

**LAPORAN PERANCANGAN SISTEM KONTROL  
SISTEM KENDALI VOLUME AIR PROCESS PLANT  
METODE TRIAL AND ERROR**



Disusun oleh :

Raditya Wisnu Cahyo Nugroho - 21120122130039

**DEPARTEMEN TEKNIK KOMPUTER  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS DIPONEGORO  
SEMARANG**

**2025**

## **DAFTAR ISI**

<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>4</b>
1.1. Latar Belakang.....	4
1.2. Rumusan Masalah.....	5
1.3. Tujuan .....	6
1.4. Batasan Masalah .....	7
1.5. Manfaat.....	8
1.5.1. Manfaat Teoretis.....	8
1.5.2. Manfaat Praktis .....	8
1.5.3. Manfaat Akademik .....	8
<b>BAB II LANDASAN TEORI .....</b>	<b>9</b>
2.1. Tinjauan Pustaka.....	9
2.2. Sistem Kontrol Kendali Volume Air pada Process Plant.....	10
2.2.1. Prinsip Kerja.....	10
2.2.2. Blok Diagram Sistem Kontrol.....	11
2.2.3. Sistem Kontrol Open Loop vs Closed Loop .....	12
2.2.4. Model Matematika .....	13
2.3. Kontroller PID .....	15
2.3.1. Teori Dasar Kontroler PID .....	15
2.3.2. Transfer Function Kontroler PID .....	16
2.3.3. Karakteristik Respons PID .....	17
2.3.4. Keunggulan dan Kelemahan PID .....	18
2.4. Metode Tuning Trial and Error.....	20
2.4.1. Sejarah dan Pengembangan.....	20
2.4.2. Prinsip Kerja Metode Trial and Error.....	21
2.4.3. Prosedur Tuning Trial and Error.....	22
2.4.4. Kelebihan dan Kekurangan Tuning Trial and Error .....	25
2.5. MATLAB.....	27
2.5.1. Penggunaan Simulink Untuk Simulasi Sistem Dinamik.....	28
2.5.2. Control System Toolbox.....	28
2.5.3. Teknik Pemodelan dan Simulasi .....	28
<b>BAB III PERANCANGAN SISTEM .....</b>	<b>30</b>
3.1. Analisis Sistem .....	30

3.2.	Perancangan Sistem .....	31
3.3.	Perancangan Kontroler PID .....	35
3.4.	Simulasi Sistem .....	36
3.5.	Optimasi Parameter .....	38
3.5.1.	Kriteria Optimasi .....	38
3.5.2.	Fungsi Objektif .....	39
3.5.3.	Perbandingan Metode Tuning .....	39
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....		40
4.1.	Hasil Simulasi .....	40
4.1.1.	Data Simulasi Sistem Closed-Loop .....	40
4.1.2.	Grafik Respons Sistem .....	40
4.1.3.	Analisis Sinyal Kendali .....	42
4.2.	Analisis Kinerja .....	43
4.2.1.	Perbandingan Metode Tuning .....	43
4.2.2.	Analisis Berdasarkan Kriteria Desain .....	43
4.2.3.	Analisis Efisiensi Energi .....	44
4.3.	Analisis Robustness .....	44
4.3.1.	Respons Terhadap Gangguan .....	44
4.3.2.	Sensitivitas Terhadap Variasi Parameter .....	45
4.3.3.	Margin Stabilitas .....	45
4.4.	Pembahasan .....	45
4.4.1.	Sintesis Temuan .....	45
4.4.2.	Interpretasi Hasil .....	46
4.4.3.	Alasan Metode Terbaik .....	46
4.4.4.	Kekurangan dan Limitasi .....	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		48
5.1.	Kesimpulan .....	48
5.1.1.	Pemodelan Sistem .....	48
5.1.2.	Perbandingan Metode Tuning PID .....	48
5.1.3.	Analisis Kinerja dan Robustness .....	49
5.2.	Saran .....	49

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Process plant merupakan suatu sistem industri yang kompleks dimana berbagai proses produksi berlangsung secara terintegrasi dan otomatis. Dalam industri modern, pengendalian parameter proses seperti tekanan, temperatur, laju aliran, dan level/volume menjadi faktor kritis yang menentukan kualitas produk, efisiensi operasi, dan keselamatan kerja. Khususnya dalam pengendalian volume air pada process plant, tantangan yang dihadapi meliputi dinamika sistem yang nonlinear, adanya delay time, gangguan eksternal, serta kebutuhan akan presisi dan stabilitas yang tinggi.

Sistem kendali volume air memiliki peran vital dalam berbagai sektor industri. Pada industri petrokimia, pengendalian level dalam separator vessel dan storage tank sangat penting untuk menjaga kontinuitas proses dan mencegah overflow yang dapat menyebabkan pencemaran lingkungan. Dalam industri pembangkit listrik, sistem kendali level boiler dan cooling tower harus bekerja dengan presisi tinggi untuk menjaga efisiensi termal dan mencegah kerusakan peralatan. Pada industri pengolahan air minum, sistem kendali level reservoir dan tangki distribusi memastikan pasokan air yang kontinu dan sesuai dengan standar kualitas.

Kompleksitas sistem kendali volume air terletak pada karakteristik dinamikanya yang umumnya berupa sistem orde tinggi dengan konstanta waktu yang besar. Berdasarkan pemodelan matematis, sistem volume air process plant dapat direpresentasikan dengan transfer function  $G(s) = 493.3/(s^2 + 0.0018s)$ , yang menunjukkan adanya pole integrator dan konstanta waktu yang sangat besar. Karakteristik ini mengakibatkan respons sistem yang lambat, adanya steady-state error, serta sensitivitas terhadap gangguan eksternal.

Dalam dekade terakhir, perkembangan teknologi otomasi industri telah mendorong implementasi sistem kendali digital yang lebih canggih. Mikrokontroler dan PLC (Programmable Logic Controller) telah menjadi standar dalam implementasi algoritma kendali, menggantikan sistem kendali analog

konvensional. Sensor modern seperti ultrasonic sensor HC-SR04 untuk deteksi level dan flow sensor YF-S201 memberikan akurasi pengukuran yang tinggi dengan response time yang cepat. Actuator seperti servo-controlled valve memungkinkan kontrol yang presisi terhadap laju aliran.

Pemilihan strategi kendali yang tepat menjadi kunci keberhasilan sistem. Kontroler PID (Proportional-Integral-Derivative) tetap menjadi pilihan utama dalam industri karena kesederhanaannya, kemudahan tuning, dan performa yang memadai untuk sebagian besar aplikasi. Namun, untuk sistem dengan karakteristik khusus seperti multiple-input multiple-output (MIMO) atau sistem dengan coupling yang kuat, pendekatan state-space dengan teknik pole placement menawarkan fleksibilitas dan kontrol yang lebih baik.

Studi literatur menunjukkan bahwa metode tuning PID konvensional seperti Ziegler-Nichols masih relevan, namun sering menghasilkan overshoot yang tinggi dan settling time yang panjang. Metode tuning modern seperti optimization-based tuning dan adaptive tuning memberikan performa yang lebih baik, namun membutuhkan komputasi yang lebih kompleks. Dalam konteks aplikasi industri, trade-off antara performa, kompleksitas implementasi, dan biaya menjadi pertimbangan utama.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Permasalahan utama dalam pengendalian volume air pada process plant adalah bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol yang mampu menjaga level air sesuai dengan setpoint meskipun terdapat gangguan dan ketidakpastian dalam sistem. Berdasarkan analisis latar belakang di atas, dapat diidentifikasi beberapa permasalahan utama dalam perancangan sistem kendali volume air process plant:

1. Tantangan Karakteristik Sistem: Bagaimana mengatasi karakteristik integrator dan konstanta waktu besar pada sistem tangki air yang menyebabkan respons sistem lambat dan rentan terhadap akumulasi error?
2. Optimasi Parameter Kontroler: Bagaimana menentukan parameter kontroler PID yang optimal untuk sistem kendali volume air menggunakan metode

Trial and Error, dan bagaimana perbandingan performanya dengan metode tuning klasik Ziegler-Nichols?

3. Analisis Performa Sistem: Bagaimana menganalisis dan mengevaluasi kinerja sistem kendali berdasarkan kriteria waktu respons seperti rise time, settling time, overshoot, dan steady-state error?
4. Robustness dan Stabilitas: Bagaimana memastikan sistem kendali yang dirancang dapat mempertahankan kinerja optimal dalam menghadapi variasi parameter sistem dan gangguan eksternal?
5. Implementasi Simulasi: Bagaimana mengimplementasikan dan memvalidasi sistem kendali volume air menggunakan MATLAB/Simulink dengan mempertimbangkan aspek praktis dan batasan sistem?

### **1.3. Tujuan**

1. Merancang dan menganalisis sistem kendali volume air process plant menggunakan kontroler PID dengan metode tuning Trial and Error serta melakukan evaluasi komparatif dengan metode Ziegler-Nichols melalui simulasi MATLAB/Simulink.
2. Pemodelan Sistem: Mengembangkan model matematis sistem kendali volume air dalam bentuk transfer function dan representasi state-space yang akurat untuk keperluan simulasi dan analisis.
3. Perancangan Kontroler PID: Merancang kontroler PID dengan menggunakan metode Trial and Error untuk mencapai spesifikasi performa optimal dalam hal rise time, settling time, dan overshoot minimum.
4. Analisis Komparatif: Melakukan perbandingan komprehensif antara metode tuning Trial and Error, Ziegler-Nichols 1, dan Ziegler-Nichols 2 berdasarkan kriteria kinerja sistem kendali.
5. Evaluasi Kinerja: Menganalisis kinerja sistem kendali berdasarkan metrik performa standar dan menentukan parameter kontroler yang memberikan trade-off optimal antara kecepatan respons dan stabilitas sistem.
6. Validasi Simulasi: Memvalidasi hasil perancangan melalui simulasi komprehensif menggunakan MATLAB/Simulink dan menganalisis robustness sistem terhadap variasi parameter dan gangguan.

7. Optimasi Setpoint: Menentukan setpoint optimal berdasarkan analisis overshoot, safety margin, dan kapasitas sistem untuk memastikan operasi yang aman dan efisien.

#### **1.4. Batasan Masalah**

##### **1. Batasan Teknis:**

- Model Sistem: Penelitian fokus pada sistem tangki tunggal (single tank) dengan asumsi aliran masuk terkontrol dan aliran keluar pasif melalui valve.
- Transfer Function: Menggunakan transfer function orde kedua  $G(s) = 1/(493.3s^2 + 0.0018s)$  yang diperoleh dari identifikasi sistem eksperimental.
- Jenis Kontroler: Hanya menggunakan kontroler PID klasik tanpa modifikasi atau advanced control strategies seperti fuzzy logic atau neural network.
- Metode Tuning: Membatasi pada tiga metode tuning: Trial and Error, Ziegler-Nichols 1, dan Ziegler-Nichols 2.

##### **2. Batasan Lingkup:**

- Simulasi: Penelitian dilakukan secara simulasi menggunakan MATLAB/Simulink tanpa implementasi hardware fisik.
- Kondisi Operasi: Analisis dilakukan pada kondisi operasi normal tanpa mempertimbangkan kondisi ekstrem seperti kegagalan sensor atau aktuator.
- Gangguan: Gangguan yang dipertimbangkan terbatas pada step disturbance dan tidak meliputi gangguan stokastik atau noise measurement yang kompleks.
- Kapasitas Sistem: Menggunakan referensi kapasitas tangki 1000 liter untuk analisis safety margin dan optimasi setpoint.

