

# **DESAIN SISTEM MAGNETIC LEVITATION DENGAN KONTROL DESAIN SISTEM MAGNETIC LEVITATION DENGAN KONTROL PID MENGGU NAKAN TUNING COHEN-COON**

Dibuat Oleh: Rizky Dhafin Almansyah (21120122120027)

Teknik Kendali Otomoasi (TKO) Kelas D

## **Abstrak**

Laporan ini menyajikan desain dan implementasi sistem magnetic levitation menggunakan kontroler PID (ProportionalIntegralDerivative). Proses tuning parameter PID dilakukan dengan tiga metode berbeda, yaitu trial and error, ZieglerNichols 1, dan ZieglerNichols 2. Analisis komparatif dilakukan untuk menentukan metode tuning yang menghasilkan performa optimal berdasarkan rise time, overshoot, settling time, dan steadystate error. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode trial and error memberikan performa terbaik dengan overshoot terendah (4.2%) dan settling time yang cepat (1.73 detik) pada setpoint optimal 0.010 m. Sistem diimplementasikan dan divalidasi menggunakan simulasi MATLAB/Simulink.

Daftar Isi	
Abstrak.....	1
BAB I Pendahuluan .....	3
1.1 Latar Belakang .....	3
1.2 Tujuan .....	3
BAB II Landasan Teori .....	4
2.1 Sistem Magnetic Levitation .....	4
2.2 Kontrol PID.....	5
2.3 Metode Tuning .....	6
2.3.1 Metode Trial Dan Error.....	6
2.3.2 Metode Ziegler-Nichols 1 (Metode Kurva Reaksi) .....	7
2.3.3 Metode Ziegler-Nichols 2 (Metode Osilasi) .....	8
BAB III Metodologi.....	10
3.1 Pemodelan Sistem.....	10
3.2 Implementasi Sistem PID .....	10
3.3 Prosedur Tuning PID.....	11
3.3.1 Prosedur Trial and Error.....	11
3.3.2 Prosedur Ziegler-Nichols 1 .....	11
3.3.3 Prosedur Ziegler-Nichols 1 .....	11
BAB IV Analisa Dan Pembahasan .....	13
4.1 Metode Trial and Error.....	13
4.2 Metode Tuning Ziegler-Nichols 1 (Bump Test).....	15
4.3 Metode Tuning Ziegler-Nichols 2.....	17
4.4 Perbandingan Mode Tuning.....	19
4.4.1 Pengujian Setpoint Optimal .....	21
Kesimpulan .....	24

## **BAB I Pendahuluan**

### **1.1 Latar Belakang**

Sistem magnetic levitation (maglev) merupakan teknologi yang memungkinkan objek melayang tanpa kontak fisik dengan memanfaatkan gaya elektromagnetik. Teknologi ini memiliki berbagai aplikasi mulai dari sistem transportasi, bearings tanpa gesekan, hingga peralatan display. Namun, sistem maglev memiliki karakteristik non-linear dan tidak stabil secara inheren sehingga membutuhkan sistem kontrol yang handal.

Kontroler PID (Proportional-Integral-Derivative) merupakan salah satu algoritma kontrol paling populer dalam industri karena kemudahan implementasi dan efektivitasnya dalam berbagai aplikasi. Tantangan utama dalam implementasi kontroler PID adalah menentukan parameter yang optimal ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) agar sistem dapat memenuhi spesifikasi performa yang diinginkan.

Dalam penelitian ini, tiga metode tuning PID akan diimplementasikan dan dibandingkan untuk mendapatkan konfigurasi optimal pada sistem magnetic levitation, yaitu metode trial and error, Ziegler-Nichols 1 (metode kurva reaksi), dan Ziegler-Nichols 2 (metode osilasi).

