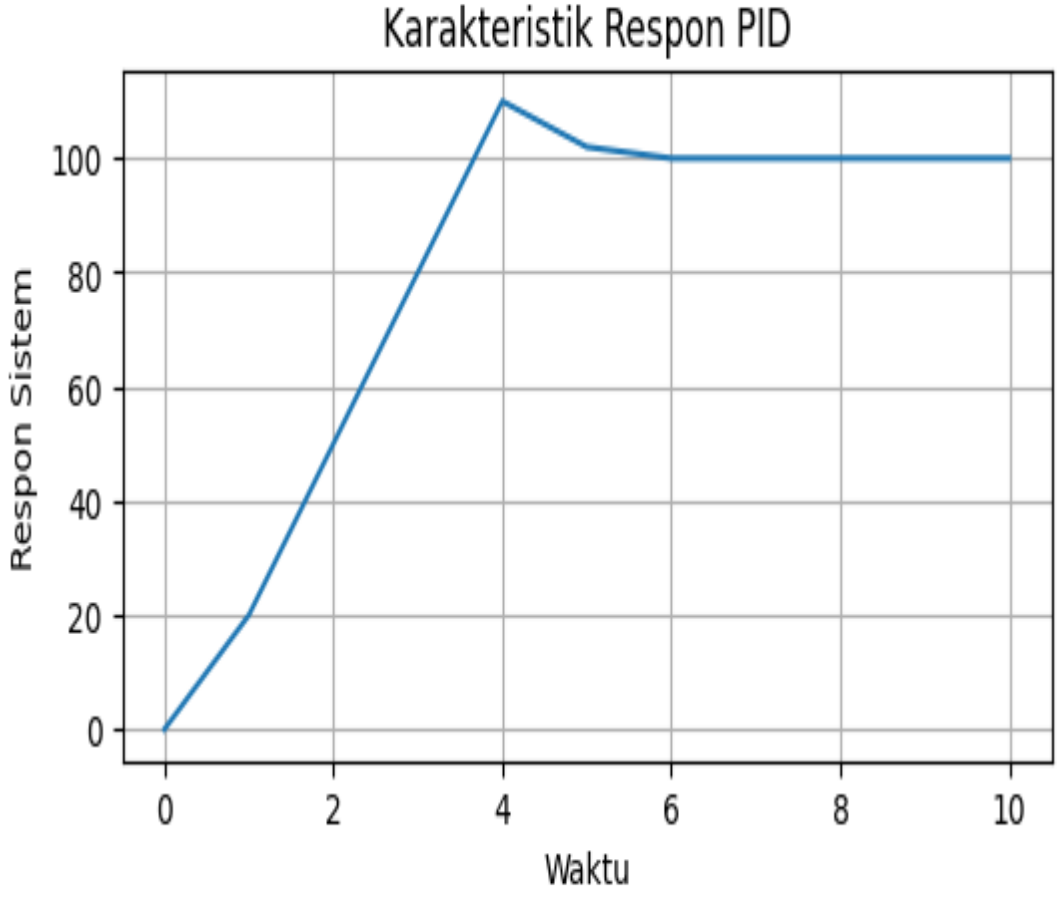
2.4 Pengendali *PID*

Pengendali *PID* merupakan jenis pengendali yang paling umum digunakan dalam sistem industri karena strukturnya yang sederhana dan efektif. Pengendaliini terdiri dari tiga komponen utama, yaitu proporsional, integral, dan derivatif. Kombinasi ketiganya memungkinkan pengendalian yang stabil dan responsive.

Aksi proporsional berfungsi mempercepat respons sistem terhadap kesalahan. Aksi integral digunakan untuk menghilangkan kesalahan keadaan tunak, sedangkan aksi derivatif berfungsi meredam osilasi. Pengaturan ketiga parameter ini sangat menentukan kinerja sistem kendali (Ogata, 2021). Parameter P, I, dan D harus ditentukan melalui proses penalaan (tuning) agar sesuai dengan karakteristik plant. Penalaan yang tidak tepat dapat menyebabkan *overshoot*

berlebih atau respons yang lambat. Oleh karena itu, metode penalaan yang sistematis sangat diperlukan.

Berbagai metode penalaan *PID* telah dikembangkan, mulai dari metode klasik hingga metode berbasis optimasi dan kecerdasan buatan. Metode modern menawarkan kinerja yang lebih baik dalam menghadapi sistem nonlinier seperti drum boiler (Chen *et al*., 2023). Dalam sistem kendali level drum boiler, pengendali *PID* harus mampu menangani dinamika lambat dan gangguan yang signifikan. Evaluasi kinerja *PID* menjadi aspek penting dalam menjamin stabilitas dan keandalan operasi PLTU[20].



Gambar 2. 2 Karakteristik Respon *PID*

Pengendali *PID* menghasilkan sinyal kendali u(t) yang dikirim ke *control valve* berdasarkan akumulasi perhitungan nilai *error* (t). Nilai *error* didefinisikan sebagai selisih antara *setpoint* (SP) level dan nilai aktual (PV) level drum:

$$e(t) = SP(t) - PV(t)$$

Persamaan matematis pengendali *PID* dalam domain waktu kontinu adalah:

$$u(t) = \text{Kp e(t)} + \text{Ki} \int_0^t e(T)dT + Kd \frac{de(t)}{dt}$$

Atau sering dituliskan dalam parameter waktu integrasi (Ti) dan waktu derivatif (T_d):

$$u(t) = Kp\,[\, e(t) + \frac{1}{Ti}\int_0^t e(t)dT + Td\,\frac{de(t)}{dt}$$

Untuk diimplementasikan pada komputer digital/DCS, persamaan tersebut ditransformasikan ke dalam domain-S (Laplace) menggunakan Fungsi Transfer Gc(s):

$$Gc(s) = \frac{U(s)}{E\,(s)} = Kp + \frac{Ki}{s}Kd.s = Kp(1 + \frac{1}{Ti\,.s} + Td.s$$

Penjabaran peran masing-masing komponen rumus:

1. Aksi Proporsional (Kp): Memberikan koreksi langsung yang sebanding dengan nilai *error* saat ini. Jika terlalu besar akan memicu *overshoot* dan osilasi.
2. Aksi Integral (Ki atau 1/Ti): Mengakumulasikan *error* dari waktu ke waktu untuk mengeliminasi kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*). Namun, integral yang terlalu agresif dapat memperlambat *Settling time* dan memicu gejala *integral windup*.
3. Aksi Derivatif (Kd atau Td): Memprediksi arah pergerakan *error* dengan mengukur laju perubahannya, berfungsi sebagai redaman untuk menekan *overshoot* yang besar.

2.4.1 Prinsip Kerja Pengendali PID

Pengendali *PID (Proportional–Integral–Derivative)* adalah algoritma kendali yang mengombinasikan tiga aksi kendali untuk menghasilkan respons

sistem yang cepat dan stabil. Aksi proporsional bereaksi terhadap besar error, aksi integral menghilangkan *error steady-state*, dan aksi derivatif berfungsi meredam perubahan error yang terlalu cepat. Kombinasi ketiganya menjadikan *PID* sangat populer di sistem industry.

Secara matematis, pengendali *PID* menghasilkan sinyal kendali berdasarkan kombinasi linier dari error, integral error terhadap waktu, dan turunan error. Formulasi ini memungkinkan pengendali merespons baik kondisi transien maupun keadaan tunak sistem. Aksi proporsional memberikan respons langsung terhadap besar penyimpangan, aksi integral memastikan *error steady-state* diminimalkan, sedangkan aksi derivatif meningkatkan stabilitas dengan mengantisipasi kecenderungan perubahan error.

Dalam sistem industri dengan dinamika kompleks seperti drum boiler, pengendali *PID* berperan sebagai kompensator dinamis yang mampu menyeimbangkan kecepatan respons dan kestabilan sistem. Penelitian lima tahun terakhir menunjukkan bahwa *PID* masih menjadi pilihan utama pada PLTU karena kemudahannya dalam implementasi serta kompatibilitasnya dengan sistem kendali digital seperti *Distributed Control System (DCS)*[19].

Pada pengendalian level drum boiler, *PID* harus mampu menangani dinamika lambat, keterlambatan waktu, serta gangguan yang bersifat multivariabel. Kombinasi aksi P, I, dan D memungkinkan pengendali merespons perubahan beban secara bertahap tanpa menimbulkan osilasi yang berlebihan. Studi empiris menunjukkan bahwa *PID* yang dituning dengan baik mampu menjaga level drum tetap stabil meskipun terjadi fluktuasi beban uap yang signifikan.

Perkembangan terbaru menunjukkan adanya peningkatan kinerja *PID* melalui integrasi dengan metode adaptif dan optimasi. Adaptive *PID* memungkinkan parameter pengendali berubah mengikuti kondisi operasi, sehingga meningkatkan fleksibilitas sistem kendali. Pendekatan ini dinilai efektif untuk sistem nonlinier seperti drum boiler yang karakteristiknya berubah seiring waktu operasi. Dengan mempertimbangkan keseimbangan antara kesederhanaan dan kinerja, pengendali *PID* tetap relevan sebagai solusi kendali utama dalam

PLTU modern. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai prinsip kerja *PID* menjadi dasar penting dalam analisis dan evaluasi kinerja sistem kendali level drum boiler[23].

2.4.2 Parameter P, I, dan D

Parameter P, I, dan D masing-masing memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik respons sistem. Nilai P yang terlalu besar dapat menyebabkan *overshoot* , nilai I yang berlebihan dapat menimbulkan osilasi, dan nilai D yang tidak tepat dapat memperbesar sensitivitas terhadap noise. Oleh karena itu, pemilihan parameter *PID* harus dilakukan secara hati-hati agar sistem tetap stabil

Parameter proporsional (P) berfungsi menentukan besar respons sistem terhadap error saat ini. Nilai P yang meningkat akan mempercepat respons sistem, namun jika terlalu besar dapat menyebabkan *overshoot* dan bahkan ketidakstabilan. Dalam sistem drum boiler yang memiliki dinamika lambat, penentuan nilai P harus mempertimbangkan keseimbangan antara kecepatan respons dan batas keselamatan operasi. Parameter integral (I) berperan dalam menghilangkan error steady-state dengan mengakumulasi error sepanjang waktu. Meskipun efektif dalam meningkatkan akurasi jangka panjang, aksi integral yang berlebihan dapat menyebabkan osilasi dan memperpanjang settling time. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pada sistem boiler, pengaturan integral yang moderat lebih disukai untuk menghindari fenomena integral windup[20].

Parameter derivatif (D) berfungsi sebagai peredam dengan merespons laju perubahan error. Aksi derivatif membantu mengurangi *overshoot* dan meningkatkan stabilitas sistem, terutama pada kondisi transien. Namun, karena sangat sensitif terhadap noise pengukuran, penerapan parameter D harus disertai dengan penyaringan sinyal yang memadai agar tidak menurunkan kualitas pengendalian.

Interaksi antara parameter P, I, dan D membentuk karakteristik respons sistem secara keseluruhan. Penalaan yang tidak tepat pada salah satu parameter dapat memengaruhi efektivitas parameter lainnya. Oleh karena itu, pendekatan penalaan *PID* modern cenderung mempertimbangkan parameter secara simultan

untuk mencapai kinerja optimal. Dalam konteks pengendalian level drum boiler, pemilihan parameter *PID* yang tepat sangat menentukan kestabilan dan keandalan operasi PLTU. Penelitian lima tahun terakhir menunjukkan bahwa penalaan *PID* berbasis optimasi dan simulasi memberikan hasil yang lebih konsisten dibandingkan metode trial-and-error, terutama dalam menghadapi kondisi operasi dinamis[22].

2.4.3 Metode Penalaan PID

Metode penalaan *PID* dapat dilakukan dengan pendekatan klasik seperti Ziegler-Nichols maupun metode modern berbasis optimasi dan kecerdasan buatan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa metode penalaan berbasis optimasi mampu memberikan performa yang lebih baik pada sistem nonlinier seperti drum boiler dibandingkan metode konvensional. Penalaan parameter *PID* bertujuan memperoleh kombinasi nilai proporsional, integral, dan derivatif yang menghasilkan respons sistem optimal sesuai kriteria kinerja tertentu, seperti waktu naik, *overshoot* , settling time, dan error steady-state. Pada sistem industri klasik, metode *Ziegler–Nichols* masih banyak digunakan karena kesederhanaannya, namun metode ini cenderung menghasilkan respons agresif dan kurang cocok untuk sistem nonlinier serta proses dengan keterlambatan waktu yang signifikan, seperti drum boiler[30].

Dalam lima tahun terakhir, pendekatan penalaan berbasis model semakin berkembang untuk meningkatkan kinerja *PID* pada sistem kompleks. Metode ini memanfaatkan model matematis proses untuk menyesuaikan parameter *PID* secara lebih presisi. Pada pengendalian level drum boiler, pendekatan berbasis model terbukti mampu mengurangi osilasi level akibat fenomena *swell* dan *shrink* dibandingkan metode konvensional.

Selain itu, metode optimasi numerik seperti Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), dan Differential Evolution (DE) banyak diterapkan untuk penalaan *PID*. Metode-metode ini bekerja dengan meminimalkan fungsi objektif yang merepresentasikan kesalahan sistem, seperti Integral of Absolute Error (IAE) atau Integral of Time-weighted Absolute Error

(ITAE). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa *PID* yang dituning menggunakan PSO mampu meningkatkan stabilitas dan ketahanan terhadap gangguan pada sistem drum boiler [24].

Pendekatan berbasis kecerdasan buatan juga menjadi perhatian utama dalam pengembangan sistem kendali modern. Metode seperti *Fuzzy Logic–based PID* dan *Neural Network–assisted PID* memungkinkan parameter kendali beradaptasi terhadap perubahan kondisi operasi secara real-time. Implementasi *PID* adaptif berbasis kecerdasan buatan terbukti efektif dalam mengatasi dinamika nonlinier dan variasi beban yang cepat pada PLTU.

Dengan mempertimbangkan kompleksitas sistem drum boiler dan tuntutan keandalan operasi PLTU, metode penalaan *PID* modern menjadi alternatif yang lebih unggul dibandingkan pendekatan klasik. Oleh karena itu, pemilihan metode penalaan yang tepat merupakan faktor kunci dalam memastikan kinerja optimal sistem kendali level drum boiler, terutama pada kondisi operasi dinamis dan tidak pasti[21].

2.5 Kinerja Sistem Kendali

Kinerja sistem kendali merupakan ukuran keberhasilan sistem dalam mencapai tujuan pengendalian. Parameter kinerja digunakan untuk mengevaluasi respons sistem terhadap perubahan set point dan gangguan. Analisis kinerja ini penting untuk memastikan sistem bekerja sesuai spesifikasi.

Rise time menunjukkan kecepatan sistem dalam mencapai nilai referensi pertama kali. *Settling time* menggambarkan waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai kondisi stabil. Kedua parameter ini mencerminkan respons dinamis system. *Overshoot* merupakan indikator seberapa besar keluaran sistem melampaui nilai set point. *Overshoot* yang berlebihan dapat berbahaya pada sistem industri seperti PLTU. Oleh karena itu, pengendalian *overshoot* menjadi perhatian utama dalam desain sistem kendali. *Steady state etror* menunjukkan selisih antara keluaran sistem dan set point pada kondisi tunak. Nilai error yang kecil menandakan akurasi sistem yang baik. Pengendali *PID* biasanya digunakan untuk meminimalkan parameter ini[22].