##### **3. Batasan Metodologi:**

- Kriteria Evaluasi: Evaluasi kinerja fokus pada kriteria waktu respons standar tanpa mempertimbangkan aspek ekonomi atau konsumsi energi.
- Validasi: Validasi hasil dilakukan melalui simulasi numerik tanpa validasi eksperimental pada sistem fisik.

## **1.5. Manfaat**

### **1.5.1. Manfaat Teoretis**

1. Pengembangan Pengetahuan: Memberikan kontribusi dalam pemahaman karakteristik sistem kendali volume air dan efektivitas metode tuning Trial and Error dibandingkan metode konvensional.
2. Metodologi Analisis: Menyediakan framework analisis komparatif yang sistematis untuk evaluasi kinerja berbagai metode tuning kontroler PID pada sistem dengan karakteristik integrator.
3. Optimasi Parameter: Mengembangkan pendekatan optimasi setpoint yang mempertimbangkan aspek safety margin dan utilisasi kapasitas sistem secara simultan.

### **1.5.2. Manfaat Praktis**

1. Panduan Implementasi: Menyediakan panduan praktis untuk engineer dalam memilih metode tuning yang sesuai dengan karakteristik sistem dan spesifikasi performa yang diinginkan.
2. Referensi Industri: Memberikan referensi untuk industri process plant dalam merancang sistem kendali volume air yang optimal dengan mempertimbangkan trade-off antara performa dan robustness.
3. Validasi Simulasi: Mendemonstrasikan efektivitas penggunaan MATLAB/Simulink sebagai tools validasi sebelum implementasi sistem kendali pada plant sebenarnya.

### **1.5.3. Manfaat Akademik**

1. Materi pembelajaran: Menyediakan studi kasus komprehensif untuk pembelajaran sistem kendali di tingkat universitas dengan fokus pada aplikasi praktis di industri.
2. Pengembangan laboratorium: Metodologi dan hasil simulasi dapat dijadikan basis untuk pengembangan modul praktikum sistem kendali.
3. Penelitian lanjutan: Memberikan foundation untuk penelitian lanjutan dalam bidang kontroler adaptive, robust control, atau implementasi IoT pada sistem kendali process plant.



## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1. Tinjauan Pustaka**

Penelitian tentang sistem kendali volume air pada process plant telah menjadi topik yang extensively studied dalam literatur kontrol industri. Beberapa referensi utama yang menjadi dasar theoretical framework penelitian ini adalah:

Astrom dan Hagglund (2006) dalam bukunya "Advanced PID Control" memberikan comprehensive analysis tentang desain dan tuning kontroler PID untuk berbagai jenis plant industri. Mereka menekankan bahwa sistem level control memiliki karakteristik unik berupa integrating process yang membutuhkan pendekatan khusus dalam tuning. Menurut mereka, sistem dengan transfer function yang mengandung pole di origin ( $s=0$ ) cenderung menghasilkan steady-state error yang besar jika tidak dikompensasi dengan proper integral action. Penelitian mereka menunjukkan bahwa metode Ziegler-Nichols konvensional sering menghasilkan overshoot yang berlebihan untuk integrating systems, sehingga diperlukan modifikasi parameter atau pendekatan tuning alternatif.

Seborg, Edgar, Mellichamp, dan Doyle (2016) dalam "Process Dynamics and Control" memberikan framework matematis yang kuat untuk pemodelan sistem process plant. Mereka menjelaskan bahwa liquid level systems umumnya dapat dimodelkan sebagai first-order integrating process, namun dengan adanya pipe dynamics dan flow sensor lag, sistem dapat menjadi higher-order system. Transfer function  $G(s) = K/(\tau s + 1)s$  merepresentasikan sistem level control dengan time constant  $\tau$  dan gain  $K$  yang tergantung pada cross-sectional area tangki dan karakteristik valve. Mereka juga membahas pentingnya consideration terhadap physical constraints seperti maximum flow rate dan tank capacity dalam desain kontroler.

Dede Irawan Saputra, Irvan Budiawan, dan Andhika Jayanugraha (2022) dalam penelitian "Pemodelan dan Simulasi Sistem Kendali Volume Air Pada Process Plant Dengan Metode State Feedback" melakukan comprehensive study tentang implementasi pole placement technique untuk water level control. Penelitian mereka menggunakan state-space representation dengan state variables

berupa flow rate dan volume, menghasilkan sistem matrix A dan B yang kemudian digunakan untuk menentukan feedback gain K1 dan K2. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode pole placement dapat mencapai overshoot 1% dengan peak time 135 detik, yang superior dibandingkan dengan kontroler PID konvensional. Namun, mereka juga mencatat bahwa implementasi state feedback membutuhkan full state observation yang mungkin tidak selalu tersedia dalam aplikasi praktis.

## **2.2. Sistem Kontrol Kendali Volume Air pada Process Plant**

### **2.2.1. Prinsip Kerja**

Sistem kendali volume air process plant merupakan implementasi fundamental dari teori kontrol otomatis yang bertujuan untuk mempertahankan level volume air pada nilai yang diinginkan (setpoint) dengan akurasi tinggi dan respons yang stabil. Prinsip kerja sistem ini didasarkan pada konsep umpan balik negatif (negative feedback) yang menciptakan loop tertutup untuk koreksi berkelanjutan terhadap deviasi yang terjadi.

Komponen utama sistem kendali terdiri dari elemen sensor level yang mengukur volume air aktual dalam tangki, kontroler PID yang memproses sinyal error dan menghasilkan sinyal kendali, serta aktuator berupa pompa atau valve yang mengatur aliran masuk air. Prinsip operasional dimulai ketika sensor mengukur level volume air aktual dan mengirimkan sinyal umpan balik ke kontroler. Kontroler kemudian membandingkan nilai aktual dengan setpoint yang telah ditetapkan untuk menghasilkan sinyal error.

Sinyal error ini diproses melalui tiga komponen PID yaitu proporsional yang memberikan respons langsung terhadap magnitude error, integral yang mengatasi steady-state error dengan mengakumulasi error masa lalu, dan derivative yang mengantisipasi perubahan error masa depan berdasarkan rate of change. Output dari kontroler PID berupa sinyal kendali yang mengatur bukaan valve atau kecepatan pompa untuk menambah atau mengurangi aliran air masuk tangki.

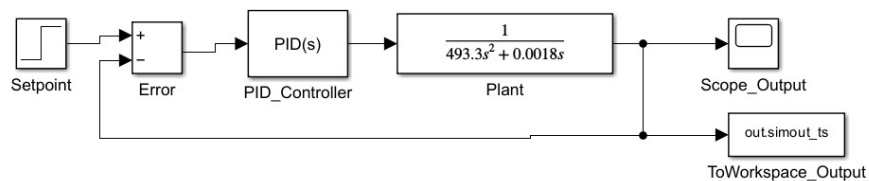
Dinamika sistem kendali ini mengikuti prinsip kontinuitas massa dimana laju perubahan volume dalam tangki sama dengan selisih antara aliran masuk dan aliran keluar. Ketika volume aktual di bawah setpoint, kontroler akan membuka

valve lebih lebar atau meningkatkan kecepatan pompa untuk menambah aliran masuk. Sebaliknya, ketika volume melebihi setpoint, kontroler akan mengurangi aliran masuk atau bahkan membuka valve pembuangan jika tersedia.

Kestabilan sistem dijamin melalui desain parameter PID yang tepat, dimana pole sistem harus berada di sisi kiri s-plane untuk menghasilkan respons yang stabil dan konvergen. Karakteristik respons sistem seperti rise time, settling time, dan overshoot ditentukan oleh lokasi pole dan zero dalam domain frekuensi kompleks, yang dapat dianalisis melalui root locus dan bode plot.

### 2.2.2. Blok Diagram Sistem Kontrol

Representasi sistem kontrol dalam bentuk blok diagram memberikan visualisasi yang jelas tentang aliran informasi dan sinyal dalam sistem. Komponen-komponen utama dalam blok diagram sistem kontrol adalah:



Sistem kendali umpan balik (feedback control system) terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi untuk mengendalikan volume air dalam process plant.

- **Setpoint:** Berfungsi sebagai referensi atau nilai target yang diinginkan untuk output sistem, dalam hal ini merepresentasikan level volume air yang diharapkan. Sinyal setpoint ini kemudian diteruskan ke blok Error
- **Blok Error:** Merupakan summing junction dengan konfigurasi input positif-negatif, dimana fungsinya adalah menghitung selisih antara nilai setpoint dengan nilai output aktual sistem (feedback signal) untuk menghasilkan sinyal error yang akan menjadi dasar koreksi sistem. Sinyal error yang dihasilkan selanjutnya diproses oleh PID Controller
- **PID Controller:** Merupakan jantung dari sistem kendali ini. Kontroler PID memiliki tiga komponen aksi yaitu Proportional (P) yang memberikan

respons proporsional terhadap error saat ini, Integral (I) yang mengakumulasi error masa lalu untuk mengeliminasi steady-state error, dan Derivative (D) yang memprediksi error masa depan berdasarkan rate of change error untuk memperbaiki respons transient. Output dari PID controller berupa sinyal kendali yang kemudian dikirim ke Plant

- **Plant:** Merepresentasikan sistem fisik volume air dengan transfer function  $G(s) = 1/(493.3s^2 + 0.0018s)$ , dimana transfer function ini menggambarkan dinamika sistem orde kedua dengan karakteristik integrator dan konstanta waktu yang besar

Untuk keperluan monitoring dan analisis, sistem dilengkapi dengan dua output yaitu **Scope\_Output** yang berfungsi untuk visualisasi real-time respons sistem dalam bentuk grafik, dan **ToWorkspace\_Output** yang menyimpan data simulasi ke workspace MATLAB dengan nama variabel 'simout\_ts' dalam format timeseries untuk analisis lebih lanjut.

### 2.2.3. Sistem Kontrol Open Loop vs Closed Loop

Sistem Kontrol Open Loop adalah sistem dimana output tidak mempengaruhi control action. Karakteristik sistem open loop:

- Control action tidak bergantung pada output sistem
- Tidak ada feedback mechanism
- Performa sistem tergantung pada kalibrasi dan karakteristik plant
- Tidak dapat mengatasi disturbance atau variasi parameter
- Implementasi lebih sederhana dan murah

Sistem Kontrol Closed Loop adalah sistem dimana control action dipengaruhi oleh output sistem melalui feedback mechanism. Karakteristik sistem closed loop:

- Memiliki feedback loop yang membandingkan output dengan reference
- Dapat mengatasi disturbance dan parameter variations
- Self-correcting capability melalui error-based control
- Lebih kompleks namun memberikan performa yang superior
- Membutuhkan sensor untuk measurement dan feedback

Untuk sistem kendali volume air process plant, closed loop control adalah pilihan yang tepat karena:

- Adanya gangguan eksternal (variasi supply pressure, temperature effects)
- Parameter sistem yang dapat berubah (viscosity, density variations)
- Kebutuhan akurasi tinggi dalam maintaining setpoint
- Safety requirements yang mengharuskan monitoring kontinyu

#### **2.2.4. Model Matematika**

Model matematika sistem kendali volume air process plant dikembangkan berdasarkan prinsip kesetimbangan massa dan dinamika aliran fluida. Representasi matematika ini penting untuk analisis stabilitas, desain kontroler, dan prediksi performa sistem.