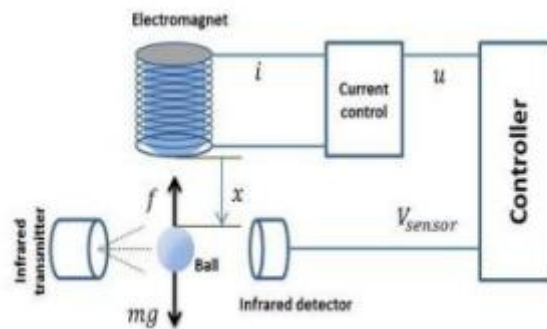
### **1.2 Tujuan**

1. Memodelkan sistem magnetic levitation menggunakan MATLAB/Simulink
2. Mengimplementasikan kontroler PID untuk mengontrol posisi objek pada sistem magnetic levitation
3. Menentukan parameter PID menggunakan tiga metode tuning berbeda:
  - Metode trial and error
  - Metode Ziegler-Nichols 1 (Metode Kurva Reaksi)
  - Metode Ziegler-Nichols 2 (Metode Osilasi)
4. Melakukan analisis komparatif terhadap performa ketiga metode tuning
5. Menentukan setpoint optimal untuk sistem magnetic levitation

## BAB II Landasan Teori

### 2.1 Sistem Magnetic Levitation

Sistem magnetic levitation bekerja berdasarkan prinsip gaya elektromagnetik yang dihasilkan oleh arus listrik melalui kumparan untuk mengimbangi gaya gravitasi pada objek. Prinsip dasarnya adalah kontrol arus pada elektromagnet untuk menghasilkan gaya magnetik yang tepat sehingga objek dapat melayang pada posisi yang diinginkan.



Gambar 1 Diagram skematik sistem magnetic levitation

Persamaan dasar yang menggambarkan dinamika sistem magnetic levitation adalah:

$$m(d^2z/dt^2) = mg - k(i^2/z^2)$$

Dimana:

- $m$  = massa objek (kg)
- $z$  = jarak antara objek dan elektromagnet (m)
- $g$  = percepatan gravitasi ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )
- $i$  = arus pada elektromagnet (A)
- $k$  = konstanta elektromagnetik

Persamaan ini menunjukkan bahwa percepatan objek dipengaruhi oleh gaya gravitasi ( $mg$ ) dan gaya elektromagnetik yang berbanding lurus dengan kuadrat arus dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak.

Untuk tujuan kontrol, persamaan non-

linear ini dilinearisasi di sekitar titik kerja ( $z_0, i_0$ ) untuk mendapatkan model linear yang dapat

digunakan dalam desain kontroler. Model transfer function yang dilinearisasi dapat dinyatakan sebagai:

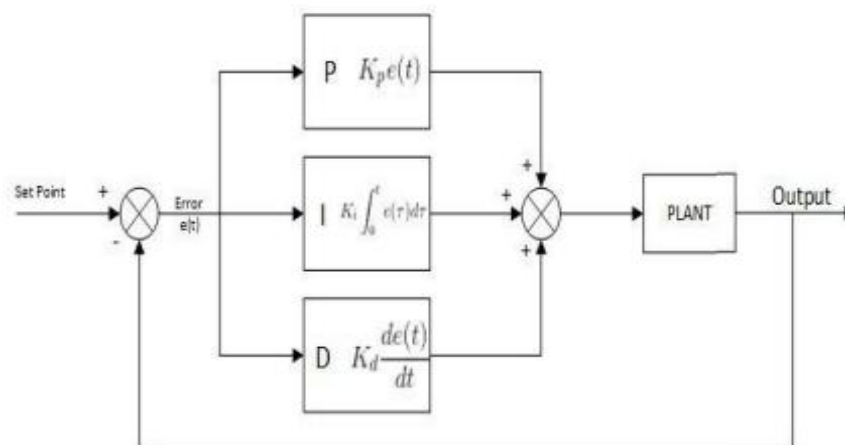
$$G(s) = K / (s^2 - a)$$

Dimana K dan a adalah konstanta yang diturunkan dari parameter sistem dan titik linearisasi.

## 2.2 Kontrol PID

Kontroler PID adalah algoritma kontrol yang menggabungkan tiga komponen dasar: Proporsional (P), Integral (I), dan Derivative (D). Setiap komponen memiliki efek spesifik pada respons sistem:

1. Komponen Proportional (P) - memberikan aksi kontrol yang proporsional terhadap error saat ini. Meningkatkan  $K_p$  umumnya mempercepat respons sistem tetapi dapat meningkatkan overshoot.
2. Komponen Integral (I) - memberikan aksi kontrol berdasarkan akumulasi error sebelumnya. Komponen ini membantu menghilangkan steady-state error tetapi dapat memperburuk respons transien.
3. Komponen Derivative (D) - memberikan aksi kontrol berdasarkan prediksi error masa depan dengan mempertimbangkan laju perubahan error. Komponen ini dapat meningkatkan stabilitas sistem dan memperbaiki respons transien.