Evaluasi parameter kinerja sistem kendali level drum boiler memberikan gambaran objektif mengenai efektivitas strategi kendali yang diterapkan. Hasil evaluasi ini dapat digunakan sebagai dasar perbaikan system. Kinerja sistem kendali didefinisikan sebagai tingkat kemampuan sistem dalam mempertahankan variabel proses agar tetap berada pada nilai referensi meskipun terjadi gangguan maupun perubahan kondisi operasi. Evaluasi kinerja tidak hanya menilai kecepatan respons, tetapi juga stabilitas, akurasi, dan ketahanan terhadap gangguan. Dalam sistem industri berisiko tinggi seperti PLTU, analisis kinerja menjadi aspek krusial karena berkaitan langsung dengan keselamatan dan keandalan operasi.

Secara umum, parameter kinerja sistem kendali dibagi menjadi parameter respons transien dan parameter keadaan tunak. Respons transien menggambarkan perilaku sistem sejak terjadi perubahan input hingga mendekati kondisi stabil. Parameter seperti *Rise time* dan *Settling time* digunakan untuk mengukur dinamika awal sistem, terutama dalam menghadapi perubahan beban mendadak pada drum boiler[21].

Rise time menunjukkan waktu yang dibutuhkan keluaran sistem untuk pertama kali mencapai nilai referensi dalam rentang tertentu (umumnya 10–90%). Nilai *Rise time* yang terlalu lambat mengindikasikan respons sistem yang kurang tanggap terhadap perubahan beban. Pada pengendalian level drum boiler, respons yang lambat dapat menyebabkan deviasi level yang signifikan sebelum sistem mampu mengoreksi kesalahan. *Settling time* menggambarkan waktu yang diperlukan sistem untuk memasuki dan tetap berada dalam batas toleransi tertentu (misalnya ±2% atau ±5%) terhadap nilai set point. Parameter ini mencerminkan kestabilan sistem setelah terjadi gangguan. Dalam aplikasi PLTU, *Settling time* yang panjang dapat meningkatkan risiko fluktuasi level yang berulang, sehingga memengaruhi kontinuitas operasi pembangkit. *Overshoot* merupakan indikator sejauh mana respons sistem melampaui nilai referensi sebelum kembali menuju kondisi stabil. Meskipun *overshoot* kecil dapat ditoleransi, *overshoot* yang besar pada sistem drum boiler berpotensi menyebabkan kondisi level air yang melewati batas aman, baik terlalu tinggi maupun terlalu rendah. Penelitian terbaru menekankan bahwa desain sistem kendali industri modern harus menekan

overshoot tanpa mengorbankan kecepatan respons[22].

Selain parameter transien, *steady-state error* (SSE) digunakan untuk mengukur akurasi sistem pada kondisi tunak. SSE menunjukkan selisih antara keluaran aktual dan set point setelah respons sistem mencapai kestabilan. Nilai SSE yang kecil menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan variabel proses sesuai target dalam jangka panjang. Penggunaan aksi integral pada *PID* secara teoritis mampu mengeliminasi error steady-state, namun implementasinya tetap harus mempertimbangkan stabilitas keseluruhan system. Dalam evaluasi sistem kendali modern, analisis kinerja juga sering dilengkapi dengan indeks kinerja integral seperti Integral of Absolute Error (IAE), Integral of Squared Error (ISE), dan Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE). Indeks ini memberikan ukuran kuantitatif yang lebih komprehensif terhadap keseluruhan kesalahan sistem selama periode pengamatan. Studi lima tahun terakhir menunjukkan bahwa penggunaan indeks integral memberikan gambaran performa yang lebih objektif dibandingkan hanya mengandalkan parameter waktu[19].

Pada sistem kendali level drum boiler, evaluasi kinerja menjadi sangat penting karena dinamika sistem yang kompleks, nonlinier, serta dipengaruhi fenomena *swell* dan *shrink*. Oleh karena itu, analisis kinerja tidak hanya menilai respons terhadap perubahan set point, tetapi juga terhadap gangguan eksternal seperti fluktuasi beban uap dan variasi tekanan feedwater. Secara keseluruhan, evaluasi parameter kinerja sistem kendali memberikan dasar empiris untuk menentukan efektivitas strategi pengendalian yang diterapkan. Hasil analisis ini dapat digunakan sebagai acuan dalam melakukan penalaan ulang parameter *PID*, memilih metode kendali yang lebih sesuai, atau mengimplementasikan pendekatan adaptif guna meningkatkan keandalan operasi PLTU[16].

2.5.1 Parameter Kinerja Sistem Kendali

Parameter kinerja sistem kendali digunakan sebagai indikator kuantitatif untuk mengevaluasi kualitas respons sistem terhadap perubahan set point maupun gangguan eksternal. Parameter-parameter ini memberikan gambaran mengenai kecepatan, stabilitas, dan akurasi sistem dalam mencapai tujuan pengendalian.

Dalam sistem industri seperti PLTU, pemilihan parameter kinerja yang tepat sangat penting karena berhubungan langsung dengan keselamatan operasi dan keandalan peralatan[23].

Rise time didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai persentase tertentu dari nilai set point sejak kondisi awal, umumnya antara 10% hingga 90%. Parameter ini mencerminkan kecepatan awal respons sistem terhadap perubahan input. Pada pengendalian level drum boiler, *Rise time* yang terlalu lambat dapat menyebabkan keterlambatan koreksi level air, sedangkan *Rise time* yang terlalu cepat berpotensi menimbulkan respons agresif yang mengarah pada *overshoot. Settling time* adalah waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai dan mempertahankan keluaran dalam batas toleransi tertentu terhadap set point, biasanya ±2% atau ±5%. Parameter ini menunjukkan tingkat kestabilan sistem setelah fase transien berlalu. Dalam konteks PLTU, *Settling time* yang singkat diinginkan agar sistem kendali level drum cepat mencapai kondisi stabil setelah terjadi gangguan beban, sehingga fluktuasi level air dapat diminimalkan.

Overshoot menggambarkan besarnya respons sistem yang melampaui nilai set point sebelum akhirnya menuju kondisi stabil. *Overshoot* yang besar pada sistem drum boiler dapat berbahaya karena berpotensi menyebabkan level air melewati batas operasi aman. Oleh karena itu, pengendalian *overshoot* menjadi salah satu fokus utama dalam desain dan penalaan sistem kendali, terutama pada boiler berkapasitas besar dengan dinamika nonlinier.

Steady-state error merupakan selisih antara keluaran sistem dan set point ketika sistem telah mencapai kondisi tunak. Parameter ini mencerminkan akurasi jangka panjang sistem kendali. Nilai *steady-state error* yang kecil menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan variabel proses sesuai dengan nilai yang diinginkan dalam jangka waktu lama. Penggunaan aksi integral pada pengendali *PID* secara teoritis dapat menghilangkan error steady-state, namun tetap memerlukan penalaan yang tepat agar tidak mengorbankan stabilitas sistem[28].

Secara keseluruhan, keempat parameter kinerja tersebut saling berkaitan dan tidak dapat dievaluasi secara terpisah. Peningkatan satu parameter sering kali

memengaruhi parameter lainnya, sehingga diperlukan kompromi desain dalam menentukan kinerja optimal sistem kendali. Penelitian lima tahun terakhir menunjukkan bahwa evaluasi kinerja berbasis parameter transien dan keadaan tunak memberikan dasar yang kuat dalam menilai efektivitas strategi kendali level drum boiler pada PLTU modern[11].

2.6 Keandalan Operasi PLTU

Keandalan sistem didefinisikan sebagai probabilitas suatu sistem dapat beroperasi dengan baik dalam periode waktu tertentu. Dalam PLTU, keandalan berkaitan langsung dengan kontinuitas pasokan listrik. Gangguan kecil pada sistem dapat berdampak luas pada jaringan Listrik.

Keandalan operasi PLTU dipengaruhi oleh kondisi peralatan, sistem kendali, dan prosedur operasi. Sistem kendali yang andal mampu mencegah kondisi abnormal sebelum berkembang menjadi kegagalan besar. Oleh karena itu, sistem kendali berperan sebagai lapisan proteksi pertama[30].

Hubungan antara sistem kendali dan keandalan operasi sangat erat, terutama pada subsistem kritis seperti boiler. Kendali level drum boiler yang burukmenyebabkan trip unit dan kerusakan peralatan. Hal ini menurunkan nilai availability pembangkit. Peningkatan keandalan PLTU dapat dicapai melalui evaluasi dan optimasi sistem kendali secara berkala. Analisis data historis operasi menjadi alat penting dalam mengidentifikasi kelemahan sistem. Pendekatan ini sejalan dengan konsep *predictive maintenance*. Dengan demikian, analisis kinerja sistem kendali level drum boiler merupakan langkah strategis dalam meningkatkan keandalan operasi PLTU. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi nyata dalam bidang ketenagalistrikan[22].

2.6.1 Konsep Keandalan Sistem

Keandalan sistem didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem untuk beroperasi tanpa kegagalan dalam jangka waktu tertentu. Dalam PLTU, keandalan sangat dipengaruhi oleh performa sistem kendali karena kegagalan pengendalian

dapat menyebabkan gangguan operasi hingga penghentian unit pembangkit.

Keandalan sistem (*system reliability*) didefinisikan sebagai probabilitas suatu sistem mampu menjalankan fungsinya sesuai spesifikasi dalam interval waktu tertentu dan pada kondisi operasi yang telah ditentukan. Secara matematis, keandalan sering dinyatakan sebagai fungsi probabilitas terhadap waktu kegagalan dan berkaitan erat dengan laju kegagalan (*failure rate*) serta *Mean Time Between Failures (MTBF)*. Dalam konteks pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), keandalan tidak hanya dipengaruhi oleh kualitas peralatan mekanis, tetapi juga oleh integritas sistem kendali yang mengatur parameter secara kontinu. Sistem kendali yang tidak stabil dapat memicu deviasi tekanan, temperatur, dan level air yang berujung pada kondisi tidak aman atau bahkan *unit trip*. Oleh karena itu, keandalan operasional PLTU merupakan hasil interaksi antara sistem fisik dan sistem kendali[29].

Pendekatan modern terhadap keandalan sistem menekankan integrasi antara *reliability engineering* dan *control engineering*. Sistem kendali dipandang sebagai lapisan proteksi aktif yang mencegah peralatan bekerja di luar batas desainnya. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa peningkatan performa kendali dapat secara langsung menurunkan probabilitas kegagalan komponen kritis akibat beban termal dan mekanis yang berlebihan. Pada sistem boiler, khususnya drum boiler, keandalan sangat dipengaruhi oleh kestabilan pengendalian level air. Level yang terlalu rendah dapat menyebabkan overheating pada pipa boiler, sedangkan level yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan carryover uap yang merusak turbin. Kedua kondisi tersebut berpotensi mempercepat degradasi peralatan dan menurunkan keandalan sistem secara keseluruhan[14].

Selain itu, tren operasi fleksibel pada PLTU modern—yang menuntut pembangkit beroperasi dalam rentang beban dinamis—meningkatkan tantangan terhadap keandalan sistem. Sistem kendali yang tidak adaptif terhadap perubahan beban cepat berpotensi meningkatkan frekuensi gangguan operasional. Oleh karena itu, peningkatan kualitas sistem kendali menjadi salah satu strategi utama dalam menjaga keandalan jangka panjang pembangkit.

2.6.2 Hubungan Sistem Kendali terhadap Keandalan Operasi

Sistem kendali yang memiliki kinerja baik mampu menjaga parameter operasi tetap dalam batas aman sehingga mengurangi risiko kegagalan peralatan. Pengendalian level drum yang stabil berkontribusi langsung terhadap peningkatan keandalan PLTU dengan meminimalkan kejadian trip dan memperpanjang umur komponen utama. Sistem kendali berperan sebagai mekanisme utama dalam menjaga parameter operasi tetap berada dalam batas aman. Kinerja sistem kendali yang baik—ditunjukkan oleh respons cepat, *overshoot* rendah, dan error tunak minimal—secara langsung mengurangi tekanan termal dan mekanis pada komponen utama. Dengan demikian, sistem kendali tidak hanya berfungsi menjaga stabilitas proses, tetapi juga melindungi umur peralatan[21].

Dalam pengendalian level drum boiler, kestabilan respons terhadap perubahan beban sangat menentukan keberlangsungan operasi unit. Fluktuasi level yang berulang dapat memicu sistem proteksi bekerja dan menyebabkan *trip*. Penelitian lima tahun terakhir menunjukkan bahwa peningkatan performa kendali level mampu menurunkan frekuensi trip unit serta meningkatkan nilai availability pembangkit secara signifikan. Hubungan antara kinerja kendali dan keandalan juga dapat dianalisis melalui pendekatan risiko operasional. Sistem kendali dengan *Settling time* panjang atau *overshoot* besar meningkatkan probabilitas operasi di luar batas desain. Kondisi ini memperbesar risiko kegagalan prematur pada komponen seperti feedwater pump, valve control, dan pipa boiler[28].

Selain itu, integrasi sistem kendali modern dengan *Distributed Control System (DCS)* dan sistem monitoring berbasis data memungkinkan deteksi dini anomali proses. Pendekatan ini meningkatkan keandalan dengan meminimalkan gangguan yang tidak terdeteksi. Studi terbaru menegaskan bahwa kombinasi kendali yang stabil dan sistem pemantauan prediktif mampu memperpanjang umur operasional PLTU secara keseluruhan. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa sistem kendali bukan sekadar elemen pendukung, melainkan faktor strategis dalam menjaga keandalan operasi PLTU. Pengendalian level drum yang stabil dan responsif berkontribusi langsung terhadap penurunan risiko kegagalan, peningkatan availability, serta keberlanjutan operasi pembangkit dalam jangka panjang.

2.7 Penelitian Terkait

Berbagai penelitian telah dilakukan terkait sistem kendali level drum boiler menggunakan pengendali *PID*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penalaan *PID* yang tepat dapat meningkatkan stabilitas sistem secara signifikan (Singh *et al.*, 2021), Penelitian lain mengkaji perbandingan antara single, two, dan three element control. Hasilnya menunjukkan bahwa *three element control* memberikan kinerja terbaik pada kondisi beban dinamis. Studi terbaru mengintegrasikan metode optimasi untuk penalaan *PID* pada drum boiler. Pendekatan ini mampu mengurangi *overshoot* dan *Settling time* secara signifikan, Beberapa penelitian juga menyoroti hubungan antara kinerja sistem kendali dan keandalan operasi PLTU. Sistem kendali yang stabil terbukti mengurangi frekuensi gangguan operasi[21].

Berdasarkan penelitian terdahulu, masih terdapat peluang untuk melakukan analisis kinerja sistem kendali level drum boiler dalam konteks keandalan operasi PLTU. Hal ini menjadi dasar kuat bagi penelitian ini. Berikut pengembangan Subbab 2.8 Penelitian Terkait, disusun lebih kritis, komparatif, dan analitis dengan rujukan 5 tahun terakhir, serta diarahkan untuk memperkuat posisi dan urgensi penelitian Anda. Penelitian mengenai sistem kendali level drum boiler telah berkembang signifikan dalam lima tahun terakhir, khususnya dalam penerapan pengendali *PID* sebagai strategi utama di lingkungan PLTU. Studi yang dilakukan oleh Singh et a menunjukkan bahwa performa pengendalian level sangat dipengaruhi oleh kualitas penalaan parameter *PID*. Penelitian tersebut membuktikan bahwa tuning yang optimal mampu menurunkan osilasi level drum serta meningkatkan kestabilan sistem pada kondisi transien. Namun demikian, penelitian tersebut masih berfokus pada evaluasi parameter waktu tanpa mengaitkannya secara langsung dengan indikator keandalan operasional.