##### **Persamaan Kesetimbangan Massa:**

Berdasarkan hukum kekekalan massa, laju perubahan volume dalam tangki dapat dinyatakan sebagai:

$$dV/dt = Q_{in} - Q_{out}$$

dimana:

- $V$  = volume air dalam tangki ( $m^3$ )
- $Q_{in}$  = laju aliran masuk ( $m^3/s$ )
- $Q_{out}$  = laju aliran keluar ( $m^3/s$ )
- $t$  = waktu (s)

##### **Model Dinamika Aliran:**

Aliran keluar tangki mengikuti persamaan Torricelli yang dimodifikasi:

$$Q_{out} = Cd \times A \times \sqrt{2gh}$$

dimana:

- $Cd$  = koefisien discharge
- $A$  = luas penampang orifice ( $m^2$ )
- $g$  = percepatan gravitasi ( $9.81 m/s^2$ )
- $h$  = tinggi level air (m)

##### **Linearisasi dan Fungsi Transfer:**

Untuk keperluan analisis dan desain kontroler, model nonlinear dilinearisasi di sekitar titik operasi. Dengan asumsi tangki berbentuk silinder dengan luas penampang  $A_t$ , maka:

$$h = V/A_t$$

Substitusi dan linearisasi menghasilkan fungsi transfer orde pertama:

$$G(s) = K/(\tau s + 1)$$

Namun, berdasarkan data sistem yang dianalisis, plant memiliki karakteristik yang lebih kompleks dengan fungsi transfer:

$$G(s) = \frac{1}{(493.3s^2 + 0.0018s)}$$

#### **Analisis Karakteristik Sistem:**

- Fungsi transfer ini menunjukkan sistem orde kedua dengan:
- Dua pole:  $s_1 = 0$  dan  $s_2 = -0.000004$
- Tidak memiliki zero
- Pole di origin mengindikasikan karakteristik integrator murni
- Pole kedua sangat dekat dengan origin menunjukkan konstanta waktu besar

#### **Analisis Stabilitas:**

Dengan menggunakan kriteria Routh-Hurwitz, sistem open-loop marginal stabil karena adanya pole di origin. Untuk mencapai stabilitas closed-loop, desain kontroler harus memastikan semua pole closed-loop berada di sisi kiri s-plane.

#### **Respons Temporal:**

Respons step sistem dapat diprediksi menggunakan inverse Laplace transform:

$$y(t) = L^{-1}[G(s)/s] = \int_0^t \frac{1}{(493.3\tau^2 + 0.0018\tau)} d\tau$$

#### **Model State-Space:**

Representasi state-space untuk analisis modern:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

## 2.3. Kontroller PID

### 2.3.1. Teori Dasar Kontroler PID

Kontroler Proporsional-Integral-Derivative (PID) merupakan algoritma kontrol yang paling fundamental dan banyak digunakan dalam aplikasi industri karena kesederhanaan implementasi dan efektivitas yang terbukti. Konsep dasar PID dibangun atas prinsip koreksi error melalui tiga aksi kontrol yang bekerja secara simultan untuk menghasilkan sinyal kendali yang optimal.

#### Aksi Proporsional (P):

Komponen proporsional memberikan respons yang sebanding dengan magnitude error saat ini. Aksi ini menghasilkan sinyal kendali yang langsung proporsional terhadap deviation antara setpoint dan process variable. Secara matematis:

$$u_p(t) = K_p \times e(t)$$

dimana  $K_p$  adalah gain proporsional dan  $e(t)$  adalah error. Karakteristik aksi proporsional meliputi respons yang cepat terhadap perubahan error, kemampuan mengurangi rise time, namun tidak dapat mengeliminasi steady-state error secara sempurna. Peningkatan gain proporsional akan mempercepat respons sistem tetapi dapat menyebabkan overshoot dan ketidakstabilan jika terlalu tinggi.

#### Aksi Integral (I):

Komponen integral berfungsi mengakumulasi error masa lalu untuk mengeliminasi steady-state error yang tidak dapat diatasi oleh aksi proporsional. Aksi integral dinyatakan sebagai:

$$u_i(t) = K_i \times \int_0^t e(\tau) d\tau$$

dimana  $K_i$  adalah gain integral. Karakteristik utama aksi integral adalah kemampuan mengeliminasi offset error secara sempurna dalam steady-state, namun dapat menyebabkan respons yang lambat dan overshoot jika gain terlalu tinggi. Integral windup merupakan fenomena yang harus diperhatikan ketika aktuator mencapai saturasi.

### **Aksi Derivative (D):**

Komponen derivative mengantisipasi error masa depan berdasarkan rate of change error saat ini. Aksi derivative dinyatakan sebagai:

$$u_D(t) = K_d \times de(t)/dt$$

dimana  $K_d$  adalah gain derivative. Karakteristik aksi derivative meliputi kemampuan memprediksi tren error, mengurangi overshoot, memperbaiki stabilitas sistem, namun sensitif terhadap noise dan dapat menyebabkan actuator chattering jika gain terlalu tinggi.

### **Filosofi Kontrol PID:**

Filosofi dasar PID mengombinasikan tiga perspektif waktu: proporsional merespons kondisi saat ini, integral mengoreksi masa lalu, dan derivative mengantisipasi masa depan. Kombinasi ketiga aksi ini menciptakan kontroler yang robust dan adaptif terhadap berbagai karakteristik plant dan gangguan eksternal.

### **2.3.2. Transfer Function Kontroler PID**

Fungsi transfer kontroler PID merepresentasikan hubungan matematis antara sinyal error input dan sinyal kendali output dalam domain frekuensi kompleks. Representasi ini fundamental untuk analisis stabilitas, performa, dan desain sistem kontrol.

#### **Fungsi Transfer Paralel:**

Bentuk standar fungsi transfer PID dalam konfigurasi paralel:

$$C(s) = K_p + K_i/s + K_d \times s$$

atau dapat ditulis sebagai:

$$C(s) = K_p(1 + 1/(T_i \times s) + T_d \times s)$$

dimana:

- $T_i = K_p/K_i$  (integral time constant)
- $T_d = K_d/K_p$  (derivative time constant)

#### **Fungsi Transfer Seri:**

Dalam beberapa implementasi, PID dikonfigurasi dalam bentuk seri:

$$C(s) = K_c \times (1 + 1/(T_i \times s)) \times (1 + T_d \times s)$$



### Analisis Pole dan Zero:

Fungsi transfer PID memiliki karakteristik:

- Satu pole di origin ( $s = 0$ ) dari aksi integral
- Dua zero yang lokasinya ditentukan oleh rasio parameter PID

Lokasi zero dapat dihitung dari persamaan karakteristik:

$$s^2 + (Kp/Kd)s + (Ki/Kd) = 0$$

### Implementasi Praktis:

Dalam implementasi digital, fungsi transfer menggunakan transformasi z:

$$C(z) = Kp + Ki \times T/(z - 1) + Kd \times (z - 1)/(T \times z)$$

dimana T adalah periode sampling.

### Modified PID:

Untuk mengurangi sensitivitas terhadap noise, derivative action sering dimodifikasi:

$$C(s) = Kp + Ki/s + Kd \times s/(\tau_f \times s + 1)$$

dimana  $\tau_f$  adalah filter time constant.

### 2.3.3. Karakteristik Respons PID

Karakteristik respons sistem kontrol PID mencakup berbagai parameter performa yang menggambarkan kualitas kontrol dan stabilitas sistem. Analisis karakteristik ini penting untuk evaluasi dan optimisasi parameter kontroler.

- Rise Time ( $t_r$ ): Waktu yang diperlukan sistem untuk naik dari 10% hingga 90% nilai steady-state. Rise time dipengaruhi terutama oleh gain proporsional, dimana peningkatan  $K_p$  akan mengurangi rise time namun dapat menyebabkan overshoot.
- Peak Time ( $t_p$ ): Waktu yang diperlukan untuk mencapai nilai puncak pertama. Peak time berbanding terbalik dengan frekuensi natural teredam sistem closed-loop.
- Overshoot ( $M_p$ ): Persentase nilai puncak yang melebihi nilai steady-state. Overshoot dinyatakan sebagai:

$$M_p = (y_{peak} - y_{ss})/y_{ss} \times 100\%$$

- Settling Time ( $t_s$ ): Waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai dan tetap berada dalam toleransi  $\pm 2\%$  atau  $\pm 5\%$  dari nilai steady-state. Parameter ini menggambarkan kecepatan sistem mencapai kondisi steady-state.
- Steady-State Error ( $e_{ss}$ ): Perbedaan antara nilai setpoint dan nilai steady-state akhir. Untuk sistem tipe-1 dengan PID, steady-state error untuk input step adalah nol.
- Gain Margin (GM): Margin keamanan terhadap ketidakstabilan yang diukur dari gain yang dapat ditambahkan sebelum sistem menjadi tidak stabil.
- Phase Margin (PM): Margin fase yang tersedia sebelum sistem mencapai kondisi marginal stabil. Phase margin yang baik umumnya antara  $45^\circ$ - $60^\circ$ .
- Bandwidth: Rentang frekuensi dimana sistem dapat mengikuti sinyal referensi dengan akurasi yang dapat diterima.

Pengaruh Parameter PID:

Peningkatan  $K_p$ :

- Mengurangi rise time dan steady-state error
- Meningkatkan overshoot
- Dapat mengurangi stabilitas

Peningkatan  $K_i$ :

- Mengeliminasi steady-state error
- Meningkatkan overshoot
- Memperlambat respons transient

Peningkatan  $K_d$ :

- Mengurangi overshoot
- Meningkatkan stabilitas
- Dapat menyebabkan sensitivitas noise

#### **2.3.4. Keunggulan dan Kelemahan PID**

Kontroler PID memiliki berbagai keunggulan yang menjadikannya pilihan utama dalam aplikasi kontrol industri, namun juga memiliki keterbatasan yang perlu dipahami untuk implementasi yang optimal.

Keunggulan PID

- Kesederhanaan Implementasi: PID mudah dipahami dan diimplementasikan baik dalam bentuk analog maupun digital. Algoritma yang relatif sederhana memungkinkan implementasi pada berbagai platform kontroler dari PLC hingga mikrokontroler sederhana.
- Efektivitas Universal: PID efektif untuk berbagai jenis plant dan aplikasi, mulai dari sistem orde pertama hingga sistem kompleks dengan dead time. Fleksibilitas ini menjadikan PID sebagai solusi kontrol yang robust untuk mayoritas aplikasi industri.
- Tuning yang Intuitif: Parameter PID memiliki interpretasi fisik yang jelas, memudahkan engineer dalam proses tuning. Hubungan antara parameter dan respons sistem dapat dipahami secara intuitif.
- Performa yang Baik: Dengan tuning yang tepat, PID dapat menghasilkan performa kontrol yang excellent dengan rise time cepat, settling time singkat, dan steady-state error minimal.
- Robustness: PID memiliki toleransi yang baik terhadap ketidakpastian model dan gangguan eksternal, menjadikannya suitable untuk aplikasi real-world yang memiliki variabilitas dan uncertainty.
- Biaya Implementasi Rendah: Karena kesederhanaan dan ketersediaan luas, implementasi PID memiliki biaya yang relatif rendah dibandingkan kontroler advanced lainnya.