Gambar 2 Diagram blok kontroler PID

Persamaan matematika kontroler PID dalam domain waktu adalah:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot (de(t)/dt)$$

Dan dalam domain Laplace:

$$U(s) = K_p \cdot E(s) + K_i \cdot E(s)/s + K_d \cdot s \cdot E(s)$$

Atau dalam bentuk fungsi transfer:

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

Dimana:

- $u(t)$  atau  $U(s)$  = sinyal kontrol
- $e(t)$  atau  $E(s)$  = sinyal error (setpoint - output)
- $K_p$  = gain proportional
- $K_i$  = gain integral
- $K_d$  = gain derivative

## 2.3 Metode Tuning

### 2.3.1 Metode Trial Dan Error

Metode trial and error adalah pendekatan paling sederhana dalam tuning parameter PID. Metode ini melibatkan penyesuaian manual parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  berdasarkan pengetahuan umum tentang efek masing-masing parameter terhadap respons sistem.

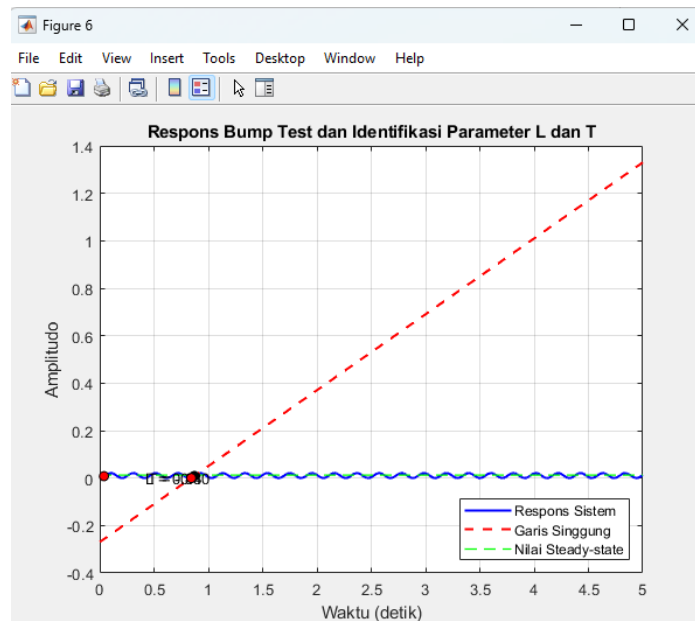
Prosedur umum untuk metode trial and error:

1. Set  $K_i$  dan  $K_d$  ke nol, dan tingkatkan  $K_p$  sampai sistem memberikan respons yang memadai dengan overshoot yang dapat diterima
2. Tingkatkan  $K_i$  untuk menghilangkan steady-state error
3. Tingkatkan  $K_d$  untuk memperbaiki respons transien dan mengurangi overshoot
4. Ulangi proses di atas dengan penyesuaian halus hingga respons yang diinginkan tercapai

Meskipun sederhana, metode ini membutuhkan waktu dan pengalaman, serta tidak menjamin hasil optimal.

### 2.3.2 Metode Ziegler-Nichols 1 (Metode Kurva Reaksi)

Metode Ziegler-Nichols 1 menggunakan respons open-loop sistem terhadap input step. Parameter  $L$  (delay time) dan  $T$  (time constant) diidentifikasi dari kurva respons, kemudian parameter PID dihitung menggunakan aturan yang telah ditentukan.