Selanjutnya, Liu *et al* melakukan kajian komparatif antara single element, two element, dan *three element control* pada sistem drum boiler. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *three element control* memberikan respons paling stabil pada kondisi beban dinamis karena mempertimbangkan keseimbangan massa antara aliran uap dan feedwater. Meskipun demikian, penelitian tersebut lebih

menekankan pada perbandingan arsitektur kendali dan belum mengintegrasikan analisis mendalam terhadap parameter kinerja seperti IAE atau ITAE. Perkembangan berikutnya terlihat pada penelitian Chen *et al* yang mengintegrasikan metode optimasi berbasis algoritma cerdas untuk penalaan *PID*. Hasilnya menunjukkan penurunan signifikan pada *overshoot* dan *Settling time* dibandingkan metode konvensional. Pendekatan ini efektif dalam menghadapi karakteristik nonlinier drum boiler, terutama akibat fenomena *swell* dan *shrink*. Namun, fokus penelitian masih terbatas pada aspek performa dinamis tanpa mengevaluasi dampaknya terhadap keberlanjutan operasi jangka panjang[13].

Penelitian yang lebih komprehensif dilakukan oleh Yang *et al* (2024) yang mengaitkan kinerja sistem kendali dengan indikator keandalan operasi PLTU. Studi tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali dengan respons stabil mampu menurunkan frekuensi trip unit dan meningkatkan availability pembangkit. Temuan ini menegaskan bahwa kualitas sistem kendali berkontribusi langsung terhadap performa operasional dan umur peralatan. Meskipun demikian, penelitian tersebut belum secara spesifik menganalisis kinerja pengendalian level drum sebagai variabel utama yang memengaruhi keandalan. menyoroti pentingnya pendekatan integratif antara evaluasi parameter kinerja kendali dan analisis keandalan sistem pada PLTU modern yang beroperasi dalam mode fleksibel. Studi tersebut menekankan bahwa fluktuasi beban yang tinggi menuntut sistem kendali yang tidak hanya stabil secara matematis, tetapi juga mampu menjaga batas operasi aman secara konsisten. Namun, masih terdapat keterbatasan dalam penelitian tersebut karena belum dilakukan analisis kuantitatif menyeluruh terhadap hubungan langsung antara parameter kinerja *PID* dan indikator keandalan seperti MTBF atau availability factor[23].

Berdasarkan telaah penelitian terdahulu, dapat diidentifikasi bahwa sebagian besar studi berfokus pada peningkatan performa dinamis sistem kendali level drum boiler, sementara integrasi antara analisis kinerja kendali dan implikasinya terhadap keandalan operasi PLTU masih relatif terbatas. Oleh karena itu, terdapat peluang penelitian untuk melakukan analisis yang lebih komprehensif dengan menghubungkan parameter kinerja sistem kendali (rise time, settling time, *overshoot* , steady-state error, serta indeks integral) terhadap indikator keandalan

operasi pembangkit. Celah inilah yang menjadi dasar dan kontribusi utama penelitian ini.

2.8 Instrumentasi dan Sensor pada Sistem Kendali Level Drum Boiler

Instrumentasi merupakan tulang punggung dari sistem kendali level drum boiler karena seluruh keputusan pengendalian bergantung pada keakuratan data yang diperoleh dari lapangan. Sensor level pada drum boiler umumnya menggunakan prinsip differential pressure (DP) transmitter, yang mengukur perbedaan tekanan antara sisi uap dan sisi air untuk menentukan ketinggian permukaan air secara tidak langsung. Selain DP transmitter, teknologi radar guided wave dan kapasitansi juga mulai diterapkan pada unit pembangkit modern karena memiliki respons yang lebih stabil terhadap perubahan tekanan dan temperature.

Prinsip kerja DP transmitter didasarkan pada hukum tekanan hidrostatik, di mana tekanan kolom fluida berbanding lurus dengan tinggi dan densitas fluida tersebut. Karena densitas air dan uap berubah seiring perubahan tekanan operasi boiler, pengukuran level memerlukan kompensasi densitas agar hasil pembacaan tetap akurat pada berbagai kondisi beban. Kesalahan kompensasi ini menjadi salah satu sumber utama bias pengukuran level drum pada PLTU bertekanan tinggi.. Selain sensor level, sistem kendali level drum boiler juga bergantung pada flow transmitter untuk mengukur laju aliran uap dan aliran air umpan (feedwater), yang menjadi variabel penting pada strategi two element maupun three element control. *Flow transmitter* umumnya menggunakan elemen primer berupa orifice plate atau venturi tube yang dikombinasikan dengan sensor tekanan diferensial untuk menghitung laju aliran massa fluida secara *real time* (Bentley, 2021).

Keandalan sinyal instrumentasi turut ditentukan oleh kualitas transmisi sinyal, umumnya berupa sinyal analog 4-20 mA maupun protokol digital seperti HART dan *Foundation Fieldbus*. Kesalahan kalibrasi, drift sensor, maupun gangguan elektromagnetik pada jalur sinyal dapat menurunkan akurasi

pengukuran sehingga memicu aksi kendali yang tidak tepat. Oleh karena itu, PLTU berkapasitas besar umumnya menerapkan redundansi sensor ganda atau tiga sensor sekaligus untuk meningkatkan keandalan pengukuran level drum[15].

Secara keseluruhan, kualitas instrumentasi lapangan menjadi faktor penentu utama keberhasilan sistem kendali level drum boiler, karena performa pengendali PID maupun metode kendali lanjutan sangat bergantung pada keakuratan data sensor yang digunakan sebagai umpan balik. Studi terbaru menegaskan bahwa investasi pada instrumentasi berkualitas tinggi memberikan dampak yang lebih signifikan terhadap keandalan operasi dibandingkan hanya melakukan penalaan ulang parameter kendali semata Sistem Kendali Digital Berbasis DCS dan PLC pada PLTU

2.9 Sistem Kendali Digital Berbasis DCS dan PLC pada PLTU

Distributed Control System (DCS) dan *Programmable Logic Controller (PLC)* merupakan platform digital yang menjadi tulang punggung otomasi pada PLTU modern. DCS dirancang untuk menangani proses kendali kontinu berskala besar dengan ratusan hingga ribuan loop kendali secara simultan, sedangkan PLC lebih umum digunakan pada sistem interlock dan sekuensial. Pada sistem kendali level drum boiler, algoritma PID diimplementasikan sebagai fungsi blok di dalam modul kontrol DCS yang bekerja berdasarkan pemrosesan sinyal digital hasil konversi dari sinyal analog instrumentasi lapangan.

Arsitektur DCS umumnya bersifat terdistribusi dan redundan, dengan pemrosesan yang tersebar pada beberapa controller yang saling terhubung melalui jaringan kontrol berkecepatan tinggi. Redundansi pada level controller, catu daya, dan jaringan komunikasi bertujuan untuk memastikan sistem tetap beroperasi meskipun terjadi kegagalan pada salah satu komponen, sehingga meningkatkan keandalan operasi PLTU secara keseluruhan. Human Machine Interface (HMI) pada DCS juga memungkinkan operator memantau dan melakukan penyesuaian parameter kendali secara *real time.*

Komunikasi data antara instrumentasi lapangan dan sistem kendali digital umumnya menggunakan protokol industri seperti Modbus, Profibus, atau HART, yang memungkinkan pertukaran data proses maupun informasi diagnostik

perangkat secara simultan. Keterlambatan komunikasi *(communication delay)* pada jaringan kontrol digital dapat menjadi sumber tambahan *time delay* pada sistem kendali level drum boiler, sehingga desain jaringan komunikasi yang andal menjadi bagian penting dalam evaluasi kinerja sistem kendali secara menyeluruh. Dibandingkan sistem kendali analog konvensional, sistem kendali digital berbasis DCS menawarkan fleksibilitas yang jauh lebih tinggi dalam hal penalaan parameter, implementasi algoritma kendali lanjutan, serta integrasi dengan sistem monitoring dan diagnostik prediktif. Namun demikian, ketergantungan pada infrastruktur digital juga menghadirkan tantangan baru terkait keamanan siber dan integritas data, yang perlu dipertimbangkan dalam evaluasi keandalan sistem kendali PLTU modern[16].

Perkembangan terbaru menunjukkan tren integrasi teknologi *Internet of Things (IoT)* dan konsep Industry 4.0 pada sistem kendali boiler, di mana data operasi dari DCS dapat diteruskan ke platform analitik berbasis cloud untuk mendukung predictive maintenance dan optimasi kinerja jangka panjang. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi dini terhadap potensi degradasi kinerja sistem kendali level drum boiler sebelum berkembang menjadi gangguan operasional yang signifikan[28].

2.10 Metode Kendali Lanjutan: Fuzzy Logic, Adaptive Control, dan Hybrid PID

Fuzzy logic control merupakan pendekatan kendali yang meniru cara penalaran manusia dalam mengambil keputusan berdasarkan aturan linguistik, tanpa memerlukan model matematis proses yang presisi. Struktur dasar *fuzzy logic control* terdiri atas tahap fuzzifikasi, basis aturan (*rule base*), mekanisme inferensi, dan defuzzifikasi, yang secara bersama-sama mengubah nilai error dan perubahan error menjadi sinyal kendali. Pendekatan ini dinilai cocok untuk sistem dengan dinamika nonlinier dan sulit dimodelkan secara akurat, seperti drum boiler.

Penerapan *fuzzy logic control* pada sistem level drum boiler terbukti mampu mengurangi sensitivitas sistem terhadap fenomena *swell* dan *shrink*, karena aturan fuzzy dapat dirancang untuk membedakan pola perubahan level yang bersifat

sementara akibat perubahan tekanan dari perubahan level yang mencerminkan perubahan massa air sesungguhnya. Studi simulasi menunjukkan bahwa *fuzzy logic control* mampu memberikan respons yang lebih halus dan mengurangi osilasi dibandingkan PID konvensional pada kondisi beban yang berfluktuasi tajam.

Adaptive control merupakan pendekatan kendali yang mampu menyesuaikan parameter pengendali secara otomatis mengikuti perubahan karakteristik dinamis proses, misalnya melalui skema self-tuning regulator atau gain scheduling. Pada sistem drum boiler yang beroperasi pada rentang beban yang luas, karakteristik dinamis proses dapat berubah signifikan antara kondisi beban rendah dan beban tinggi, sehingga pendekatan adaptive control dinilai lebih unggul dibandingkan PID dengan parameter tetap dalam menjaga kestabilan sistem pada seluruh rentang operasi. Selain *fuzzy logic* dan adaptive control, pendekatan hybrid seperti fuzzy-PID dan *neuro-fuzzy* juga banyak dikembangkan untuk menggabungkan kelebihan masing-masing metode. Pada skema hybrid, parameter PID konvensional (Kp, Ki, Kd) disesuaikan secara dinamis oleh lapisan fuzzy logic berdasarkan kondisi error dan laju perubahan error saat itu, sehingga sistem tetap mempertahankan struktur PID yang sederhana namun dengan kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap dinamika nonlinier drum boiler[25].

Studi perbandingan menunjukkan bahwa metode kendali lanjutan seperti fuzzy-PID dan adaptive PID secara konsisten memberikan penurunan *overshoot* dan settling time yang lebih baik dibandingkan PID konvensional pada pengujian simulasi drum boiler dengan gangguan beban acak. Meskipun demikian, kompleksitas implementasi dan kebutuhan validasi ekstensif menjadi pertimbangan utama sebelum metode ini diterapkan secara luas pada sistem PLTU eksisting, sehingga PID konvensional dengan penalaan optimal tetap menjadi acuan pembanding utama dalam evaluasi kinerja[21].

2.11 Pemodelan dan Simulasi Sistem Kendali Level Drum Boiler

Pemodelan matematis merupakan langkah awal yang penting dalam analisis dan perancangan sistem kendali level drum boiler, karena model yang

representatif memungkinkan evaluasi kinerja sistem tanpa harus melakukan pengujian langsung pada peralatan operasional yang berisiko tinggi. Model dinamika drum boiler umumnya direpresentasikan dalam bentuk fungsi transfer orde tinggi atau persamaan ruang keadaan (*state space*) yang mempertimbangkan hubungan antara aliran feedwater, aliran uap, tekanan, dan level air. Untuk memperoleh model yang akurat, digunakan teknik identifikasi sistem yang memanfaatkan data operasional aktual untuk mengestimasi parameter model, baik melalui pendekatan model fisik (first principle) maupun pendekatan empiris berbasis data (data-driven). Pendekatan identifikasi sistem menjadi semakin relevan pada drum boiler karena kompleksitas fenomena termodinamika dan hidrolika di dalamnya sulit direpresentasikan sepenuhnya melalui persamaan fisik analitis[22].

Simulasi sistem kendali level drum boiler umumnya dilakukan menggunakan perangkat lunak seperti MATLAB/Simulink, yang memungkinkan perancang menguji berbagai skenario gangguan beban, variasi parameter PID, maupun perbandingan strategi kendali single, two, dan three element secara terkendali sebelum diterapkan pada sistem nyata. Validasi model terhadap data historis operasi aktual menjadi tahap penting untuk memastikan bahwa hasil simulasi merepresentasikan perilaku sistem yang sebenarnya.

Fenomena *swell* dan *shrink* pada drum boiler dapat direpresentasikan secara matematis melalui model nonlinier yang memperhitungkan perubahan volume uap akibat variasi tekanan sesaat, yang umumnya dimodelkan sebagai komponen inverse response pada fungsi transfer sistem. Representasi matematis ini penting untuk memastikan bahwa desain pengendali, baik PID konvensional maupun metode lanjutan, memperhitungkan karakteristik non-minimum phase yang menjadi ciri khas dinamika level drum boiler[24].

Secara keseluruhan, peran pemodelan dan simulasi dalam penelitian sistem kendali level drum boiler tidak hanya terbatas pada tahap perancangan awal, tetapi juga menjadi alat evaluasi berkelanjutan untuk membandingkan berbagai skenario penalaan dan strategi kendali secara efisien dari segi waktu dan biaya. Pendekatan berbasis simulasi memungkinkan analisis kinerja sistem kendali dilakukan secara komprehensif sebelum implementasi di lapangan, sehingga mengurangi risiko

operasional sekaligus mendukung proses pengambilan keputusan dalam upaya peningkatan keandalan operasi PLTU[29].

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Sicanang yang berlokasi di jalan Pulau Sicanang No.1, Belawan Pulau Sicanang Kec Medan Belawan Sumatera Utara.

3.2 Alat dan Perangkat Penelitian

Adapun alat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Laptop / Komputer.
2. Software MATLAB / Simulink.
3. Sensor level Transmitter.
4. Flow Transmitter.
5. Kontrol Valve Feedwater.
6. *Distributed Control System* (DCS).

Adapun Perangkat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data histori operasi level Drum Boiler.
2. Data perubahan beban operasional PLTU.
3. Jurnal dan referensi penelitian.
4. Parameter *PID* system penelitian.
5. Diagram system boiler PLTU.

3.3 Teknik Pengumpulan Data

1. Data Operasional

Data operasional diperoleh dari sistem pemantauan PLTU berupa level drum, aliran uap, dan aliran feedwater selama kondisi operasi normal dan perubahan beban.

2. Data Historis Sistem Kendali

Data historis digunakan untuk melihat tren performa kendali dalam jangka waktu tertentu dan mengevaluasi kestabilan sistem secara berkelanjutan.

3.4 Variabel Penelitian

Variabel penelitian digunakan untuk menentukan aspek yang dianalisis dalam sistem kendali level drum boiler pada PLTU. Variabel dalam penelitian ini terdiri dari variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol.

1. Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah parameter pengendali *PID* (Proportional, *Integral,* dan *Derivative)* yang memengaruhi respon sistem kendali level drum boiler.

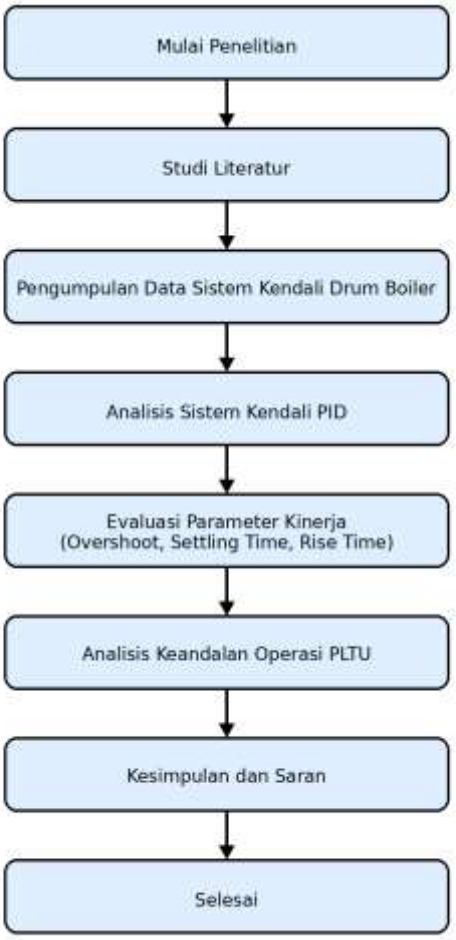
2. Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kinerja sistem kendali level drum boiler yang diukur berdasarkan parameter rise time, settling time, *overshoot* , steady-state error, dan kestabilan sistem.

3. Variabel Kontrol

Variabel kontrol meliputi kondisi operasi PLTU, karkteristik drum boiler, sensor level, aliran fedwater, dan beban operasi pembangkit yang dijaga biar tetap sesuai

3.5 Diagram Alir Penelitian



3.5.1 Penjelasan Diagram Alir:

a) Sensor Level

Proses dimulai dari sensor level yang bertugas mengukur tinggi permukaan air di dalam drum boiler. Sensor akan mendeteksi apakah level air berada pada kondisi normal, terlalu tinggi, atau terlalu rendah.

b) Pengiriman Sinyal ke *PID Controller*

Data hasil pengukuran dari sensor kemudian dikirim ke *PID Controller*. *Controller* akan membandingkan nilai level air aktual dengan nilai set point yang telah ditentukan sebelumnya. Jika level air sesuai set point, sistem tetap stabil. Jika terjadi selisih (error), *PID* akan melakukan perhitungan koreksi.

c) Proses *PID Controller*

PID Controller melakukan pengendalian menggunakan tiga metode:

Proportional (P) → mempercepat respon sistem terhadap perubahan level air. Integral (I) → mengurangi error yang terjadi secara terus-menerus.

Derivative (D) → mengurangi osilasi atau perubahan mendadak agar sistem lebih stabil. Hasil perhitungan *PID* akan menghasilkan sinyal kontrol.

d) Control Valve

Sinyal kontrol dari *PID* diteruskan ke control *valve feedwater. Valve* ini akan membuka atau menutup sesuai kebutuhan: Jika level air rendah → valve membuka lebih besar agar air bertambah. Jika level air tinggi → valve mengecil untuk mengurangi aliran air.

e) Drum Boiler

Air umpan (feedwater) masuk ke drum boiler melalui control valve. Proses ini menjaga level air tetap stabil selama pembentukan uap berlangsung.

f) Sistem Umpan Balik *(Feedback)*

Setelah level air berubah, sensor level kembali membaca kondisi terbaru dan mengirimkan data lagi ke *PID Controller*. Proses ini terjadi terus-menerus sehingga membentuk sistem kendali loop tertutup *(closed loop control).* Fungsi Diagram Alir Diagram alir dibuat untuk:

1. Mempermudah memahami cara kerja sistem kendali level drum boiler.
2. Menjelaskan hubungan antar komponen sistem.
3. Menunjukkan proses pengendalian otomatis pada PLTU.
4. Membantu analisis kestabilan sistem kendali *PID.*

BAB 4
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum PLTU Sicanang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Sicanang merupakan salah satu fasilitas pembangkit listrik yang berada di wilayah Sicanang, Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara. PLTU Sicanang memiliki peran dalam mendukung penyediaan dan pemenuhan kebutuhan energi listrik, khususnya bagi wilayah Sumatera Utara dan sekitarnya. Sebagai salah satu fasilitas yang mendukung sistem ketenagalistrikan, kegiatan operasional pembangkit harus dilaksanakan secara efektif, efisien, andal, serta memperhatikan aspek keselamatan dan kesehatan kerja.

Secara umum, proses pembangkitan listrik pada PLTU memanfaatkan energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar untuk menghasilkan uap. Air yang telah melalui proses pengolahan dialirkan menuju boiler dan dipanaskan hingga menghasilkan uap dengan tekanan dan temperatur tertentu. Uap tersebut kemudian dialirkan menuju turbin uap untuk menghasilkan energi mekanik berupa putaran. Putaran turbin selanjutnya digunakan untuk menggerakkan generator sehingga energi mekanik dapat dikonversi menjadi energi listrik. Listrik yang dihasilkan kemudian disalurkan melalui sistem kelistrikan sesuai dengan kebutuhan dan sistem distribusi yang berlaku.

Selain proses utama pembangkitan listrik, kegiatan operasional di PLTU Sicanang juga didukung oleh berbagai aktivitas dan fasilitas penunjang. Aktivitas tersebut meliputi penerimaan dan penanganan bahan bakar, pengoperasian peralatan utama dan peralatan pendukung, kegiatan pemeliharaan dan perbaikan, pengelolaan sistem utilitas, pengendalian kualitas proses, pengelolaan limbah, serta kegiatan administrasi dan pengawasan operasional.

Karakteristik kegiatan di lingkungan PLTU menyebabkan terdapat berbagai potensi bahaya yang dapat muncul selama proses kerja. Potensi bahaya tersebut antara lain berasal dari energi listrik, mesin dan peralatan yang bergerak, tekanan

dan temperatur tinggi, kebisingan, getaran, pekerjaan pada ketinggian, penggunaan bahan kimia, aktivitas pengelasan dan pekerjaan panas, pengangkatan serta pemindahan material, maupun kondisi lingkungan kerja lainnya. Apabila potensi bahaya tersebut tidak dikendalikan dengan baik, maka dapat meningkatkan risiko terjadinya kecelakaan kerja, kerusakan peralatan, maupun gangguan terhadap kegiatan operasional.

Oleh karena itu, aspek keselamatan dan kesehatan kerja (K3) menjadi bagian penting dalam pelaksanaan kegiatan operasional PLTU Sicanang. Penerapan K3 dilakukan sebagai upaya untuk mengidentifikasi potensi bahaya, menilai tingkat risiko, serta menentukan tindakan pengendalian yang sesuai dengan kondisi pekerjaan. Pengendalian risiko dapat dilakukan melalui penerapan prosedur kerja yang aman, penggunaan alat pelindung diri (APD), pemasangan rambu keselamatan, inspeksi dan pemeliharaan peralatan, pelaksanaan safety briefing atau toolbox meeting, pemberian pelatihan kepada pekerja, serta pemantauan terhadap kondisi lingkungan kerja.

Penerapan K3 juga membutuhkan keterlibatan seluruh pihak yang berada di lingkungan kerja, baik pekerja maupun tenaga kerja dari pihak ketiga atau kontraktor. Setiap pekerja diharapkan memahami potensi bahaya yang terdapat pada pekerjaan masing-masing serta mengikuti ketentuan dan prosedur keselamatan yang telah ditetapkan. Selain tindakan pencegahan, pelaporan terhadap kondisi tidak aman, tindakan tidak aman, kejadian hampir celaka *(near miss*), maupun kecelakaan kerja juga menjadi bagian penting dalam upaya perbaikan berkelanjutan terhadap sistem keselamatan kerja.

Dengan karakteristik kegiatan yang melibatkan berbagai proses, peralatan, dan potensi bahaya tersebut, PLTU Sicanang menjadi lingkungan kerja yang memerlukan pengelolaan keselamatan dan kesehatan kerja secara sistematis. Penerapan pengendalian bahaya yang tepat diharapkan dapat meminimalkan risiko kecelakaan dan penyakit akibat kerja, menjaga kondisi pekerja tetap aman dan sehat, serta mendukung tercapainya kegiatan operasional pembangkit yang aman, andal, dan berkelanjutan.

4.2 Pengumpulan dan Penyajian Data Sistem Kendali Level Drum Boiler

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data simulasi sistem kendali level drum boiler yang terdiri atas beberapa variabel utama, yaitu waktu, setpoint, level drum aktual, dan valve output. Data tersebut digunakan sebagai dasar untuk menganalisis respons sistem kendali level terhadap nilai referensi yang telah ditentukan. Data simulasi disusun dalam bentuk deret waktu dengan interval pengamatan sebesar 1 detik. Pengamatan dilakukan mulai dari t=0 detik hingga t=100 detik. Nilai setpoint yang digunakan selama proses simulasi adalah sebesar 70%. Variabel level drum menunjukkan kondisi aktual level yang dihasilkan oleh sistem, sedangkan valve output menunjukkan besarnya keluaran pengendali yang diberikan kepada elemen penggerak valve.

Data tersebut kemudian diimpor ke Matlab untuk dilakukan pengolahan dan visualisasi. Penggunaan Matlab bertujuan untuk mempermudah proses analisis respons sistem, terutama dalam menentukan karakteristik transien dan parameter kinerja sistem kendali.

4.2.1 Variabel Data Sistem Kendali Boiler

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas empat parameter utama.

1. Waktu *(Time)*

Waktu merupakan variabel yang digunakan sebagai acuan perubahan respons sistem. Data waktu memiliki rentang 0 sampai 100 detik dengan interval pengambilan data sebesar 1 detik.

2. Set Point

Setpoint merupakan nilai referensi yang harus dicapai dan dipertahankan oleh sistem kendali. Pada simulasi ini, setpoint level drum ditetapkan sebesar 70cm selama periode pengamatan

3. Level Drum

Level drum merupakan variabel keluaran atau respons utama yang diamati.

Variabel ini menunjukkan kondisi aktual level drum boiler terhadap setpoint. Perubahan level digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengikuti nilai referensi. Pada simulasi ini, rentang level drum dinormalisasi pada 0–100 cm dengan nilai setpoint sebesar 70 cm. Penetapan rentang tersebut digunakan sebagai representasi level drum dalam simulasi sistem kendali PID.

4. Valve Output

Valve output merupakan keluaran dari sistem kendali yang digunakan untuk melakukan koreksi terhadap perubahan level drum. Perubahan valve output menyebabkan perubahan respons level sehingga sistem dapat bergerak menuju nilai setpoint. Secara umum, hubungan antara variabel tersebut dapat dinyatakan sebagai:

Setpoint→Controller→Valve→Drum Boiler→Level

Level aktual kemudian digunakan sebagai umpan balik ke sistem kendali sehingga pengendali dapat melakukan koreksi berdasarkan perbedaan antara level aktual dan setpoint.

4.3 Penyajian Data Hasil Simulasi

Berdasarkan data simulasi, kondisi awal sistem pada **t=0** detik menunjukkan level drum sebesar 0 cm, sedangkan setpoint telah ditetapkan sebesar 70 cm. Pada kondisi tersebut, valve output berada pada nilai 73%. Selanjutnya, level drum mengalami peningkatan secara bertahap hingga melewati nilai setpoint. Beberapa data hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data Sistem Kendai Level Drum

No	Waktu	Setpoint (cm)	Level Drum (cm)	Valve Output (%)
1	0	70	0	73
2	1	70	3.78187	71.81913
3	2	70	9.367756	70.30643
4	3	70	16.30976	68.53739
5	4	70	24.17462	66.58654
6	5	70	32.55698	64.52558

No	Waktu	Setpoint (cm)	Level Drum (cm)	Valve Output (%)
7	6	70	41.08969	62.42171
8	7	70	49.45147	60.33629
9	8	70	57.3718	58.32379
10	9	70	64.6334	56.43104
11	10	70	71.0724	54.69676
12	11	70	76.57676	53.15133
13	12	70	81.08291	51.81687
14	13	70	84.57129	50.7075
15	14	70	87.06087	49.82976
16	15	70	88.60315	49.18327
17	16	70	89.27579	48.76142
18	17	70	89.17626	48.55221
19	18	70	88.4156	48.53916
20	19	70	87.11269	48.70219
21	20	70	85.38892	49.01854
22	21	70	83.36359	49.46369
23	22	70	81.14999	50.01218
24	23	70	78.85225	50.63842
25	24	70	76.56299	51.31738
26	25	70	74.36159	52.02519
27	26	70	72.3133	52.73973
28	27	70	70.4689	53.44095
29	28	70	68.86491	54.11129
30	29	70	67.52429	54.73584
31	30	70	66.45755	55.30248
32	31	70	65.66409	55.80191
33	32	70	65.13377	56.22763
34	33	70	64.84861	56.57581
35	34	70	64.78449	56.8451
36	35	70	64.91288	57.03645
37	36	70	65.20245	57.1528
38	37	70	65.62055	57.19881

No	Waktu	Setpoint (cm)	Level Drum (cm)	Valve Output (%)
39	38	70	66.13457	57.18057
40	39	70	66.71304	57.10526
41	40	70	67.32664	56.98086
42	41	70	67.94886	56.81586
43	42	70	68.55661	56.61894
44	43	70	69.13052	56.39875
45	44	70	69.65508	56.16367
46	45	70	70.11872	55.92161
47	46	70	70.5136	55.67984
48	47	70	70.8354	55.44488
49	48	70	71.08297	55.22235
50	49	70	71.25794	55.017
51	50	70	71.36425	54.83257
52	51	70	71.40774	54.67189
53	52	70	71.39562	54.53681
54	53	70	71.33606	54.42833
55	54	70	71.23777	54.34661
56	55	70	71.10961	54.29107
57	56	70	70.96024	54.26049
58	57	70	70.79787	54.25309
59	58	70	70.63004	54.26666
60	59	70	70.46341	54.29865
61	60	70	68.80368	54.34627
62	61	70	68.82513	54.40661
63	62	70	68.84256	54.47671
64	63	70	68.86071	54.55366
65	64	70	68.8831	54.63466
67	65	70	68.91212	54.71711
68	66	70	68.94916	54.79862
69	67	70	68.99477	54.87708
70	68	70	69.04878	54.95069
71	69	70	69.11045	55.01797

No	Waktu	Setpoint (cm)	Level Drum (cm)	Valve Output (%)
72	70	70	69.17862	55.07776
73	71	70	69.25181	55.12921
74	72	70	69.32837	55.17181
75	73	70	69.40659	55.20533
76	74	70	69.48476	55.2298
77	75	70	69.56127	55.24551
78	76	70	69.63467	55.25295
79	77	70	69.7037	55.25277
80	78	70	69.76733	55.24577
81	79	70	69.82477	55.23285
82	80	70	69.87549	55.21499
83	81	70	69.9192	55.19317
84	82	70	69.95582	55.1684
85	83	70	69.98548	55.14166
86	84	70	70.00849	55.11387
87	85	70	70.02532	55.08589
88	86	70	70.03654	55.05851
89	87	70	70.04279	55.0324
90	88	70	70.0448	55.00813
91	89	70	70.04329	54.98617
92	90	70	70.039	54.96687
93	91	70	70.03262	54.95048
94	92	70	70.02483	54.93713
95	93	70	70.01622	54.92688
96	94	70	70.00733	54.91967
97	95	70	69.99861	54.91538
98	96	70	69.99044	54.91383
99	97	70	69.9831	54.91477
100	98	70	69.97682	54.91792

Berdasarkan Tabel 4.1, terlihat bahwa level drum mengalami perubahan yang cukup besar pada awal simulasi. Pada waktu 0 detik, level berada pada

kondisi 0 cm sehingga terdapat perbedaan yang besar terhadap setpoint 70 cm. Sistem kemudian memberikan respons melalui perubahan valve output sehingga level drum meningkat secara bertahap.