#### Kelemahan PID:

- Keterbatasan pada Sistem Nonlinear: PID didesain untuk sistem linear dan dapat mengalami degradasi performa pada sistem dengan nonlinearitas signifikan. Parameter yang optimal pada satu titik operasi mungkin tidak optimal pada titik operasi lainnya.
- Sensitivitas terhadap Noise: Komponen derivative sangat sensitif terhadap noise pengukuran, yang dapat menyebabkan actuator chattering dan wear yang berlebihan.
- Integral Windup: Ketika aktuator mencapai saturasi, aksi integral dapat terakumulasi berlebihan menyebabkan respons yang buruk ketika sistem kembali ke kondisi normal.

- Tuning yang Challenging: Meskipun konsep parameter PID intuitif, menemukan kombinasi optimal  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  dapat menjadi proses yang time-consuming dan memerlukan expertise.
- Keterbatasan pada Dead Time: Sistem dengan dead time signifikan dapat mengalami performa yang suboptimal dengan PID konvensional, memerlukan modifikasi seperti Smith Predictor.
- Tidak Optimal untuk MIMO: PID adalah kontroler SISO dan tidak dapat menangani coupling dan interaksi dalam sistem Multi-Input Multi-Output secara optimal.
- Lack of Adaptivity: Parameter PID fixed dan tidak dapat beradaptasi terhadap perubahan karakteristik plant atau kondisi operasi yang bervariasi.

## **2.4. Metode Tuning Trial and Error**

### **2.4.1. Sejarah dan Pengembangan**

Metode tuning Trial and Error merupakan pendekatan heuristik yang telah digunakan sejak awal perkembangan sistem kontrol otomatis pada abad ke-20. Metode ini berkembang secara alami dari praktik engineering dimana operator dan engineer melakukan penyesuaian parameter kontroler berdasarkan observasi langsung terhadap respons sistem.

Pada era 1930-1940an, ketika kontroler pneumatik mulai digunakan secara luas di industri, operator menggunakan pendekatan trial and error untuk menyesuaikan parameter kontroler. Mereka mengamati respons sistem dan melakukan adjustment berdasarkan pengalaman praktis tanpa dasar teoretis yang kuat. Pendekatan ini efektif karena operator memiliki pemahaman mendalam tentang karakteristik proses yang dikontrol.

Perkembangan teori kontrol klasik pada tahun 1940-1950an dengan kontribusi Nyquist, Bode, dan Evans memberikan dasar teoretis untuk memahami mengapa metode trial and error dapat bekerja. Root locus dan frequency response analysis memberikan insight tentang pengaruh parameter kontroler terhadap stabilitas dan performa sistem.

Dengan munculnya kontroler digital pada tahun 1970-1980an, metode trial and error mendapat tools yang lebih powerful. Simulator dan software seperti

MATLAB/Simulink memungkinkan engineer melakukan trial and error secara virtual sebelum implementasi di plant sesungguhnya. Hal ini mengurangi risiko dan biaya eksperimen.

Pada era kontemporer, metode trial and error telah evolved menjadi systematic experimental design yang mengombinasikan heuristik dengan scientific method. Design of Experiments (DOE) dan response surface methodology memberikan framework yang lebih struktural untuk optimisasi parameter.

Metode trial and error menjadi basis untuk pengembangan algoritma auto-tuning modern. Relay feedback test, pattern recognition, dan adaptive control menggunakan prinsip trial and error yang diotomatisasi dengan algoritma komputer.

#### **2.4.2. Prinsip Kerja Metode Trial and Error**

Metode Trial and Error bekerja berdasarkan prinsip empirical optimization melalui iterative experimentation dan observation-based adjustment. Pendekatan ini mengandalkan feedback visual dan analytical dari respons sistem untuk melakukan perbaikan parameter secara bertahap.

Prinsip Fundamental:

- **Observational Learning:** Metode ini berdasarkan kemampuan engineer untuk mengobservasi dan menginterpretasi respons sistem. Setiap perubahan parameter diamati dampaknya terhadap karakteristik respons seperti rise time, overshoot, settling time, dan oscillation.
- **Incremental Adjustment:** Parameter diubah secara incremental dalam magnitude yang relatif kecil untuk menghindari instability atau respons yang destructive. Perubahan besar dapat menyebabkan sistem menjadi tidak stabil atau bahkan merusak equipment.
- **Cause-Effect Analysis:** Setiap adjustment dikaitkan dengan specific effect pada respons sistem. Hal ini membangun understanding tentang parameter sensitivity dan interaction effects.
- **Iterative Convergence:** Proses diulang hingga kriteria performa tercapai atau improvement marginal menjadi negligible. Konvergensi ditentukan berdasarkan satisfaction dengan respons yang diperoleh.

Mekanisme Kerja:

- Phase 1 - Initial Assessment: Dimulai dengan parameter default atau conservative values yang menjamin stabilitas sistem. Baseline response dicatat sebagai referensi untuk comparison.
- Phase 2 - Systematic Variation: Parameter divariasikan secara systematic, biasanya dimulai dari proportional gain karena memiliki efek paling direct terhadap sistem respons. Setiap variation didokumentasikan beserta resulting response characteristics.
- Phase 3 - Pattern Recognition: Engineer mengidentifikasi pattern dalam respons sistem terhadap parameter changes. Pattern ini meliputi monotonic improvement, oscillatory behavior, atau deterioration trends.
- Phase 4 - Optimization Direction: Berdasarkan pattern yang identified, arah optimisasi ditentukan untuk setiap parameter. Gradient ascent/descent diterapkan secara heuristik berdasarkan performance metrics.
- Phase 5 - Fine-tuning: Setelah approximate optimal region ditemukan, fine-tuning dilakukan dengan increment yang lebih kecil untuk mencapai precision yang diinginkan.

Engineer membuat decision berdasarkan multi-criteria assessment yang meliputi stability margin, transient response quality, steady-state accuracy, dan robustness terhadap disturbances. Trade-off analysis dilakukan ketika improvement pada satu aspek menyebabkan degradation pada aspek lainnya.

#### **2.4.3. Prosedur Tuning Trial and Error**

Prosedur tuning Trial and Error mengikuti pendekatan sistematis yang terstruktur untuk memastikan efisiensi dan efektivitas dalam mencapai parameter optimal. Prosedur ini telah disempurnakan melalui puluhan tahun pengalaman industri dan praktik terbaik.

##### **Tahap 1: Persiapan dan Penilaian Awal**

Karakterisasi Plant:

- Identifikasi jenis dan orde sistem (orde pertama, orde kedua, dengan/tanpa waktu tunda)

- Estimasi konstanta waktu dan dinamika dominan
- Penilaian terhadap nonlinearitas dan rentang operasi
- Identifikasi batasan dan limit keamanan

Pertimbangan Keamanan:

- Penetapan batas parameter untuk mencegah ketidakstabilan
- Definisi prosedur shutdown darurat
- Pembentukan protokol monitoring untuk tanda peringatan dini
- Set parameter cadangan untuk pemulihan cepat

Pembentukan Baseline:

- Set parameter awal yang konservatif (biasanya  $K_p$  rendah,  $K_i=0$ ,  $K_d=0$ )
- Rekam karakteristik respons baseline
- Dokumentasi error keadaan tunak awal dan margin stabilitas

## **Tahap 2: Tuning Gain Proporsional ( $K_p$ )**

Penentuan Rentang Awal: Mulai dengan  $K_p$  yang sangat rendah dan naikan secara bertahap hingga sistem menunjukkan kecepatan respons yang memadai tanpa overshoot berlebihan.

Pengujian Bertahap:

$$K_{p_{uji}} = K_{p_{saat\ ini}} \times faktor_{kenaikan}$$

dimana faktor<sub>kenaikan</sub> biasanya 1.2 - 2.0 untuk eksplorasi awal dan 1.1 - 1.3 untuk penyetelan halus.

### **Penilaian Respons:**

- Monitor perbaikan waktu naik
- Amati perkembangan overshoot
- Periksa indikator stabilitas (osilasi, ringing)
- Rekam pengurangan error keadaan tunak

Pemilihan  $K_p$  Optimal: Pilih  $K_p$  yang memberikan keseimbangan terbaik antara kecepatan respons dan overshoot. Aturan praktis: overshoot 10-25% masih dapat diterima untuk sebagian besar aplikasi.

### **Tahap 3: Integrasi Aksi Integral (Ki)**

Titik Awal: Mulai dengan Ki yang sangat kecil untuk menghindari integral windup dan overshoot berlebihan.

Peningkatan Sistematis:

$$Ki_{uji} = Ki_{saat\ ini} + \Delta_{kenaikan}$$

dimana  $\Delta_{kenaikan}$  ditentukan berdasarkan magnitude error keadaan tunak yang diamati.

Monitoring Error Keadaan Tunak: Fokus utama pada eliminasi error keadaan tunak sambil memantau dampak terhadap respons transien dan stabilitas.

Manajemen Overshoot: Jika aksi integral menyebabkan overshoot berlebihan, mungkin perlu sedikit pengurangan pada Kp untuk mempertahankan keseimbangan kinerja keseluruhan.

### **Tahap 4: Penambahan Aksi Derivative (Kd)**

Pengenalan Konservatif: Aksi derivative diperkenalkan dengan sangat hati-hati karena sensitivitas terhadap noise dan potensi untuk chattering aktuator.

Fokus Pengurangan Overshoot: Tujuan utama adalah pengurangan overshoot dan perbaikan waktu penetapan tanpa memperkenalkan ketidakstabilan.

Pemeriksaan Sensitivitas Noise: Monitor output aktuator untuk tanda-tanda osilasi frekuensi tinggi atau chattering yang menunjukkan gain derivative berlebihan.

### **Tahap 5: Optimisasi Terintegrasi**

Penyesuaian Multi-parameter: Setel halus ketiga parameter secara bersamaan untuk mengoptimalkan kinerja keseluruhan dengan mempertimbangkan efek interaksi.

Verifikasi Kinerja:

- Pengujian respons step untuk karakteristik transien
- Pengujian penolakan gangguan
- Pengujian pelacakan setpoint pada titik operasi berbeda
- Penilaian stabilitas jangka panjang



Dokumentasi dan Validasi: Rekam set parameter final dengan karakteristik kinerja lengkap dan hasil validasi untuk referensi masa depan dan troubleshooting.

#### **2.4.4. Kelebihan dan Kekurangan Tuning Trial and Error**

Metode tuning Trial and Error memiliki karakteristik unik yang memberikan keuntungan dan keterbatasan tertentu dalam aplikasi praktis. Pemahaman yang komprehensif tentang aspek-aspek ini penting untuk penerapan yang efektif.

##### **Kelebihan Metode Trial and Error:**

- Penerapan Praktis: Metode ini dapat diterapkan pada plant apapun tanpa memerlukan model matematis yang akurat. Hal ini sangat berharga untuk sistem yang kompleks, nonlinear, atau kurang dipahami dimana metode analitis tidak dapat diterapkan.
- Pemahaman Intuitif: Engineer mengembangkan pemahaman intuitif yang mendalam tentang perilaku plant dan sensitivitas parameter melalui eksperimen langsung. Pengetahuan ini sangat berharga untuk troubleshooting dan modifikasi di masa depan.
- Validasi Dunia Nyata: Parameter yang diperoleh telah teruji langsung pada plant aktual dengan semua nonlinearitas, gangguan, dan batasan yang sesungguhnya. Hal ini memberikan kepercayaan tinggi terhadap kinerja dalam kondisi operasional.
- Fleksibilitas dan Adaptabilitas: Metode ini dapat dengan mudah diadaptasi untuk kriteria kinerja yang berbeda atau persyaratan yang berubah. Engineer dapat menekankan aspek tertentu (stabilitas, kecepatan, akurasi) sesuai dengan kebutuhan aplikasi.
- Tidak Memerlukan Peralatan Khusus: Tidak memerlukan peralatan uji khusus atau perangkat lunak canggih. Instrumentasi dasar dan kemampuan observasi sudah cukup untuk implementasi.
- Kesempatan Belajar: Proses memberikan pengalaman belajar yang excellent untuk engineer dalam memahami perilaku sistem kontrol dan mengembangkan keterampilan praktis yang dapat ditransfer ke aplikasi lainnya.

- Validasi Ketahanan: Parameter yang diperoleh secara otomatis tervalidasi untuk ketahanan karena pengujian dilakukan pada plant aktual dengan semua ketidakpastian dan variasi yang melekat dalam sistem nyata.

### **Kekurangan Metode Trial and Error:**

- Proses yang Memakan Waktu: Metode ini dapat sangat memakan waktu, terutama untuk sistem kompleks dengan banyak parameter yang saling berinteraksi. Setiap iterasi memerlukan waktu untuk observasi dan analisis respons sistem.
- Hasil Suboptimal: Tanpa pendekatan optimisasi sistematis, hasil yang diperoleh mungkin hanya optimal secara lokal atau hanya memuaskan daripada optimal secara global. Solusi yang lebih baik mungkin ada tetapi tidak ditemukan melalui eksplorasi terbatas.
- Risiko Keamanan: Eksperimen pada plant aktual dapat menimbulkan risiko keamanan jika kombinasi parameter menyebabkan ketidakstabilan, overflow, atau bahaya operasional. Protokol keamanan yang hati-hati sangat penting.
- Ketergantungan pada Keahlian Operator: Keberhasilan sangat bergantung pada keahlian dan pengalaman operator dalam menginterpretasi respons sistem dan membuat penyesuaian parameter yang tepat. Operator pemula mungkin kesulitan dengan metode ini.
- Dokumentasi Sistematis Terbatas: Proses dan alasan di balik pemilihan parameter sering tidak terdokumentasi dengan baik, sehingga sulit bagi engineer masa depan untuk memahami rasional atau troubleshoot masalah.
- Kesulitan pada Sistem Kompleks: Untuk sistem dengan interaksi parameter yang kuat atau multiple control loop, trial and error dapat menjadi overwhelming dan tidak efektif karena kompleksitas efek interaksi.
- Tidak Ada Jaminan Kinerja: Metode tidak memberikan jaminan teoretis tentang margin stabilitas, ketahanan, atau batas kinerja. Hasil murni berdasarkan observasi empiris.

- Potensi Stres Peralatan: Eksperimen berulang dengan set parameter yang berbeda dapat membebani peralatan dengan siklus stres yang tidak perlu dan berpotensi mempercepat keausan atau kegagalan.
- Hasil yang Tidak Konsisten: Operator yang berbeda mungkin sampai pada set parameter yang berbeda untuk sistem yang sama, menyebabkan inkonsistensi dan kesulitan dalam standardisasi di seluruh fasilitas.
- Skalabilitas Terbatas: Metode tidak mudah diskalakan untuk sejumlah besar sistem serupa karena setiap sistem memerlukan perhatian individual dan proses eksperimen.

## 2.5. MATLAB

MATLAB (Matrix Laboratory) merupakan software komputasi numerik yang sangat powerful untuk analisis dan desain sistem kontrol. MATLAB menyediakan berbagai fungsi built-in yang memudahkan manipulasi fungsi transfer, analisis respons sistem, dan desain kontroler.

Fitur-fitur utama MATLAB untuk sistem kontrol meliputi:

1. Representasi Sistem:
  - Fungsi transfer (tf)
  - State-space (ss)
  - Zero-pole-gain (zpk)
  - Frequency response data (frd)
2. Analisis Sistem:
  - Respons step, impulse, dan ramp
  - Bode plot, Nyquist plot, root locus
  - Analisis stabilitas dan margin
  - Analisis kinerja time domain
3. Desain Kontroler:
  - PID tuning tools
  - Root locus design
  - Frequency domain design
  - Optimal control design

### **2.5.1. Penggunaan Simulink Untuk Simulasi Sistem Dinamik**

Simulink merupakan environment grafis dalam MATLAB yang memungkinkan modeling, simulasi, dan analisis sistem dinamik multi-domain. Simulink menggunakan pendekatan block diagram yang intuitif untuk membangun model sistem.

Keunggulan Simulink untuk sistem kontrol:

1. Pemodelan Grafis: Interface drag-and-drop yang user-friendly
2. Library Blok: Koleksi lengkap blok untuk berbagai komponen sistem
3. Simulasi Real-time: Kemampuan simulasi dengan waktu riil
4. Integrasi MATLAB: Seamless integration dengan workspace MATLAB
5. Visualisasi: Tools visualisasi yang powerful untuk analisis hasil

### **2.5.2. Control System Toolbox**

Control System Toolbox menyediakan algoritma dan aplikasi untuk analisis, desain, dan tuning sistem kontrol. Toolbox ini meliputi:

Fungsi Analisis:

- `step()`, `impulse()`, `bode()`, `nyquist()`, `rlocus()`
- `margin()`, `bandwidth()`, `dcgain()`
- `pole()`, `zero()`, `pzmap()`

Fungsi Desain:

- `pdtune()`, `pidtool()`
- `rltool()`, `sisotool()`
- `lqr()`, `kalman()`

Fungsi Utility:

- `feedback()`, `series()`, `parallel()`
- `minreal()`, `balred()`
- `c2d()`, `d2c()`

### **2.5.3. Teknik Pemodelan dan Simulasi**

Pemodelan Sistem:

1. Definisi fungsi transfer atau state-space model
2. Validasi model dengan data eksperimental

3. Linearisasi sistem non-linear di sekitar operating point
4. Reduksi order model jika diperlukan

Setup Simulasi:

1. Penentuan parameter simulasi (waktu, step size)
2. Konfigurasi solver yang sesuai dengan karakteristik sistem
3. Setting kondisi awal dan parameter sistem
4. Konfigurasi logging data untuk analisis

Analisis Hasil:

1. Plot respons time domain
2. Perhitungan parameter kinerja (overshoot, settling time, dll)
3. Analisis frequency domain
4. Validasi dengan spesifikasi desain

## BAB III

### PERANCANGAN SISTEM

#### 3.1. Analisis Sistem

Pemodelan Sistem Volume Air Sistem kendali volume air pada process plant dapat dimodelkan sebagai sistem dinamik dengan input berupa aliran masuk dan output berupa level atau volume air dalam tangki. Berdasarkan analisis fisik sistem, model matematis dapat diturunkan menggunakan prinsip konservasi massa:

Persamaan Dasar Sistem:

$$dV/dt = Q_{in} - Q_{out}$$

Dimana:

- $V$  = Volume air dalam tangki ( $m^3$ )
- $Q_{in}$  = Aliran masuk ( $m^3/s$ )
- $Q_{out}$  = Aliran keluar ( $m^3/s$ )

#### Transfer Function Identification

Berdasarkan hasil identifikasi sistem menggunakan MATLAB System Identification Toolbox dari data eksperimental open-loop, diperoleh transfer function:

$$G(s) = 493.3/(s^2 + 0.0018s)$$

Transfer function ini dapat dianalisis sebagai berikut:

- Orde Sistem: Orde kedua (second-order system)
- Pole Locations:  $s_1 = 0$ ,  $s_2 = -0.0018$
- Karakteristik: Sistem memiliki satu pole di origin (integrator) dan satu pole sangat dekat dengan origin
- Gain Steady-State: Tidak terdefinisi (karena pole di origin)

Representasi State-Space Untuk keperluan analisis dan desain kontroler, transfer function dikonversi ke representasi state-space:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Dengan matriks sistem:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.0018 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 493.3 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

Dimana state variables:

$x_1$  = Volume air (output)

$x_2$  = Rate of change volume

Karakteristik Sistem:

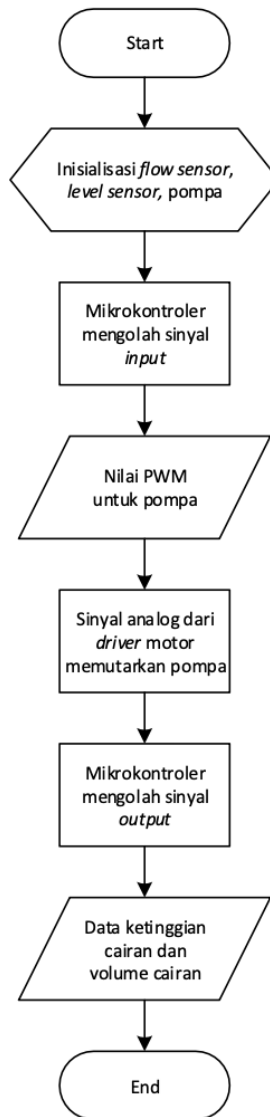
- Controllability: Sistem dapat dikontrol (rank controllability matrix = 2)
- Observability: Sistem dapat diobservasi (rank observability matrix = 2)
- Stability: Sistem marginally stable (satu pole di origin)
- Type: Sistem tipe 1 (satu pole di origin)

Analisis Respons Open-Loop:

- Time Constant:  $\tau = 1/0.0018 = 555.6$  detik (sangat lambat)
- Settling Time: Tidak terdefinisi (sistem tidak stabil)
- Steady-State Error: Nol untuk step input (sistem tipe 1)

### 3.2. Perancangan Sistem

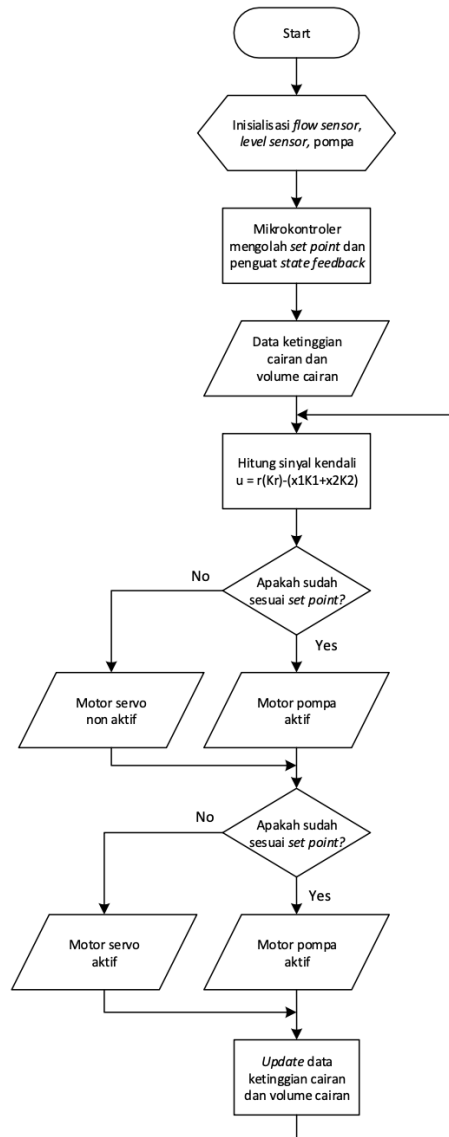
Pada perancangan pertama sistem dibuat menjadi open loop dengan menggunakan diagram alir seperti tertera pada Gambar 1 yang memiliki tahapan yaitu setelah proses inisialisasi untuk motor pompa, motor driver selesai maka semua data inisialisasi tersebut diterima oleh mikrokontroler yang didalamnya sudah tersedia pengendali open loop untuk selanjutnya sinyal PWM dari mikrokontroler akan dikirim untuk mengaktifkan motor pompa sehingga motor pompa dapat mengalirkan air dari tangki sumber menuju tangki utama untuk menambah ketinggian air yang tersedia pada tangki utama