Pada waktu 10 detik, level drum telah mencapai 71,07 cm, sehingga respons telah melewati nilai setpoint. Level kemudian mencapai nilai maksimum sebesar 89,28 cm pada detik ke-16. Setelah mencapai kondisi maksimum, respons mengalami penurunan dan kemudian berosilasi di sekitar nilai setpoint.

Perubahan valve output juga menunjukkan adanya proses koreksi dari sistem kendali. Pada awal simulasi, valve output berada pada 73%. Seiring meningkatnya level drum, valve output menurun hingga sekitar 49%. Setelah level mengalami penyimpangan di bawah setpoint, valve output kembali meningkat. Hal tersebut menunjukkan adanya hubungan antara perubahan level dengan tindakan koreksi yang diberikan oleh sistem kendali.

4.3.3 Plot Data Sistem Kendali

Untuk memberikan gambaran visual mengenai karakteristik data, level drum dan setpoint diplot terhadap waktu menggunakan Matlab.



Gambar 4. 1 Respons Level Drum terhadap Setpoint

Berdasarkan Gambar 4.1, respons level drum menunjukkan karakteristik transien yang cukup jelas. Level awalnya meningkat dari 0 cm menuju setpoint 70 cm, kemudian melewati nilai setpoint dan mencapai nilai maksimum sebesar 89,28 cm. Setelah itu, respons mengalami penurunan dan osilasi sebelum bergerak mendekati nilai setpoint. Pada bagian akhir pengamatan, level drum berada di sekitar nilai 70 cm. Pada detik ke-100, level drum tercatat sebesar 69,97 cm, sehingga selisih terhadap setpoint 70 cm hanya sekitar 0,03 poin persentase.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu membawa level drum kembali mendekati nilai referensi setelah mengalami perubahan respons selama proses transien. Data yang telah disajikan pada subbab ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk melakukan analisis sistem kendali PID dan evaluasi parameter kinerja pada subbab berikutnya.

4.3 Analisis Sistem Kendali PID

Analisis sistem kendali PID dilakukan berdasarkan respons level drum terhadap nilai setpoint sebesar 70 cm. Pada tahap ini, pembahasan difokuskan

pada hubungan antara keluaran pengendali berupa valve output dengan perubahan level drum yang dihasilkan selama proses simulasi.

Sistem kendali menggunakan mekanisme umpan balik, yaitu level aktual dibandingkan dengan nilai setpoint. Selisih antara kedua nilai tersebut menghasilkan error yang kemudian digunakan oleh pengendali untuk menentukan tindakan koreksi. Secara umum, hubungan sistem dapat dinyatakan sebagai:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

dengan:

- e(t) = error sistem,
- r(t) = setpoint,
- y(t) = level 57indak drum.

Dalam penelitian ini:

$$r(t) = 70\ cm$$

sehingga error sistem dapat dinyatakan sebagai:

e(t)=70−y(t)

$$e(t) = 70 - y(t)$$

Ketika level aktual berada di bawah 70 cm, error bernilai positif sehingga sistem memberikan tindakan koreksi untuk meningkatkan level. Sebaliknya, ketika level aktual melebihi 70 cm, error berubah sehingga tindakan pengendalian diarahkan untuk mengurangi kecenderungan kenaikan level.

4.3.1 Respons Level Drum terhadap Pengendalian

Pada awal simulasi, level drum berada pada 0 cm, sedangkan setpoint ditetapkan sebesar 70 cm. Kondisi tersebut menghasilkan error awal sebesar:

$$e(0) = 70 - 0 = 70\ cm$$

Besarnya error awal menyebabkan sistem memberikan tindakan pengendalian yang relatif besar. Hal tersebut terlihat dari valve output awal sebesar 73%. Seiring meningkatnya level drum, perbedaan antara level aktual dan setpoint semakin kecil. Valve output kemudian mengalami penurunan secara bertahap. Pada detik ke-10, level drum telah mencapai 71,07 cm, sedangkan valve output berada pada 54,70%.

Ketika level drum melewati setpoint, sistem melakukan koreksi sehingga kenaikan level tidak terus berlangsung. Namun, karena karakteristik transien sistem, level masih mengalami penyimpangan hingga mencapai nilai maksimum 89,28 cm pada detik ke-16. Setelah mencapai nilai maksimum, level drum mengalami penurunan hingga berada di bawah setpoint. Pada detik ke-34, level mencapai nilai minimum sekitar 64,78 cm, kemudian kembali meningkat menuju nilai setpoint.

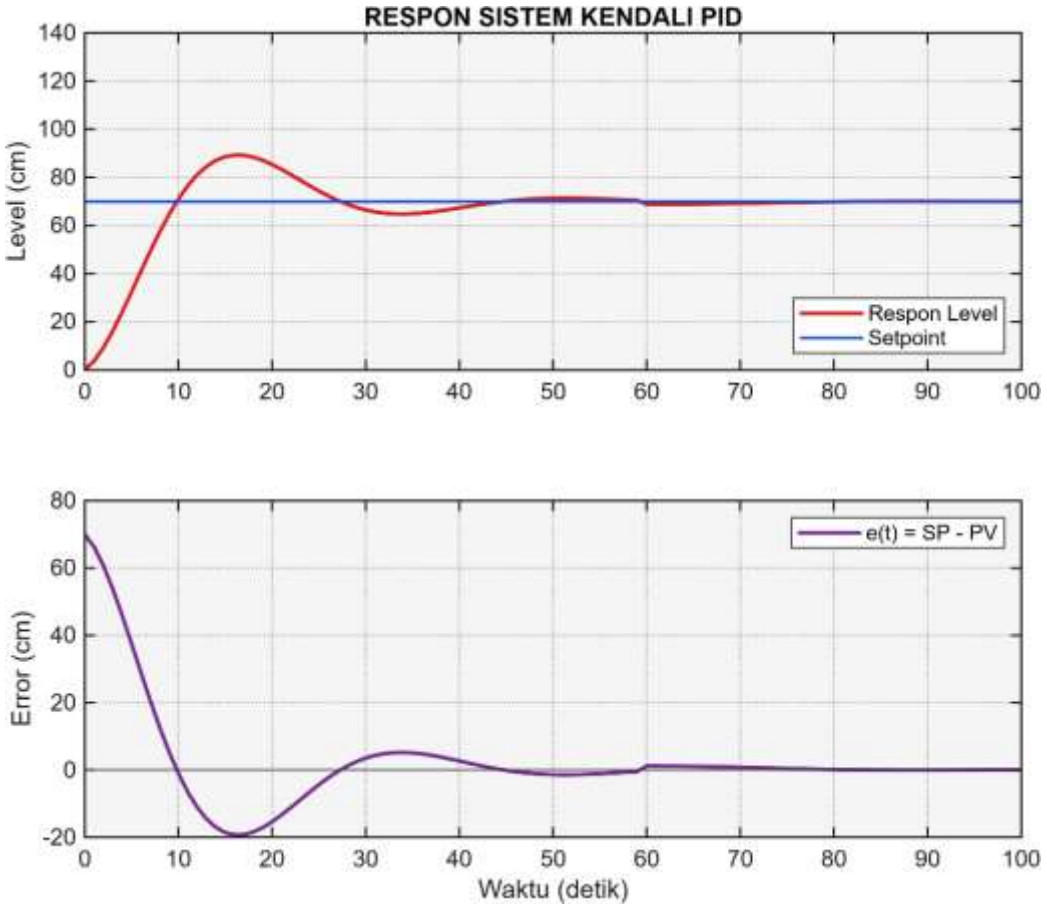
Kondisi tersebut menunjukkan adanya respons osilasi sebelum sistem mencapai keadaan yang lebih stabil. Besarnya *overshoot* yang terjadi, yaitu selisih antara nilai puncak 89,28 cm dengan setpoint 70 cm, mengindikasikan *overshoot* sebesar kurang lebih 19,28 cm atau setara dengan 27,5 cm dari nilai setpoint. Nilai *overshoot* yang cukup signifikan ini menunjukkan bahwa sistem memiliki redaman (damping ratio) yang relatif rendah, sehingga respons cenderung underdamped. Kondisi ini umum terjadi pada sistem pengendalian level drum boiler akibat adanya fenomena shrink and swell, yaitu perubahan volume uap dalam drum yang menyebabkan level terukur sempat naik meskipun jumlah air sebenarnya berkurang, atau sebaliknya. Fenomena inilah yang turut memperbesar simpangan transien sebelum sistem benar-benar mencapai kondisi tunak.

Setelah melewati titik minimum pada detik ke-34, level drum kembali bergerak naik mendekati setpoint dengan amplitudo osilasi yang semakin mengecil dibandingkan siklus sebelumnya. Pola redaman osilasi seperti ini menunjukkan bahwa sistem pengendalian masih mampu membawa proses menuju kestabilan, meskipun waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi steady state relatif lama akibat adanya beberapa kali ayunan sebelum error mendekati nol. Perilaku ini juga mencerminkan interaksi antara aksi proporsional dan integral pada pengendali, di mana aksi proporsional memberikan respons cepat terhadap perubahan error, sedangkan aksi integral berperan menghilangkan offset agar level akhirnya benar-benar konvergen pada setpoint 70 cm.

Secara keseluruhan, respons level drum terhadap pengendalian ini memperlihatkan karakteristik khas sistem orde dua dengan redaman rendah, yang ditandai oleh adanya *overshoot*, undershoot, dan osilasi teredam sebelum mencapai kestabilan. Meskipun performa pengendali sudah cukup baik dalam

mengembalikan level menuju setpoint tanpa menyebabkan sistem menjadi tidak stabil, besarnya *overshoot* dan lamanya waktu *settling time* yang dibutuhkan mengindikasikan bahwa parameter pengendali (Kp, Ki, dan/atau Kd) masih berpotensi untuk dioptimalkan lebih lanjut, misalnya melalui penalaan ulang *(retuning*) agar respons sistem menjadi lebih cepat mencapai kestabilan dengan *overshoot* yang lebih kecil.

Sebagai catatan tambahan, evaluasi terhadap performa pengendalian ini dapat diperkuat dengan menghitung parameter-parameter respons transien secara lebih rinci, seperti *rise time, settling time* (biasanya dihitung berdasarkan batas toleransi 2 cm atau 5 cm dari setpoint), serta decay ratio antara puncak osilasi pertama dan kedua. Decay ratio yang mendekati nol menunjukkan sistem cepat teredam, sedangkan nilai yang mendekati satu mengindikasikan osilasi yang berkepanjangan dan berpotensi mengganggu kestabilan proses secara keseluruhan. Selain itu, perlu diperhatikan pula bahwa pada aplikasi nyata di industri, osilasi level drum yang terlalu besar dapat berdampak pada kualitas pemisahan uap-air di dalam drum serta membebani kinerja aktuator *(control valve)* karena pergerakan yang terlalu agresif. Oleh karena itu, meskipun sistem pada simulasi ini akhirnya mampu mencapai setpoint, analisis lebih lanjut terhadap parameter-parameter tersebut penting dilakukan guna memastikan bahwa strategi pengendalian yang diterapkan tidak hanya stabil secara matematis, tetapi juga aman dan efisien untuk diterapkan pada kondisi operasi pembangkit Listrik teanga uap sesungguhnya.



Gambar 4. 2 Respon sistem Kendali PID

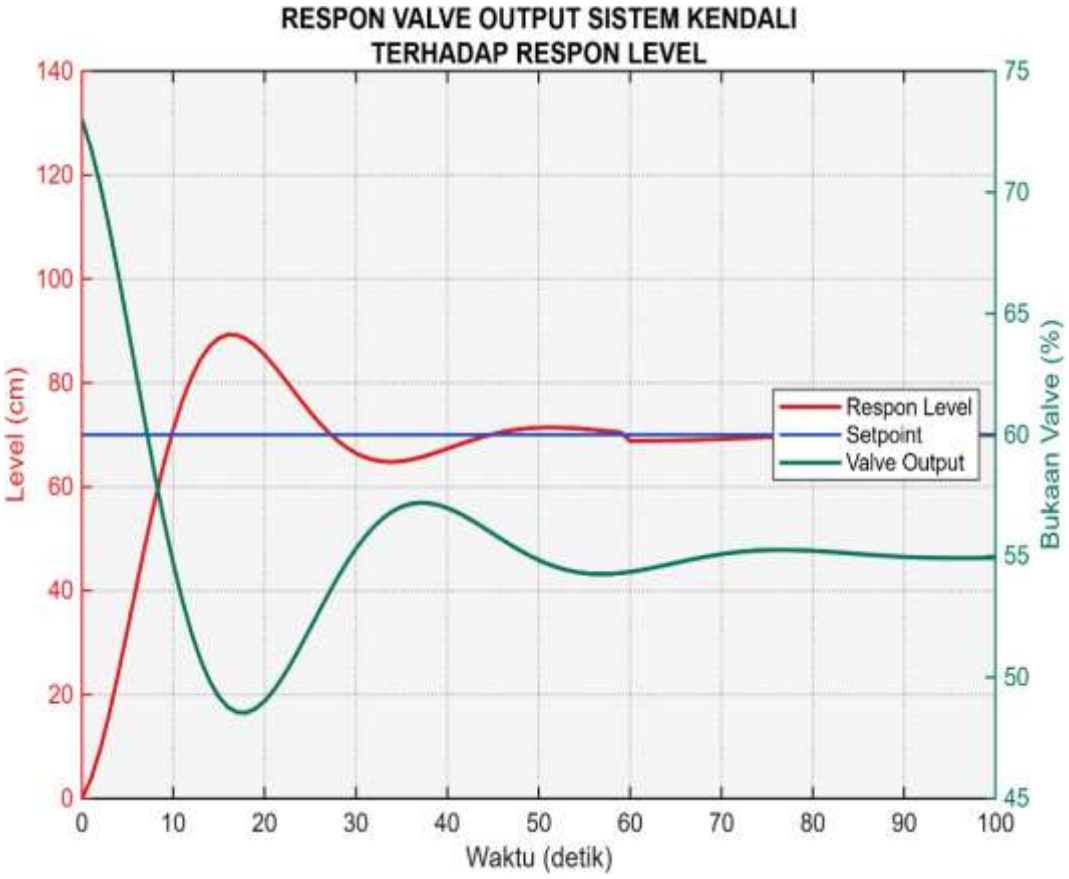
Berdasarkan grafik respons dan error tersebut, dapat diketahui bahwa sistem kendali PID mampu merespons perubahan level menuju setpoint sebesar 70 cm. Respons awal menunjukkan adanya *overshoot* yang kemudian diikuti oleh osilasi dengan amplitudo yang semakin kecil hingga sistem mendekati kondisi steady-state. Sementara itu, nilai error yang pada awalnya cukup besar secara bertahap mengalami penurunan dan mendekati nol. Kondisi tersebut menunjukkan adanya proses koreksi yang dilakukan oleh sistem kendali untuk mengurangi perbedaan antara nilai aktual dan nilai referensi.