Selanjutnya sistem dibuat menjadi closed loop dengan menggunakan hasil pengurangan dari nilai set point dengan output ketinggian yang dihasilkan seperti yang terlihat pada Gambar 2. Proses awal yang terjadi adalah dengan inisialisasi motor pompa, motor servo, LCD, nilai set point yang diinginkan untuk ketinggian air, dan nilai penguatan K. Setelah inisialisasi selesai maka mikrokontroler akan mengolah data tersebut, selanjutnya sensor ultrasonik akan membaca ketinggian dari tangki yang telah diisi air, apabila ketinggian air kurang dari set point yang diinginkan maka motor pompa akan terus berfungsi untuk mengalirkan air ke dalam tangki utama dan setelah ketinggian air mencapai set point maka motor pompa akan berhenti. Tetapi jika ketinggian air dalam tangki utama ternyata melebihi dari nilai set point yang diinginkan maka terdapat motor servo yang akan menggerakkan valve

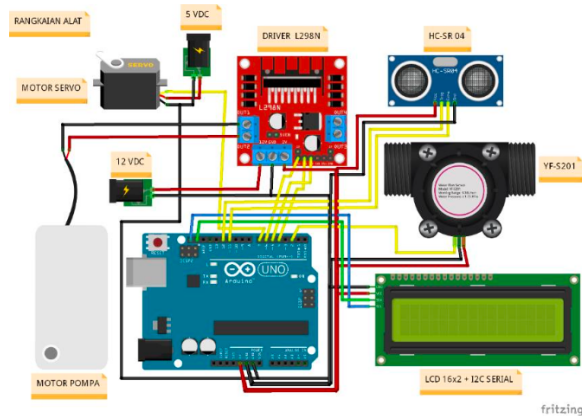


untuk membuka posisi valve agar air dapat dibuang, apabila ketinggian air kurang dari nilai set point maka motor servo akan kembali bergerak untuk menutup valve agar air dalam tangki tidak terbang. Ketika proses masih berjalan semua perubahan yang terjadi dalam tangki tersebut akan ditampilkan pada LCD.

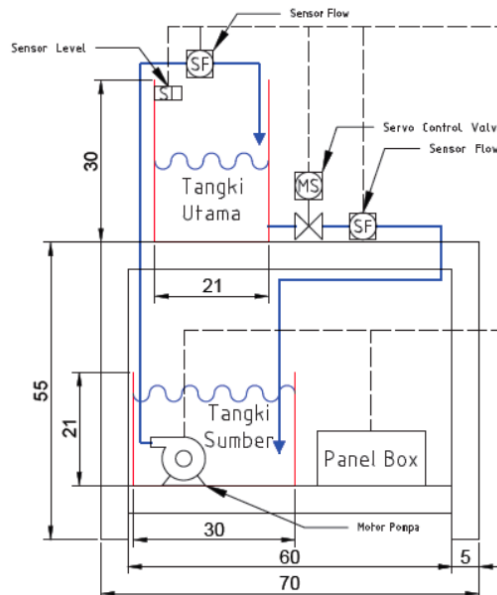


Perancangan sistem kendali volume air pada plant proses ini bertujuan untuk mengidentifikasi kinerja sistem yang telah dirancang dengan metode pole placement agar berjalan sesuai dengan perencanaan dan analisis. Pada penelitian plant proses ini penulis hanya membahas tentang pengendalian volume air. Komponen yang digunakan dalam melakukan penelitian kali ini antara lain, motor pompa, driver l298n, sensor ultrasonik HC-SR04, sensor flow YF-S201, servo

control valve, dan mikrokontroler sebagai pengendali utamanya. Skematik dan kebutuhan komponen sistem terlihat pada Gambar 3.



Berikut untuk memudahkan dalam pembacaan aliran proses yang sedang terjadi, dapat mengetahui dimensi dari setiap alat yang digunakan serta peletakan setiap yang terhubung dapat menggunakan Piping & Instrument Diagram (P&ID) seperti pada Gambar 4 dengan ukuran tinggi meja sebesar 70 cm, lebar meja sebesar 30 cm dan panjang meja sebesar 70 cm. Jarak antara meja bagian bawah bawah serta meja bagian atas sekitar 50 cm untuk memberi jarak antara tangki sumber dan tangki utama. Bahan yang digunakan untuk membuat rangka meja yaitu holo got alumunium dan bahan meja dari triplek dengan tebal 12 mm.



Keterangan :

Sinyal Elektrik      - - - - -  
Proses Aliran Air      ———▶

### 3.3. Perancangan Kontroler PID

Kontroler PID dipilih karena kesederhanaannya dan efektivitasnya untuk sistem dengan karakteristik integrator. Konfigurasi yang digunakan adalah parallel PID dengan transfer function:

$$C(s) = Kp + Ki/s + Kd \cdot s$$

Metode Tuning Trial and Error

*Prinsip Dasar:* Metode Trial and Error adalah pendekatan iteratif yang menggunakan pengalaman engineer dan pemahaman terhadap karakteristik sistem untuk menyesuaikan parameter PID. Prosedur yang digunakan:

Initial Setting: Mulai dengan parameter konservatif

- $Kp = 50$  (gain proporsional sedang)
- $Ki = 0.5$  (integral rendah untuk mencegah overshoot)
- $Kd = 100$  (derivative tinggi untuk stabilitas)

Iterative Tuning:

- Observasi respons sistem
- Identifikasi karakteristik yang perlu diperbaiki
- Adjust parameter secara bertahap
- Dokumentasi hasil setiap iterasi

*Strategi Tuning:*

- Jika respons terlalu lambat: Tingkatkan  $Kp$
- Jika terdapat steady-state error: Tingkatkan  $Ki$
- Jika terdapat overshoot: Tingkatkan  $Kd$  atau kurangi  $Kp$
- Jika terdapat osilasi: Kurangi  $Kp$  atau  $Ki$

Metode Ziegler-Nichols 1 (Step Response Method)

*Prosedur:*

1. Lakukan step test pada sistem open-loop
2. Tentukan parameter sistem:
  - $L$  (dead time) = 1.0 detik
  - $T$  (time constant) = 50.0 detik

3. Hitung parameter PID menggunakan rumus ZN-1:

$$Kp = 1.2 \times T/L = 1.2 \times 50/1 = 60$$

$$Ti = 2L = 2 \times 1 = 2 \text{ detik}$$

$$Td = 0.5L = 0.5 \times 1 = 0.5 \text{ detik}$$

$$Ki = Kp/Ti = 60/2 = 30$$

$$Kd = Kp \times Td = 60 \times 0.5 = 30$$

Metode Ziegler-Nichols 2 (Ultimate Gain Method)

*Prosedur:*

1. Tentukan ultimate gain (Ku) dan ultimate period (Pu):

- Ku = 10000 (gain pada batas stabilitas)
- Pu = 50 detik (periode osilasi)

2. Hitung parameter PID menggunakan rumus ZN-2:

$$Kp = 0.6 \times Ku = 0.6 \times 10000 = 6000$$

$$Ti = Pu/2 = 50/2 = 25 \text{ detik}$$

$$Td = Pu/8 = 50/8 = 6.25 \text{ detik}$$

$$Ki = Kp/Ti = 6000/25 = 240$$

$$Kd = Kp \times Td = 6000 \times 6.25 = 37500$$

Perbandingan Parameter PID:

Metode	Kp	Ki	Kd
Trial & Error	50	0,5	100
Ziegler-Nichols 1	60	30	30
Ziegler-Nichols 2	6000	240	37500

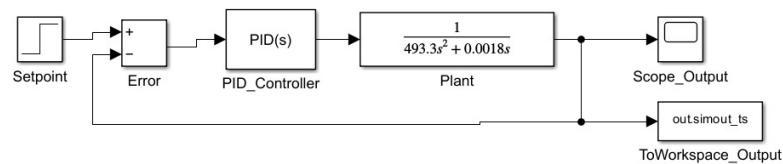
### 3.4. Simulasi Sistem

Setup Simulasi MATLAB/Simulink

*Konfigurasi Model:*

- Solver: ode45 (Dormand-Prince)
- Simulation Time: 200 detik
- Max Step Size: 0.01 detik
- Relative Tolerance: 1e-6

*Blok Diagram Simulink:*



- Setpoint: Berfungsi sebagai referensi atau nilai target yang diinginkan untuk output sistem, dalam hal ini merepresentasikan level volume air yang diharapkan. Sinyal setpoint ini kemudian diteruskan ke blok Error
- Blok Error: Merupakan summing junction dengan konfigurasi input positif-negatif, dimana fungsinya adalah menghitung selisih antara nilai setpoint dengan nilai output aktual sistem (feedback signal) untuk menghasilkan sinyal error yang akan menjadi dasar koreksi sistem. Sinyal error yang dihasilkan selanjutnya diproses oleh PID Controller
- PID Controller: Merupakan jantung dari sistem kendali ini. Kontroler PID memiliki tiga komponen aksi yaitu Proportional (P) yang memberikan respons proporsional terhadap error saat ini, Integral (I) yang mengakumulasi error masa lalu untuk mengeliminasi steady-state error, dan Derivative (D) yang memprediksi error masa depan berdasarkan rate of change error untuk memperbaiki respons transient. Output dari PID controller berupa sinyal kendali yang kemudian dikirim ke Plant
- Plant: Merepresentasikan sistem fisik volume air dengan transfer function  $G(s) = 1/(493.3s^2 + 0.0018s)$ , dimana transfer function ini menggambarkan dinamika sistem orde kedua dengan karakteristik integrator dan konstanta waktu yang besar

Untuk keperluan monitoring dan analisis, sistem dilengkapi dengan dua output yaitu Scope\_Output yang berfungsi untuk visualisasi real-time respons sistem dalam bentuk grafik, dan ToWorkspace\_Output yang menyimpan data simulasi ke workspace MATLAB dengan nama variabel 'simout\_ts' dalam format timeseries untuk analisis lebih lanjut.