4.3.2 Respons Valve Output

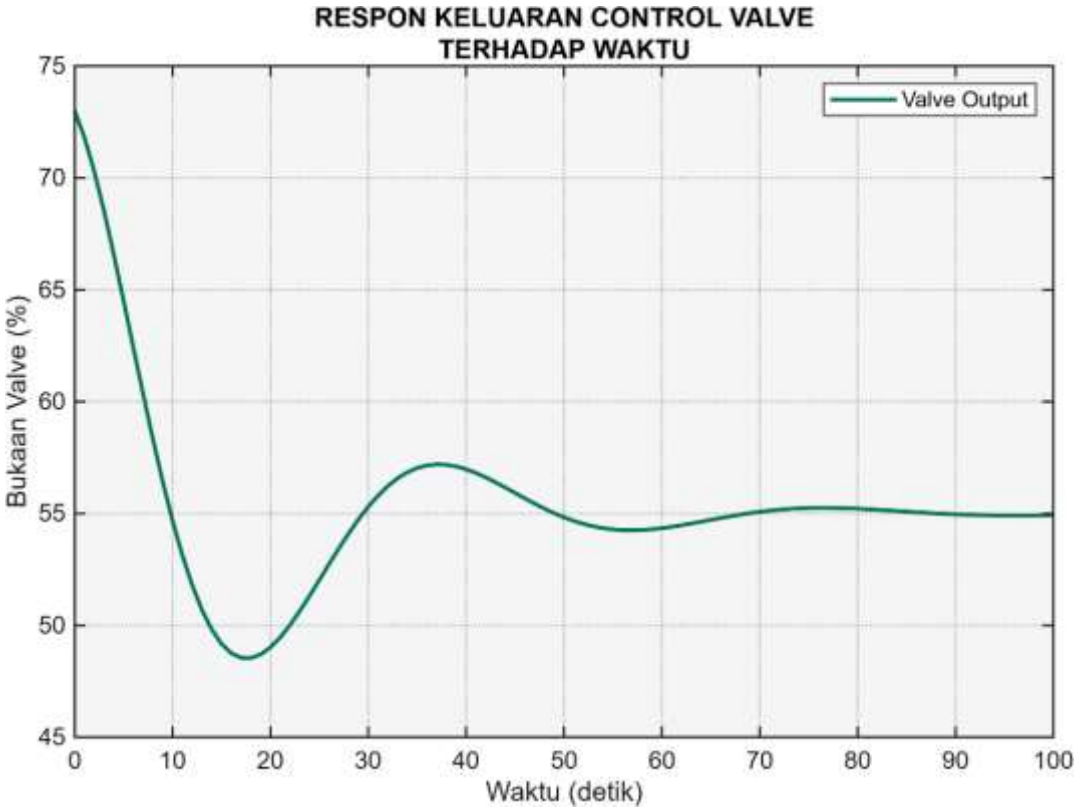
Valve output merupakan salah satu indikator tindakan pengendalian yang diberikan sistem terhadap perubahan level drum. Berdasarkan data simulasi, valve output mengalami perubahan mengikuti dinamika level drum. Pada kondisi awal, valve output sebesar 73%. Ketika level drum meningkat, valve output mengalami

penurunan hingga mencapai nilai sekitar 48,54% pada sekitar detik ke-18.

Setelah level mengalami penurunan di bawah setpoint, valve output kembali meningkat hingga mencapai sekitar 57,20% pada detik ke-37. Perubahan tersebut menunjukkan adanya mekanisme koreksi terhadap error sistem. Ketika level terlalu tinggi, tindakan pengendalian cenderung mengurangi valve output, sedangkan ketika level berada di bawah nilai referensi, valve output kembali meningkat.



Gambar 4. 3 Respon Valve Output Sistem Kendali Terhadap Respon Level



Gambar 4. 4 Respons Valve Output terhadap Waktu

Berdasarkan Gambar 4.3 dan Gambar 4.4, perubahan valve output mengikuti perubahan respons level drum. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengendali memberikan tindakan koreksi secara dinamis selama proses berlangsung. pengantar, mengaitkan kedua grafik, menjelaskan bahwa perubahan valve mengikuti error secara proporsional. fase awal (error besar → valve 73% turun ke 48,54% pada detik ke-18). fase koreksi balik (level turun di bawah setpoint → valve naik ke 57,20% pada detik ke-37). kesimpulan menyeluruh, mengaitkan pola osilasi valve dengan evaluasi kinerja PID dan implikasi praktis (keausan aktuator, perlunya tuning lebih optimal).

4.3.3 Respons Sistem Menuju Kondisi Stabil

Setelah mengalami perubahan dan osilasi pada periode awal, respons level drum secara bertahap

bergerak mendekati nilai setpoint. Pada detik ke-80, level berada pada 69,88 cm, sedangkan pada detik ke-90 level berada pada 70,04 cm. Pada akhir pengamatan, yaitu detik ke-100, level tercatat sebesar 69,97 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa respons sistem pada bagian akhir simulasi telah mendekati nilai referensi

70 cm. Selisih antara level pada detik ke-100 dengan setpoint adalah:

$$e(100) = 70 - 69{,}9679$$

$$5 \quad e(100) = 0{,}0321 \text{ cm}$$

Dengan demikian, error pada akhir pengamatan relatif kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali mampu mengurangi error setelah mengalami respons transien yang cukup besar pada awal simulasi.

4.3.4 Analisis Awal Kinerja Sistem

Berdasarkan respons yang diperoleh, sistem menunjukkan karakteristik berupa kenaikan cepat menuju setpoint, overshoot pada periode awal, penurunan respons, kemudian osilasi sebelum mencapai kondisi yang mendekati nilai referensi. Nilai maksimum level sebesar 89,28 cm menunjukkan bahwa respons mengalami penyimpangan cukup besar dari setpoint 70 cm. Selanjutnya, respons secara bertahap mengalami koreksi dan pada akhir pengamatan telah mendekati nilai setpoint. Karakteristik tersebut menjadi dasar untuk melakukan evaluasi yang lebih terukur menggunakan parameter *overshoot*, *rise time*, dan settling time. Oleh karena itu, analisis kuantitatif terhadap ketiga parameter tersebut dilakukan pada Subbab 4.4.

4.4 Evaluasi Parameter Kinerja

Evaluasi parameter kinerja dilakukan untuk mengetahui karakteristik respons sistem kendali level drum boiler terhadap nilai setpoint yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil simulasi pada Subbab 4.3, respons sistem selanjutnya dianalisis secara kuantitatif menggunakan tiga parameter utama, yaitu *overshoot, rise time,* dan *settling time.*

Ketiga parameter tersebut digunakan untuk memberikan gambaran mengenai kemampuan sistem dalam mencapai nilai yang diinginkan serta mempertahankan kondisi stabil. Overshoot digunakan untuk mengetahui besarnya penyimpangan maksimum respons terhadap nilai setpoint, rise time digunakan untuk mengetahui kecepatan respons sistem dalam mencapai nilai akhir,

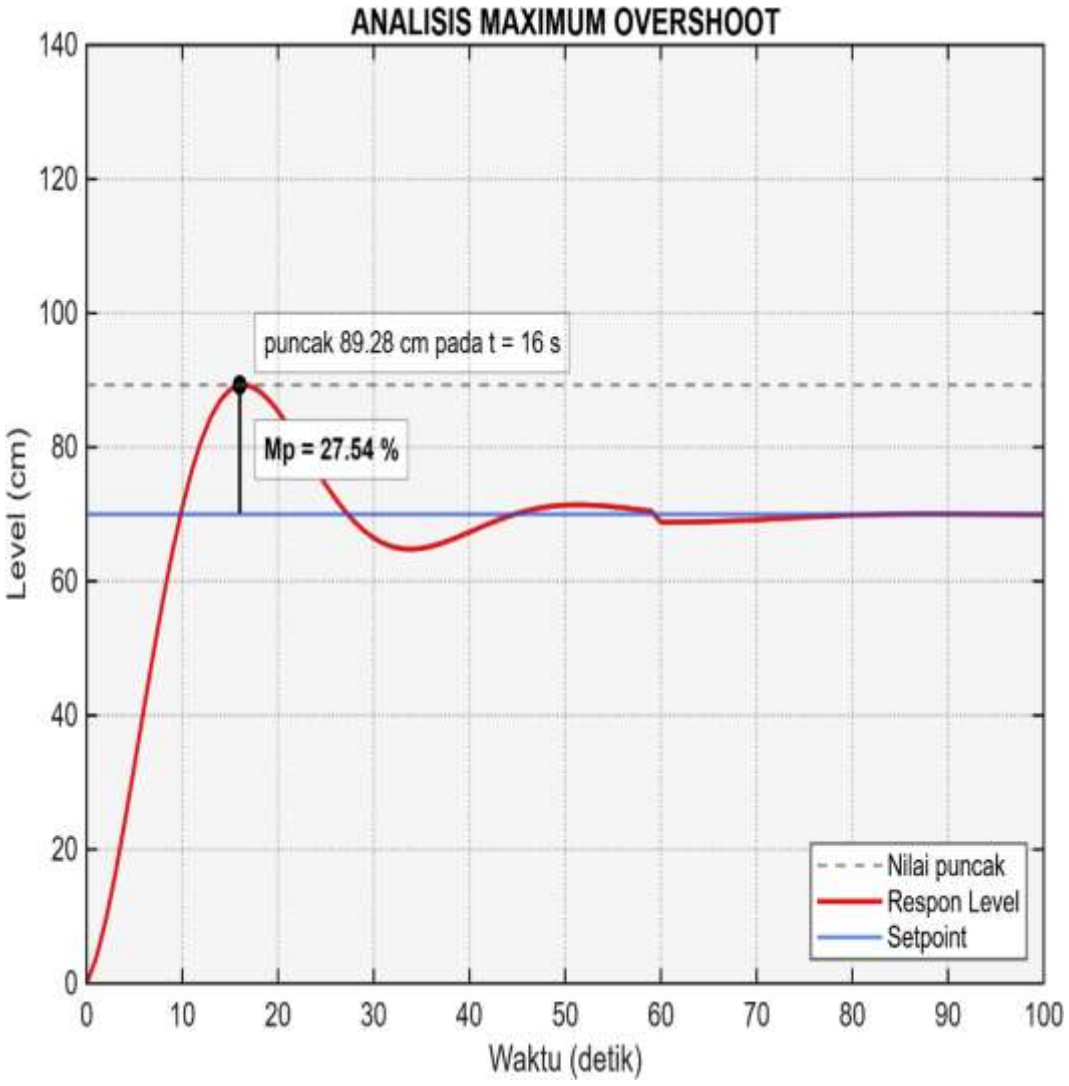
sedangkan settling time digunakan untuk mengetahui waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai kondisi stabil.

Pada penelitian ini, nilai setpoint level drum boiler ditetapkan sebesar 70 cm**.** Oleh karena itu, respons level aktual dianalisis terhadap nilai referensi tersebut. Analisis dilakukan menggunakan data hasil simulasi yang telah diolah menggunakan Matlab.

4.4.1 Analisis Overshoot

Overshoot merupakan kondisi ketika respons sistem melewati nilai setpoint sebelum mencapai kondisi *steady-state*. Parameter ini digunakan untuk mengetahui besarnya penyimpangan maksimum yang terjadi selama respons transien sistem.

Berdasarkan hasil simulasi, respons level drum dibandingkan dengan nilai setpoint sebesar 70 cm. Nilai maksimum yang dicapai oleh respons level digunakan sebagai dasar dalam menentukan besarnya overshoot.



Gambar 4. 5 Analisis Overshoot Respons Level Drum

Pada Gambar 4.5 terlihat respons level drum terhadap setpoint sebesar 70%. Respons sistem mengalami perubahan dari kondisi awal dan kemudian bergerak menuju nilai setpoint. Apabila respons melewati nilai 70%, maka kondisi tersebut menunjukkan adanya *overshoot.*

Nilai maksimum respons yang diperoleh dari hasil pengolahan data Matlab adalah sebesar 89,28 cm**,** sedangkan nilai setpoint sistem adalah sebesar 70 cm. Berdasarkan kedua nilai tersebut, persentase overshoot dihitung menggunakan persa maan berikut :

$$M_p = \frac{y_{max}}{yss}\ x\ 100\ cm$$

Dengan :

y_{max} : 89,28%

y_{ss} : 70%

Maka diperoleh :

$$M_p = \frac{89{,}28\ cm - 70\ cm}{70\ cm}\ x\ 100\ cm$$

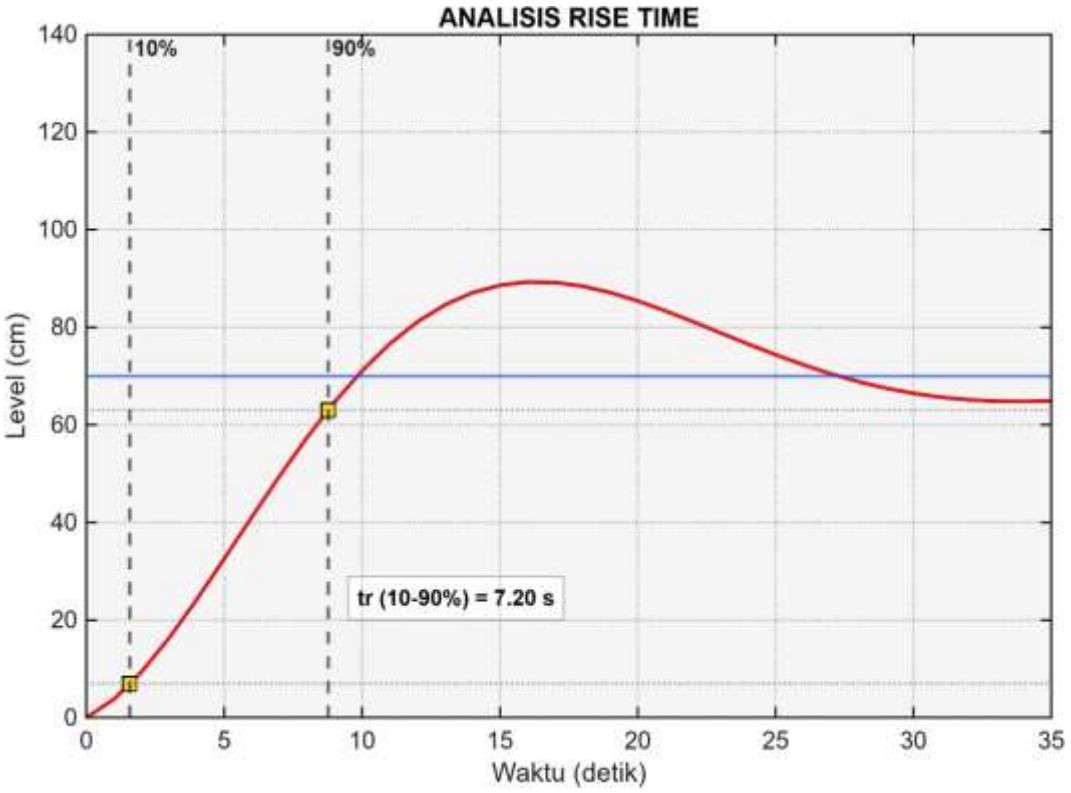
= 27,54 cm

Sehingga nilai overshoot sistem adalah sebesar 27,54 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa respons level mengalami penyimpangan maksimum sebesar 27,54 cm terhadap nilai setpoint. Nilai overshoot tersebut menggambarkan karakteristik respons transien sistem ketika mencapai nilai yang ditentukan.

Semakin kecil nilai overshoot, semakin kecil pula penyimpangan maksimum respons terhadap setpoint. Dalam sistem kendali level drum, kondisi tersebut diharapkan agar perubahan level tidak terlalu jauh dari nilai operasi yang ditentukan. Oleh karena itu, nilai overshoot menjadi salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kualitas respons sistem kendali.

4.4.2 Analisis *Rise Time*

Rise time merupakan waktu yang dibutuhkan oleh respons sistem untuk bergerak dari 10% hingga 90% dari nilai akhir. Parameter ini digunakan untuk mengetahui kecepatan respons sistem dalam mencapai nilai yang mendekati kondisi akhir. Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan Matlab, waktu ketika respons mencapai 10% dari nilai akhir adalah sebesar 2 detik, sedangkan waktu ketika respons mencapai 90% adalah sebesar 9 detik.



Gambar 4. 6 Analisis *Rise Time Respons* Level Drum

Pada Gambar 4.6 ditunjukkan respons level drum beserta batas 10% dan 90% dari nilai setpoint. Titik pertama menunjukkan waktu ketika respons mencapai level 7 cm, sedangkan titik kedua menunjukkan waktu ketika respons mencapai level 63 cm.

Berdasarkan hasil analisa diperoleh nilai rise time sebesar 7,20 detik. Nilai *rise time* tersebut menunjukkan waktu yang diperlukan sistem untuk bergerak dari 10% hingga 90% nilai akhir. Nilai *rise time* yang lebih kecil menunjukkan respons sistem yang lebih cepat dalam mencapai daerah nilai akhir. Namun, kecepatan respons perlu dianalisis bersama parameter lainnya karena respons yang cepat dapat disertai overshoot yang lebih besar.

4.4.3 Analisis *Settling Time*

Settling time merupakan waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai dan mempertahankan kondisi di sekitar nilai akhir dalam batas toleransi tertentu. Pada penelitian ini digunakan batas toleransi sebesar ±2 cm dari nilai setpoint**.** Dengan nilai setpoint sebesar 70 cm, batas bawah dan batas atas daerah settling dapat dihitung sebagai berikut :

Batas bawah = 70 – (2 cm x 70)

= 68,6 cm

Sedangkan batas atas dihitung dengan persamaan :

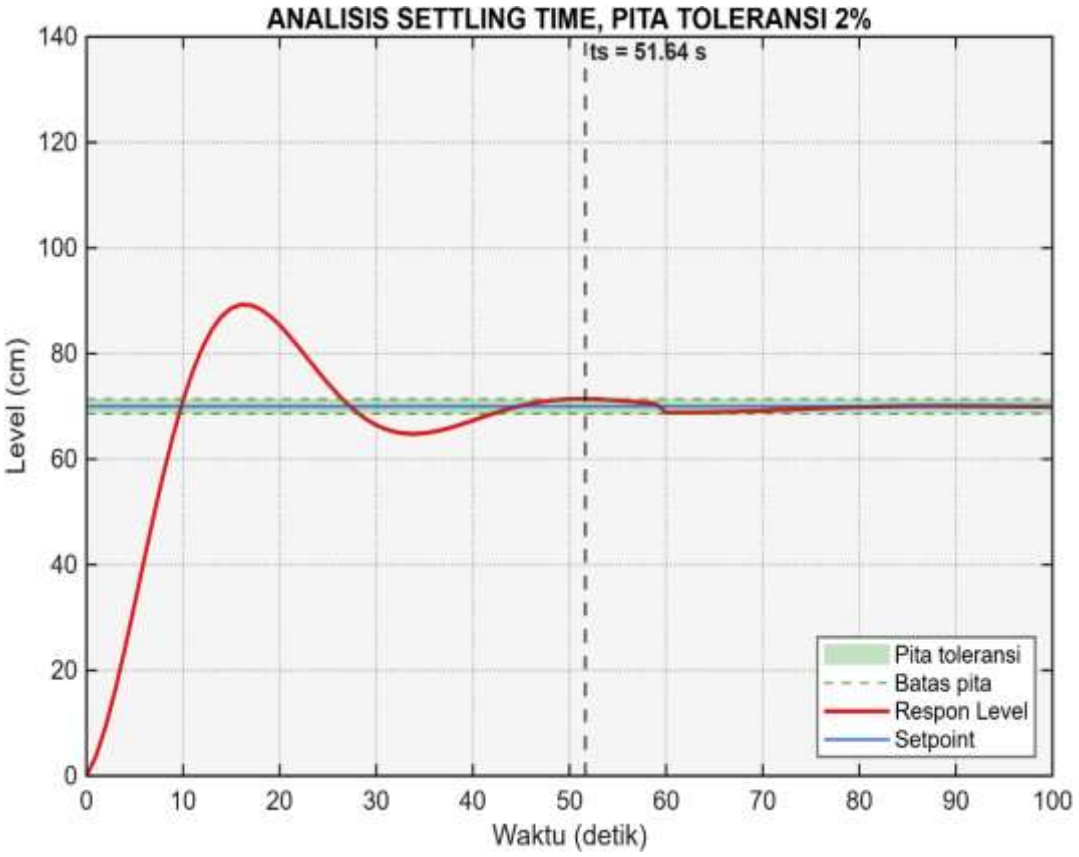
Batas atas = 70 +(2 cm x 70)

= 71,4 cm

Dengan demikian, sistem dikatakan telah mencapai kondisi settling apabila respons level berada pada rentang :

$$68{,}6 \text{ cm} \leq y(t) \leq 71{,}4 \text{ cm}$$

Dan selanjutnya tetap berada pada rentang tersebut.



Gambar 4. 7 Analisis *Settling Time Respons* Level Drum

Pada Gambar 4.7 ditampilkan respons level drum, nilai setpoint sebesar 70cm, serta batas atas dan batas bawah daerah toleransi ±2cm. Daerah tersebut digunakan untuk menentukan waktu ketika respons sistem mulai berada dalam kondisi stabil. Berdasarkan hasil analisis, respons sistem memasuki daerah settling pada waktu 51,64 detik. Dengan demikian, nilai settling time sistem adalah sebesar 51,64 detik.

Nilai *settling time* menunjukkan kemampuan sistem dalam mengurangi penyimpangan dan mencapai kondisi stabil setelah mengalami perubahan. Semakin singkat *settling time*, semakin cepat sistem kembali berada dalam kondisi yang mendekati setpoint. Dalam sistem kendali level drum boiler, settling time menjadi parameter penting karena sistem diharapkan dapat mempertahankan level pada kondisi yang stabil setelah terjadi perubahan selama proses pengendalian.

4.4.4 Rekapitulasi Hasil Evaluasi Parameter Kinerja

Berdasarkan hasil analisis overshoot, *rise time*, dan *settling time*, diperoleh rekapitulasi parameter kinerja sistem sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Rekapitulasi Parameter Kinerja Sistem Kendali

Parameter	**Hasil**
Set point (cm)	70 cm
Level maximum (cm)	89,28 cm
Maximum overshoot (%)	27.54%
Rise time 10-90 (s)	7.2 s
Settling time (s)	51.64 s

Berdasarkan Tabel 4.2, sistem kendali level drum memiliki karakteristik respons yang dapat dievaluasi berdasarkan tiga parameter utama. Nilai overshoot menunjukkan besarnya penyimpangan maksimum respons dari setpoint, sedangkan *rise time* menunjukkan kecepatan sistem dalam mencapai nilai akhir. *Settling time* menunjukkan waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai dan mempertahankan kondisi stabil. Ketiga parameter tersebut digunakan secara bersamaan karena masing-masing memberikan informasi yang berbeda mengenai karakteristik sistem. Oleh karena itu, kualitas respons sistem tidak ditentukan hanya berdasarkan satu parameter, tetapi berdasarkan kombinasi antara kecepatan respons, besarnya penyimpangan, dan kemampuan sistem dalam mencapai kondisi stabil.

4.5 Analisis Keandalan PLTU

Analisis keandalan operasi PLTU dilakukan dengan menghubungkan hasil respons sistem kendali level drum dengan kemampuan sistem dalam mempertahankan kondisi operasi yang mendekati nilai yang diinginkan. Pada

Subbab 4.4 telah diperoleh karakteristik respons berdasarkan overshoot, rise time, dan *settling time*. Hasil tersebut kemudian digunakan untuk melihat kemampuan sistem dalam menghadapi perubahan kondisi operasi.

Selain kondisi normal, data simulasi juga menunjukkan adanya perubahan level pada detik ke-60. Sebelum perubahan tersebut terjadi, level pada detik ke-59 berada pada 70,46 cm. Pada detik ke-60, level turun menjadi 68,80 cm**.** Perubahan ini digunakan sebagai kondisi gangguan dalam analisis kemampuan pemulihan sistem.

4.5.1 Analisis Respons terhadap Gangguan

Gangguan pada sistem disimulasikan pada waktu 60 detik. Sebelum gangguan, level drum berada pada kondisi yang relatif dekat dengan setpoint. Pada detik ke-59, level tercatat sebesar 70,46 cm. Setelah gangguan diberikan, level mengalami penurunan menjadi 68,80 cm pada detik ke-60. Dengan setpoint sebesar 70 cm, penyimpangan level terhadap setpoint adalah :

Δ_y = 70 – 68,8037

= 1,1963 cm

Dengan demikian, penyimpangan maksimum setelah gangguan sebesar sekitar 1,20 poin persentase, atau sekitar 1,71% terhadap setpoint**.** Nilai tersebut masih berada dalam batas toleransi ±2 cm terhadap setpoint 70 cm, yaitu:

4 $68{,}6\% \leq y(t) \leq 71{,}4$ cm

Dengan demikian, meskipun terjadi penurunan level pada detik ke-60, respons masih berada dalam daerah toleransi yang digunakan dalam evaluasi sistem.

4.5.2 Kemampuan Pemulihan Sistem

Setelah mengalami penurunan pada detik ke-60, level drum kembali meningkat secara bertahap. Pada detik ke-70, level telah mencapai 69,18 cm**,** kemudian meningkat menjadi 69,88 cm pada detik ke-80**.**

Pada detik ke-83, level tercatat sebesar 69,99 cm**,** sedangkan pada detik ke-84 level mencapai 70,01 cm**.** Dengan demikian, respons kembali mencapai nilai

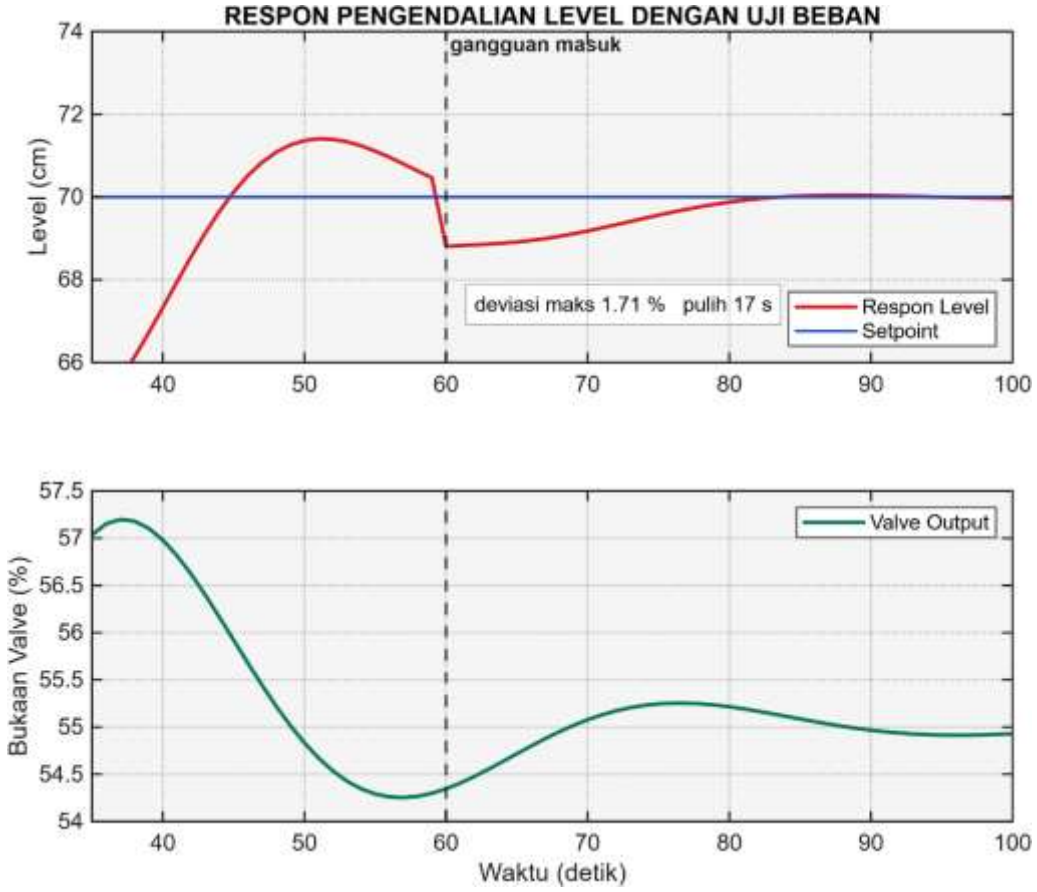
yang sangat dekat dengan setpoint sekitar 24 detik setelah gangguan diberikan**.** Perubahan respons setelah gangguan dapat dirangkum sebagai berikut.

Tabel 4. 3 Respons Sistem Setelah Gangguan

Waktu (s)	**Setpoint (cm)**	**Level Drum (cm)**	**Kondisi**
59	70	70,46	Sebelum gangguan
60	70	68,80	Gangguan
61	70	68,83	Pemulihan
70	70	69,18	Pemulihan
80	70	69,88	Mendekati setpoint
83	70	69,99	Sangat mendekati setpoint
84	70	70,01	Mencapai sekitar setpoint
90	70	70,04	Kondisi stabil
100	70	69,97	Kondisi akhir

Berdasarkan Tabel 4.3, sistem mampu melakukan pemulihan setelah terjadi perubahan level pada detik ke-60. Level yang sempat turun menjadi 68,80 cm kemudian meningkat secara bertahap hingga kembali berada di sekitar nilai setpoint.

4.5.3 Plot Respons terhadap Gangguan



Gambar 4. 8 Respons Level Drum terhadap Gangguan

Gambar 4.8 menunjukkan respons level drum sebelum dan setelah gangguan pada detik ke-60. Sebelum gangguan, level berada di sekitar setpoint 70cm dengan penyimpangan yang relatif kecil. Pada detik ke-60 terjadi penurunan level hingga 68,80cm. Setelah itu, sistem melakukan koreksi sehingga level kembali meningkat secara bertahap. Respons mencapai sekitar nilai setpoint pada detik ke-84 dan selanjutnya berada di sekitar 70cm. Berdasarkan grafik tersebut, dapat dilihat bahwa sistem tidak mengalami penyimpangan yang terus meningkat setelah gangguan. Sebaliknya, respons menunjukkan kecenderungan untuk kembali menuju nilai referensi.

4.5.4 Hubungan Parameter Kinerja dengan Operasi

Hasil evaluasi pada Subbab 4.3 memberikan informasi yang dapat digunakan untuk melihat kemampuan sistem kendali dalam mendukung kestabilan operasi. Nilai overshoot menunjukkan

bahwa sistem mengalami penyimpangan cukup besar pada respons awal. Level maksimum yang tercatat sebesar 89,28cm terjadi pada detik ke-16, sedangkan setpoint berada pada 70cm. Kondisi tersebut menunjukkan adanya respons transien yang cukup tinggi pada awal proses.