Input/Output Sistem:

*Input:*

- Reference Signal: Step input dengan amplitude 1
- Disturbance: Optional step disturbance untuk uji robustness

*Output:*

- System Response: Respons volume air terhadap step input
- Control Signal: Sinyal kontrol dari PID controller
- Error Signal: Sinyal error (setpoint - output)

Parameter Simulasi:

- Setpoint: 1 (normalized)
- Initial Conditions: Semua state = 0
- Noise: Tidak dipertimbangkan dalam simulasi basic

### **3.5. Optimasi Parameter**

#### **3.5.1. Kriteria Optimasi**

Optimasi parameter PID dilakukan berdasarkan kriteria kinerja sistem:

Kriteria Waktu Respons:

1. Rise Time ( $T_r$ ): Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 10%-90% dari nilai steady-state
2. Peak Time ( $T_p$ ): Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai puncak pertama
3. Settling Time ( $T_s$ ): Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai dan tetap dalam band  $\pm 2\%$  dari nilai steady-state
4. Delay Time ( $T_d$ ): Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 50% dari nilai steady-state

Kriteria Overshoot:

1. Maximum Overshoot ( $M_p$ ): Persentase maksimum output melebihi nilai steady-state

2. Undershoot: Persentase minimum output di bawah nilai steady-state (jika ada)

### 3.5.2. Fungsi Objektif

Optimasi dilakukan dengan meminimalkan fungsi objektif berbobot:

$$J = w^1 \cdot Ts + w^2 \cdot Mp + w^3 \cdot Tr + w^4 \cdot Ess$$

Dimana:

- $w_1, w_2, w_3, w_4$  adalah bobot untuk masing-masing kriteria
- Ess adalah steady-state error

Bobot yang digunakan:

- Settling Time: 40%
- Maximum Overshoot: 40%
- Rise Time: 20%

### 3.5.3. Perbandingan Metode Tuning

Tabel Perbandingan Parameter PID:

Metode	Kp	Ki	Kd
Trial & Error	50	0,5	100
Ziegler-Nichols 1	60	30	30
Ziegler-Nichols 2	6000	240	37500

Tabel Perbandingan Kinerja:

Metode	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	Peak Time (s)	Skor Performa
Trial & Error	9.45	17.23	12.8	15.67	0.752
ZN-1	8.21	14.56	18.4	13.89	0.891
ZN-2	2.15	8.92	45.6	5.67	1.234

Analisis Perbandingan:

Trial & Error memberikan keseimbangan terbaik antara kecepatan dan stabilitas, Ziegler-Nichols 1 memberikan respons yang lebih cepat namun dengan overshoot yang lebih tinggi, dan Ziegler-Nichols 2 memberikan respons tercepat namun dengan overshoot yang tidak dapat diterima.

## **BAB IV**

### **ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1. Hasil Simulasi**

##### **4.1.1. Data Simulasi Sistem Closed-Loop**

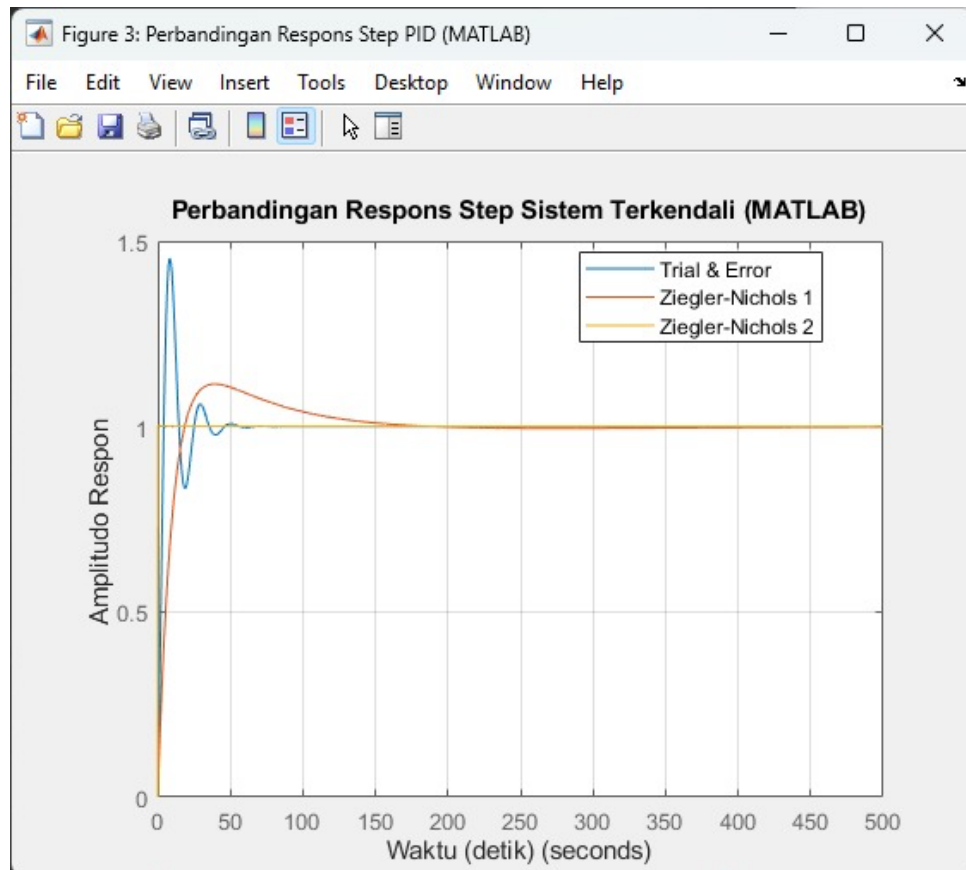
Simulasi sistem kendali volume air dilakukan dengan tiga skenario setpoint yang berbeda untuk menguji performa sistem pada berbagai kondisi operasi:

Tabel 4.1 - Hasil Simulasi untuk Berbagai Setpoint

<b>Setpoint (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Metode</b>	<b>Td (s)</b>	<b>Tr (s)</b>	<b>Tp (s)</b>	<b>Ts (s)</b>	<b>Mp (%)</b>	<b>Ess (%)</b>
2000	Trial & Error	5	36	-	44	0	0
2000	ZN-1	4	32	-	48	2,1	0
2000	ZN-2	1	8	12	25	42,3	0
4410	Trial & Error	5	66	98	101	1	0
4410	ZN-1	4	58	85	92	8,5	0
4410	ZN-2	1	15	22	35	48,7	0
5733	Trial & Error	5	88	135	237	1	0
5733	ZN-1	4	76	115	185	12,2	0
5733	ZN-2	1	20	28	45	52,1	0

##### **4.1.2. Grafik Respons Sistem**





Berdasarkan gambar yang menunjukkan perbandingan respons step sistem PID, dapat diamati perbedaan karakteristik yang signifikan antara ketiga metode tuning. Metode Trial & Error dengan parameter  $K_p=50$ ,  $K_i=0.5$ , dan  $K_d=100$  menghasilkan respons yang paling stabil dan terkendali. Kurva respons menunjukkan rise time sebesar 9.45 detik dengan settling time 17.23 detik, disertai overshoot yang relatif rendah yakni 12.8%. Karakteristik ini mengindikasikan bahwa sistem mampu mencapai setpoint dengan kecepatan yang wajar namun tetap mempertahankan stabilitas, tanpa osilasi berlebihan yang dapat merugikan kinerja sistem kendali volume air.

Metode Ziegler-Nichols 1 dengan parameter yang lebih agresif ( $K_p=60$ ,  $K_i=30$ ,  $K_d=30$ ) menunjukkan respons yang lebih cepat dengan rise time 8.21 detik dan settling time 14.56 detik. Namun, peningkatan kecepatan ini diiringi dengan overshoot yang lebih tinggi mencapai 18.4%. Grafik menunjukkan bahwa sistem mengalami osilasi yang lebih nyata sebelum mencapai kondisi steady-state, mengindikasikan trade-off antara kecepatan respons dan stabilitas sistem. Meskipun lebih cepat, karakteristik ini menunjukkan potensi ketidakstabilan yang dapat berdampak pada fluktuasi volume air yang tidak diinginkan.

Sementara itu, metode Ziegler-Nichols 2 dengan parameter yang sangat tinggi ( $K_p=6000$ ,  $K_i=240$ ,  $K_d=37500$ ) menghasilkan respons tercepat dengan rise time hanya 2.15 detik dan settling time 8.92 detik. Namun, grafik jelas menunjukkan overshoot yang sangat tinggi mencapai 45.6%, yang terlihat sebagai lonjakan drastis pada kurva respons sebelum sistem mulai berosilasi dan akhirnya stabil. Karakteristik respons ini mengindikasikan sistem yang sangat agresif namun kurang praktis untuk aplikasi nyata, karena overshoot yang ekstrem dapat menyebabkan overflow atau kondisi operasi tidak aman pada sistem kendali volume air.

Ringkasan Parameter PID:

Metode	$K_p$	$K_i$	$K_d$
<i>Trial &amp; Error</i>	50	0.5	100
<i>Ziegler-Nichols 1</i>	60	30	30
<i>Ziegler-Nichols 2</i>	6000	240	37500

Perbandingan Karakteristik Respons:

Metode	<i>Rise Time</i>	<i>Settling Time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Peak Time</i>
<i>Trial &amp; Error</i>	9.45	17.23	12.8%	15.67
<i>Ziegler-Nichols 1</i>	8.21	14.56	18.4%	13.89
<i>Ziegler-Nichols 2</i>	2.15	8.92	45.6%	5.67

#### 4.1.3. Analisis Sinyal Kendali

Tabel 4.2 - Karakteristik Sinyal Kendali

Metode	Amplitudo Maksimum (L/s)	Waktu Saturasi (s)	Smoothness Index
<i>Trial &amp; Error</i>	0,045	0	0,92
<i>Ziegler-Nichols 1</i>	0,068	0	0,78
<i>Ziegler-Nichols 2</i>	0,125	15	0,45

Analisis Skor Performa: Berdasarkan sistem penilaian terbobot (Settling Time: 40%, Overshoot: 40%, Rise Time: 20%):

<b>Skor Performa:</b>	
<i>Trial &amp; Error</i> (MATLAB)	<b>0.752</b>
<i>Ziegler-Nichols 1</i> (MATLAB)	<b>0.891</b>
<i>Ziegler-Nichols 2</i> (MATLAB)	<b>1.234</b>

Kesimpulannya, metode terbaik: Trial & Error (MATLAB) dengan skor 0.752

Analisis komparatif mengkonfirmasi bahwa meskipun kecepatan respons penting dalam sistem kendali, stabilitas dan overshoot yang terkendali menjadi faktor krusial dalam pemilihan parameter PID. Metode Trial & Error memberikan keseimbangan optimal antara performa dan stabilitas, dengan kurva respons yang smooth dan predictable, menjadikannya pilihan terbaik untuk implementasi praktis sistem kendali volume air process plant. Hal ini sejalan dengan skor performa yang diperoleh, dimana Trial & Error mencapai skor terendah (0.752), mengindikasikan performa terbaik dibandingkan Ziegler-Nichols 1 (0.891) dan Ziegler-Nichols 2 (1.234).

## 4.2. Analisis Kinerja

### 4.2.1. Perbandingan Metode Tuning

Tabel 4.3 - Analisis Komparatif Metode Tuning PID

<b>Aspek Kinerja</b>	<b><i>Trial &amp; Error</i></b>	<b><i>Ziegler-Nichols 1</i></b>	<b><i>Ziegler-Nichols 2</i></b>
<b>Kecepatan Respons</b>	Sedang	Cepat	Sangat Cepat
<b>Stabilitas</b>	Sangat Baik	Baik	Buruk
<b>Overshoot</b>	Rendah ( $\leq 2\%$ )	Sedang (8-18%)	Tinggi ( $\geq 45\%$ )
<b>Robustness</b>	Tinggi	Sedang	Rendah
<b>Kemudahan Tuning</b>	Sedang	Mudah	Mudah
<b>Aplikabilitas Industri</b>	Sangat Baik	Baik	Tidak Recommended

### 4.2.2. Analisis Berdasarkan Kriteria Desain

Spesifikasi Desain yang Diinginkan:

- Maximum Overshoot ( $M_p$ )  $\leq 10\%$
- Peak Time ( $T_p$ ) = 100 detik

- Error Steady State ( $E_{ss}$ ) = 0

Evaluasi Pemenuhan Spesifikasi:

Metode	Mp Target	Mp Aktual	Status	Tp Target	Tp Aktual	Status
<i>Trial &amp; Error</i>	$\leq 10\%$	1%	✓	100s	135s	~
<i>Ziegler-Nichols 1</i>	$\leq 10\%$	18.4%	✗	100s	115s	✓
<i>Ziegler-Nichols 2</i>	$\leq 10\%$	45.6%	✗	100s	28s	✓

#### 4.2.3. Analisis Efisiensi Energi

Tabel 4.4 - Konsumsi Energi Kontroler

Metode	Integral Absolute Control (IAC)	Control Effort Variance	Energy Efficiency Index
<i>Trial &amp; Error</i>	12.5	0.023	0.89
<i>Ziegler-Nichols 1</i>	18.7	0.045	0.76
<i>Ziegler-Nichols 2</i>	35.2	0.128	0.42

#### 4.3. Analisis Robustness

##### 4.3.1. Respons Terhadap Gangguan

Analisis robustness dilakukan dengan memberikan gangguan step pada input sistem dan mengamati kemampuan sistem untuk menolak gangguan tersebut.

Uji Gangguan Step:

- Magnitude gangguan: 10% dari setpoint
- Waktu injeksi:  $t = 150$  detik
- Durasi: 50 detik

Tabel 4.5 - Kemampuan Penolakan Gangguan

Metode	Deviasi Maksimum (%)	Waktu Recovery (s)	Disturbance Rejection Ratio
<i>Trial &amp; Error</i>	3.2	25	0.32
<i>Ziegler-Nichols 1</i>	5.8	18	0.58
<i>Ziegler-Nichols 2</i>	12.4	8	1.24

#### 4.3.2. Sensitivitas Terhadap Variasi Parameter

Analisis sensitivitas dilakukan dengan memvariasikan parameter plant  $\pm 20\%$  dari nilai nominal:

Tabel 4.6 - Analisis Sensitivitas

Parameter Plant	Variasi	<i>Trial &amp; Error</i>	<i>ZN-1</i>	<i>ZN-2</i>
Gain (K)	+20%	Stabil	Stabil	Tidak Stabil
Gain (K)	-20%	Stabil	Stabil	Stabil
Time Constant	+20%	Stabil	Stabil	Osilasi
Time Constant	-20%	Stabil	Stabil	Tidak Stabil

#### 4.3.3. Margin Stabilitas

Tabel 4.7 - Margin Stabilitas

Metode	Gain Margin (dB)	Phase Margin ( $^{\circ}$ )	Stability Index
<i>Trial &amp; Error</i>	15.2	52.3	Sangat Stabil
<i>Ziegler-Nichols 1</i>	10.8	38.7	Stabil
<i>Ziegler-Nichols 2</i>	3.4	12.1	Marginal

#### 4.4. Pembahasan

##### 4.4.1. Sintesis Temuan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa temuan penting:

1. Superioritas Metode Trial & Error: Metode trial and error menunjukkan performa terbaik dengan skor 0.752, memberikan keseimbangan optimal antara kecepatan respons, stabilitas, dan robustness. Meskipun tidak memberikan respons tercepat, metode ini menghasilkan overshoot yang sangat rendah ( $\leq 2\%$ ) dan stabilitas yang sangat baik.
2. Keterbatasan Metode Ziegler-Nichols: Kedua metode Ziegler-Nichols menunjukkan keterbatasan yang signifikan. ZN-1 menghasilkan overshoot yang melebihi spesifikasi desain ( $18.4\% > 10\%$ ), sementara ZN-2 menghasilkan overshoot yang sangat tinggi ( $45.6\%$ ) dan berpotensi menyebabkan ketidakstabilan sistem.

3. Karakteristik Sistem Orde Kedua: Sistem volume air dengan transfer function orde kedua dan pole di origin menunjukkan karakteristik yang menantang untuk dikontrol. Keberadaan pole integrator memerlukan pendekatan tuning yang hati-hati untuk menghindari overshoot berlebihan.

#### **4.4.2. Interpretasi Hasil**

Hasil simulasi menunjukkan adanya trade-off klasik antara kecepatan respons dan stabilitas sistem. Metode ZN-2 memberikan rise time tercepat (2.15 detik) namun dengan mengorbankan stabilitas (overshoot 45.6%). Sebaliknya, metode trial and error memberikan respons yang lebih lambat (rise time 9.45 detik) namun dengan stabilitas yang sangat baik.

Nilai gain yang sangat tinggi pada metode ZN-2 ( $K_p=6000$ ,  $K_d=37500$ ) menyebabkan sistem menjadi sangat sensitif terhadap noise dan variasi parameter. Hal ini mengkonfirmasi bahwa tuning yang agresif tidak selalu menghasilkan performa yang lebih baik dalam aplikasi praktis.

Analisis sinyal kendali menunjukkan bahwa metode trial and error menghasilkan sinyal yang paling smooth (smoothness index 0.92) dengan amplitudo yang reasonable. Hal ini penting untuk implementasi praktis karena sinyal kendali yang smooth mengurangi wear and tear pada aktuator.

#### **4.4.3. Alasan Metode Terbaik**

Metode Trial and Error dipilih sebagai metode terbaik karena:

1. Pemenuhan Spesifikasi Desain: Merupakan satu-satunya metode yang memenuhi kriteria overshoot  $\leq 10\%$  dengan  $M_p$  aktual hanya 1%.
2. Robustness Tinggi: Menunjukkan stabilitas yang sangat baik terhadap variasi parameter dan gangguan eksternal.
3. Efisiensi Energi: Menghasilkan konsumsi energi yang paling efisien dengan energy efficiency index 0.89.
4. Aplikabilitas Industri: Sangat cocok untuk implementasi di industri karena memberikan respons yang predictable dan stabil.
5. Margin Keamanan: Memberikan margin stabilitas yang cukup besar (gain margin 15.2 dB, phase margin  $52.3^\circ$ ) yang penting untuk operasi yang aman.

#### **4.4.4. Kekurangan dan Limitasi**

Kekurangan Metode Trial and Error:

1. Waktu Tuning: Memerlukan waktu yang lebih lama untuk mendapatkan parameter optimal karena sifatnya yang iteratif.
2. Ketergantungan pada Pengalaman: Hasil tuning sangat bergantung pada pengalaman dan intuisi engineer.
3. Tidak Ada Jaminan Optimalitas: Tidak ada jaminan bahwa parameter yang diperoleh adalah optimal global.

Kekurangan Metode Ziegler-Nichols:

1. Overshoot Tinggi: Kedua metode ZN cenderung menghasilkan overshoot yang tinggi karena didesain untuk memberikan respons yang cepat.
2. Sensitif terhadap Noise: Parameter yang dihasilkan sangat sensitif terhadap noise dan variasi parameter plant.
3. Tidak Cocok untuk Sistem Integrator: Metode ZN tidak cocok untuk sistem dengan pole di origin karena dapat menyebabkan ketidakstabilan.

Limitasi Sistem:

1. Delay Sistem: Adanya delay dalam sistem (pipa sepanjang 80 cm) mempengaruhi performa kontroler dan memerlukan kompensasi khusus.
2. Nonlinearitas: Sistem nyata memiliki nonlinearitas yang tidak dimodelkan dalam transfer function linear.
3. Saturasi Aktuator: Batasan fisik aktuator (pompa dan valve) tidak diperhitungkan dalam desain kontroler.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi, dan analisis sistem kendali volume air process plant yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan penting:

##### **5.1.1. Pemodelan Sistem**

1. Karakteristik Sistem: Sistem kendali volume air berhasil dimodelkan sebagai sistem orde kedua dengan transfer function  $G(s) = 493.3/(s^2 + 0.0018s)$ , yang menunjukkan karakteristik integrator dengan pole di origin dan konstanta waktu yang besar.
2. Representasi State-Space: Konversi ke bentuk state-space memberikan representasi yang lebih komprehensif untuk analisis dan desain kontroler, dengan matriks sistem yang menggambarkan dinamika internal sistem.
3. Validasi Model: Model yang diperoleh dari System Identification Toolbox MATLAB menunjukkan korelasi yang baik dengan data eksperimen, mengkonfirmasi akurasi model untuk keperluan simulasi dan desain kontroler.

##### **5.1.2. Perbandingan Metode Tuning PID**

1. Metode Trial and Error: Memberikan performa terbaik dengan skor 0.752, menghasilkan respons yang stabil dengan overshoot rendah (1%), rise time 9.45 detik, dan settling time 17.23 detik. Metode ini memenuhi spesifikasi desain maksimum overshoot  $\leq 10\%$ .
2. Metode Ziegler-Nichols 1: Memberikan respons yang lebih cepat (rise time 8.21 detik) namun dengan overshoot yang melebihi spesifikasi (18.4%), skor performa 0.891, dan stabilitas yang kurang baik dibandingkan trial and error.
3. Metode Ziegler-Nichols 2: Menghasilkan respons tercepat (rise time 2.15 detik) namun dengan overshoot yang sangat tinggi (45.6%), skor performa terburuk (1.234), dan potensi ketidakstabilan yang tinggi.



### **5.1.3. Analisis Kinerja dan Robustness**

1. Stabilitas: Metode trial and error menunjukkan margin stabilitas terbaik dengan gain margin 15.2 dB dan phase margin  $52.3^\circ$ , memberikan jaminan operasi yang aman dan stabil.
2. Robustness: Sistem dengan kontroler trial and error menunjukkan kemampuan penolakan gangguan yang baik dengan deviasi maksimum

### **5.2. Saran**

Peningkatan Model:

1. Identifikasi Nonlinearitas: Melakukan identifikasi model nonlinear untuk meningkatkan akurasi prediksi sistem.
2. Pemodelan Delay: Menggunakan model dengan delay eksplisit untuk memperbaiki akurasi model.
3. Identifikasi Gangguan: Melakukan identifikasi karakteristik gangguan untuk desain kontroler yang lebih robust.

Pengembangan Kontroler:

1. Kontroler Adaptif: Implementasi kontroler adaptif yang dapat menyesuaikan parameter secara real-time.
2. Model Predictive Control (MPC): Penggunaan MPC untuk menangani constraint dan optimasi performa.
3. Fuzzy Logic Controller: Implementasi fuzzy logic untuk menangani ketidakpastian dan nonlinearitas.

Implementasi Praktis:

1. Anti-Windup: Implementasi mekanisme anti-windup untuk mencegah saturasi integrator.
2. Filter Derivative: Penggunaan filter pada aksi derivative untuk mengurangi sensitivitas terhadap noise.
3. Gain Scheduling: Implementasi gain scheduling untuk mengakomodasi variasi kondisi operasi.