Meskipun demikian, respons kemudian mengalami proses koreksi dan bergerak mendekati nilai setpoint. Pada akhir pengamatan, level mencapai 69,97cm, atau hanya sekitar 0,03 poin persentase dari setpoint. Selain kondisi normal, sistem juga menunjukkan kemampuan untuk merespons gangguan pada detik ke-60. Level turun menjadi 68,80cm, kemudian kembali meningkat dan mencapai sekitar 70cm pada sekitar detik ke-84.

Dengan demikian, berdasarkan data simulasi, sistem kendali menunjukkan kemampuan untuk mengoreksi penyimpangan dan mengembalikan level menuju nilai referensi setelah terjadi perubahan kondisi**.**

4.5.5 Analisis Keandalan Berdasarkan Hasil Simulasi

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian, sistem kendali level drum menunjukkan kemampuan dalam mempertahankan level di sekitar nilai setpoint setelah melewati kondisi transien. Pada kondisi awal, sistem mengalami overshoot yang cukup besar dengan level maksimum sebesar 89,28cm. Setelah mengalami beberapa perubahan respons, sistem secara bertahap mencapai kondisi yang lebih stabil. Pada bagian akhir simulasi, level berada sangat dekat dengan setpoint 70cm.

Ketika diberikan gangguan pada detik ke-60, level mengalami penurunan hingga 68,80cm. Namun, penyimpangan tersebut masih berada dalam batas ±2cm dari setpoint. Sistem kemudian melakukan pemulihan dan mencapai nilai sekitar 70% pada detik ke-84. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali memiliki kemampuan untuk melakukan koreksi terhadap perubahan kondisi dan mempertahankan level pada daerah operasi yang diinginkan.

Namun, hasil ini perlu dipahami sebagai analisis kemampuan sistem kendali berdasarkan simulasi**,** bukan sebagai pengukuran keandalan keseluruhan unit PLTU. Keandalan unit PLTU secara keseluruhan juga dipengaruhi oleh kondisi boiler, pompa, valve, sensor, sistem proteksi, instrumen, pemeliharaan, serta berbagai faktor operasional lainnya. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja sistem kendali level drum memberikan dukungan terhadap kestabilan operasi**,** khususnya dalam mempertahankan level mendekati setpoint dan melakukan pemulihan setelah terjadi gangguan.

4.6 Kesimpulan Analisis Keandalan

Berdasarkan hasil simulasi, sistem kendali level drum mampu mengarahkan level menuju setpoint 70cm setelah kondisi awal sebesar 0cm. Respons awal menunjukkan overshoot dengan nilai maksimum 89,28cm pada detik ke-16. Setelah mengalami respons transien, level bergerak mendekati nilai setpoint. Pada kondisi gangguan yang terjadi pada detik ke-60, level turun dari 70,46cm menjadi 68,80cm. Setelah itu, level kembali meningkat secara bertahap dan mencapai sekitar 70cm pada detik ke-84. Kondisi akhir simulasi menunjukkan level sebesar 69,97cm pada detik ke-100. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali mampu melakukan pemulihan terhadap perubahan kondisi yang diberikan pada simulasi. Dengan demikian, sistem kendali level drum yang dianalisis memiliki karakteristik respons yang mendukung kestabilan level selama periode pengamatan.

BAB 5
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan data, simulasi, dan analisis sistem kendali level drum boiler menggunakan metode kendali PID, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem kendali level drum boiler mampu merespons perubahan menuju nilai setpoint yang ditentukan. Pada penelitian ini, nilai setpoint ditetapkan sebesar 70cm. Berdasarkan hasil simulasi, level drum mengalami kenaikan dari kondisi awal menuju nilai setpoint. Respons kemudian mengalami perubahan transien berupa overshoot dan osilasi sebelum akhirnya bergerak mendekati kondisi steady-state.
2. Respons sistem menunjukkan adanya overshoot pada tahap awal pengendalian. Berdasarkan hasil simulasi, level maksimum yang dicapai adalah sekitar 89,28 cm pada waktu 16 detik, sedangkan nilai setpoint adalah 70 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem mengalami penyimpangan positif sebelum melakukan koreksi dan kembali menuju nilai referensi.
3. Sistem mampu mengurangi error secara bertahap setelah mengalami kondisi transien. Pada awal simulasi, error antara setpoint dan level aktual cukup besar karena level awal berada pada 0 cm. Seiring berjalannya waktu, error mengalami perubahan tanda akibat respons melewati setpoint, kemudian amplitudonya semakin kecil. Pada akhir pengamatan, level berada sangat dekat dengan setpoint sehingga error yang dihasilkan relatif kecil.
4. Berdasarkan evaluasi parameter kinerja, karakteristik sistem dapat diketahui melalui overshoot, rise time, dan settling time. Nilai overshoot diperoleh sebesar 27,54%, rise time sebesar 7,20 detik, dan settling time sebesar 51,64 detik. Ketiga parameter tersebut menunjukkan karakteristik kecepatan, penyimpangan maksimum, dan kemampuan sistem dalam mencapai kondisi stabil.
5. Sistem menunjukkan kemampuan melakukan pemulihan ketika diberikan perubahan atau gangguan pada proses. Pada simulasi, terjadi perubahan level pada sekitar detik ke-60, ketika level mengalami penurunan dari kondisi sebelumnya. Level kemudian kembali bergerak menuju nilai setpoint. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali mampu memberikan tindakan koreksi terhadap perubahan kondisi proses.
6. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem kendali level dapat mendukung kestabilan operasi proses. Hal ini ditunjukkan oleh kemampuan sistem dalam mengurangi error,

mengembalikan level menuju setpoint setelah mengalami penyimpangan, serta mempertahankan level pada daerah yang mendekati nilai referensi pada akhir periode pengamatan.

Analisis keandalan dalam penelitian ini terbatas pada kemampuan respons sistem kendali berdasarkan simulasi. Hasil penelitian belum dapat digunakan sebagai ukuran keandalan keseluruhan unit PLTU karena keandalan operasi PLTU juga dipengaruhi oleh kondisi peralatan, sensor, valve, boiler, pompa, sistem proteksi, pemeliharaan, serta kondisi operasi lainnya.

5.2 SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Parameter PID dapat dilakukan proses tuning dan optimasi lebih lanjut. Penelitian selanjutnya dapat membandingkan beberapa metode tuning, seperti metode Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, atau metode optimasi lainnya, untuk memperoleh kombinasi parameter dan yang menghasilkan respons dengan overshoot lebih kecil dan waktu settling yang lebih singkat.
2. Pengujian terhadap berbagai kondisi gangguan perlu dilakukan. Penelitian selanjutnya dapat memberikan variasi gangguan dengan amplitudo dan waktu yang berbeda untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menghadapi perubahan kondisi operasi yang lebih beragam.
3. Analisis dapat dikembangkan dengan membandingkan PID aktual dan PID hasil tuning. Perbandingan tersebut dapat dilakukan berdasarkan overshoot, rise time, settling time, dan error steady-state sehingga dapat diketahui apakah hasil tuning memberikan peningkatan kinerja dibandingkan parameter pengendali yang digunakan sebelumnya.
4. Model sistem dapat dikembangkan menjadi model yang lebih representatif terhadap kondisi PLTU sebenarnya. Model yang lebih lengkap dapat mempertimbangkan dinamika boiler, karakteristik valve, perubahan beban, serta pengaruh variabel proses lainnya sehingga hasil simulasi dapat memberikan gambaran yang lebih mendekati kondisi lapangan.
5. Analisis keandalan dapat diperluas dengan memasukkan aspek peralatan dan operasional. Penelitian selanjutnya dapat menggabungkan analisis kinerja sistem kendali dengan data gangguan peralatan, data pemeliharaan, maupun indikator keandalan lainnya sehingga analisis keandalan tidak hanya didasarkan pada respons simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Devaraj and D. T, “Drum boiler system water level control: A study of existing hybrid optimization algorithms,” *e-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*, vol. 7, no. December 2023, p. 100383, 2024, doi: 10.1016/j.prime.2023.100383.

[2] A. R. Hakim, Junita, and H. Kanabele, “Optimalisasi Pengendalian Pompa Air Sisa Produksi Berbasis PLC dengan Sensor Floatless Level Switch dan Sensor Redundansi untuk Pencegahan Luapan Air Tangki Industri,” *JST (Jurnal Sains dan Teknol.*, vol. 14, no. 3, pp. 455–467, 2025, doi: 10.23887/jst-undiksha.v14i3.99283.

[3] M. R. S. Putra, Sabiqunassabiqun, and R. Nazarrudin, “Analisis Ketahanan Abrasi Material Hopper pada Sistem Loading Batubara ke Bunker,” vol. 1, no. 1, pp. 12–16, 2025, [Online]. Available: https://doi.org/10.47355/jvs.v1i1/0005

[4] Gatra Wanara Seta, Taufik Barlian, Asri Indah Lestari, Wiwin A. Oktaviani, and Yosi Apriani, “Analisis Efisiensi Energi Listrik Melalui Pengendalian Tekanan dan Level Air Berbasis PLC pada Boiler Berkapasitas 10,5 Ton dan 21 Ton,” *J. Ampere*, vol. 10, no. 2, pp. 200–211, 2025, doi: 10.31851/vgfz6d92.

[5] R. Manikandan, “Three Element Control of Boiler Drum Using Particle,” pp. 1–5, 2014.

[6] A. Senen, ; Titi Ratnasari, ; Yoakim Simamora, J. T. Elektro, and I. T. Pln, “Perancangan Simulasi PID Controller Mengunakan Graphic User Interface dan Simulink,” *J. Kilat*, vol. 9, no. 2, pp. 181–191, 2020, [Online]. Available: https://doi.org/10.33322/kilat.v9i2.1015

[7] B. N. Getu, “Water level controlling system using PID controller,” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 11, no. 23, pp. 11223–11227, 2016.

[8] A. Ilmiah Aplikasi Teknologi, H. Suripto, A. Fathoni, P. Pengaraian, J. Tuanku Tambusai, and K. Rokan Hulu, “JURNAL APTEK Analisis Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Secara Ekonomi; Sebuah Review Berdasarkan Studi Literatur di Indonesia,” *Aptek*, vol. 13, no. 1, 2021.

[9] H. Suripto and A. Fathoni, “Analisis Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya; sebuah review berdasarkan data histori, metode analisis, dan nilai ekonomi,” *Aptek*, vol. 13, no. 1, 2021, doi: 10.30606/aptek.v13i1.490.

[10] N. P. S. Gnana Arun johnson, “Fuzzy Logic Boiler Drum Level Control,” vol. 116, no. 23, pp. 463–469, 2017, [Online]. Available: http://www.ijpam.eu

[11] P. M. Lakshmi and H. P. Kumar, “Steam Boiler Drum Level Control using DCS - One / Three Element Method,” pp. 6931–6937, 2016, doi: 10.15662/IJAREEIE.2016.0508052.

[12] M. Iacob and G. D. Andreescu, “Drum-boiler control system employing shrink and swell effect remission in thermal power plants,” *Int. Congr. Ultra Mod. Telecommun. Control Syst. Work.*, 2011.

[13] A. F. Halihal, “Modeling and control of water level in boiler drum for nassiriyah thermal power plant,” *Iran. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 229–242, 2019, doi: 10.22068/IJEEE.15.2.229.

[14] N. Dey, R. Mandal, and M. Monica Subashini, “Design and implementation of a water level controller using fuzzy logic,” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 2277–2285, 2013.

[15] S. V Kayalvizhi, “Boiler Drum Level Control By Using Hybrid Fuzzy-Pid Controller,” 2018.

[16] L. A. Sabri and H. A. Al-Mshat, “Implementation of Fuzzy and PID Controller to Water Level System using LabView,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 116, no. 11, pp. 975–8887, 2015.

[17] S. R. Tawfeic, “Boiler Drum-Level Modeling,” *JES. J. Eng. Sci.*, vol. 41, no. 5, pp. 1812–1829, 2013, doi: 10.21608/jesaun.2013.114911.

[18] A. Muntaser and N. Buaossa, “Coupled Tank Non-linear System; Modeling and Level Control using PID and Fuzzy Logic Techniques,” *Cornell Univ.*, 2021.

[19] M. Saravanabalaji, E. Muthuramalingam, V. Athappan, and D. Arunnehru, “A Novel Approach for Dynamics Compen-sation in Boiler Drum Level Control,” *Closed Loop Control Soft Switch. Forw. Convert. Using Intell. Controll. IJCTA*, vol. 10, no. 02, pp. 387–398, 2017.

[20] C. Sihombing, P. Rhein Rumahorbo, and R. Situmorang, “Analysis Of The Interlock Motor Force / Induced Draft Fan System On Boilers With Dcs Control At Pt Unilever Oleochemical Indonesia.,” *J. Teknol. Rekayasa Instal. List.*, vol. Vol. 1, pp. 1–8, 2024.

[21] D. R. Kakani, D. Subendran, and S. J. Singh, “Comparative Analysis of PI and PID Controllers for Level and Flow Control in Coupled Tank Systems,” 2024, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2410.22176

[22] A. Subekti and R. Laili, “ANALISIS KINERJA BOILER BERBAHAN BAKAR LIMBAH KULIT KAYU DAN SISA CTS (CUT OF SIZE) PADA PROSES PRODUKSI MDF DI PT SUMATERA PRIMA FIBREBOARD Pendahuluan Perkembangan industri manufaktur berbasis hasil hutan , khususnya industri Medium Density Fibreboard,” vol. 1, no. 2, pp. 71–90, 2025.

[23] I. B. Sulistiawati, N. P. Agustini, and M. N. Affandi, “Boiler Plts Ampah Kampus-Ii Itn,” pp. 1–10.

[24] F. Djaki, S. Abdussamad, I. Z. Nasibu, and A. Y. Dako, “Design and Construction of

an Arduino Uno-Based Water pH Level Monitoring System for Coal-Fired Power Plant Boilers," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 103–109, 2026, doi: 10.37905/jjeee.v8i1.36121.

[25] G. Su, S. Yang, Z. Li, and Z. Li, "Transformer-based Drum-level Prediction in a Boiler Plant with Delayed Relations among Multivariates," *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Eur. ISGT Eur. 2024*, 2024, doi: 10.1109/ISGTEUROPE62998.2024.10863020.

[26] R. Fadli, J. Jufrizel, and W. P. Hastuti, "Analisa Sistem Instrumentasi dan Keandalan Boiler dengan Metode Fault Tree ANALYSIS (FTA) dan Metode Failure Mode And Effect Analysis (FMEA)," *El Sains J. Elektro*, vol. 2, no. 2, 2021, doi: 10.30996/elsains.v2i2.4768.

[27] C. Fatwa Rahmadani, "PENCEGAHAN PELANGGARAN LALU LINTAS PENGGUNAAN SEPEDA LISTRIK," *J. Impresi Indones.*, vol. 2, no. 8, 2023, doi: 10.58344/jii.v2i8.3479.

[28] Y. D. S. Pambudi, "Pemodelan dan Simulasi Steam-Drum Boiler Sederhana Menggunakan Matlab-Simulink," *Epic J. Electr. Power, Instrum. Control*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2018, doi: 10.32493/epic.v1i1.1037.

[29] A. Kajaman, Z. Saleh, and K. Sahal, "Implementation of Embedded PID Controller to Water Level Control System," *Int. J. Adv. Multidiscip. Res. Stud.*, vol. 4, no. 6, pp. 398–406, 2024, doi: 10.62225/2583049x.2024.4.6.3452.

[30] B. Yudha Kencana and A. Widiharto, "Perancangan Sistem Pengendalian Level dan Temperatur Boiler pada Boiler Drum and Heat Exchanger QAD Model BDT921," *Teknofisika*, vol. 1, no. 1, p. 7154, 2012.