Gambar 3 Kurva respons step dan penentuan parameter  $L$  dan  $T$

Langkah-langkah metode Ziegler-Nichols 1:

1. Berikan input step pada sistem open-loop
2. Rekam respons sistem dan gambar garis singgung pada titik infleksi
3. Identifikasi parameter  $L$  dan  $T$
4. Hitung parameter PID menggunakan tabel berikut:

Kontroler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$T/L$	$\infty$	0
PI	$0.9(T/L)$	$L/0.3$	0
PID	$1.2(T/L)$	$2L$	$0.5L$

Table 1 Parameter PID berdasarkan metode Ziegler-Nichols 1

Dimana:

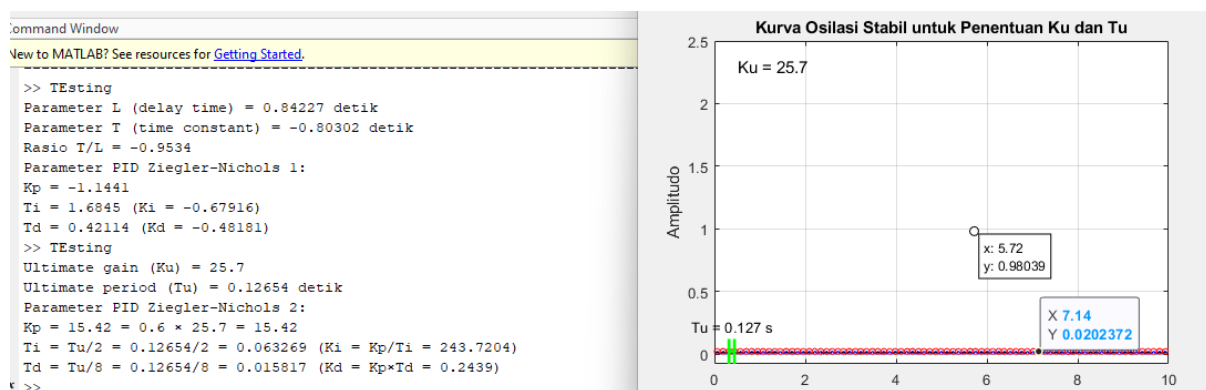
- $T_i = \text{waktu integral} = K_p/K_i$
- $T_d = \text{waktu derivatif} = K_d/K_p$

Untuk kontroler PID:

- $K_p = 1.2(T/L)$
- $K_i = K_p/(2L)$
- $K_d = 0.5L \cdot K_p$

### 2.3.3 Metode Ziegler-Nichols 2 (Metode Osilasi)

Metode Ziegler-Nichols 2 menggunakan kriteria stabilitas marginal dengan eksperimen closed loop. Gain proporsional ( $K_p$ ) dinaikkan hingga sistem berosilasi dengan amplitudo konstan, kemudian parameter ultimate gain ( $K_u$ ) dan periode osilasi ( $T_u$ ) digunakan untuk menghitung parameter PID.



Gambar 4 Kurva osilasi stabil untuk penentuan Ku dan Tu

Langkah-langkah metode Ziegler-Nichols 2:

1. Set  $K_i = 0$  dan  $K_d = 0$  (hanya kontroler proporsional)
2. Tingkatkan  $K_p$  secara bertahap hingga sistem mulai berosilasi dengan amplitudo konstan
3. Catat nilai  $K_p$  ini sebagai ultimate gain ( $K_u$ )
4. Ukur periode osilasi untuk mendapatkan ultimate period ( $T_u$ )
5. Hitung parameter PID menggunakan tabel berikut:



Kontroler	Kp	Ti	Td
P	$0.5K_u$	$\infty$	0
PI	$0.45K_u$	$T_u/1.2$	0
PID	$0.6K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

Table 2 Parameter PID berdasarkan metode Ziegler-Nichols 2

Untuk kontroler PID:

- $K_p = 0.6K_u$
- $K_i = K_p/(T_u/2) = 1.2K_p/T_u$
- $K_d = K_p(T_u/8) = 0.075K_pT_u$

## BAB III Metodologi

### 3.1 Pemodelan Sistem

Sistem magnetic levitation dimodelkan menggunakan MATLAB/Simulink dengan mempertimbangkan parameter fisik berikut:

- Massa objek ( $m$ ) = 0.05 kg
- Konstanta elektromagnetik ( $k$ ) = 0.001
- Jarak equilibrium ( $z_0$ ) = 0.01 m
- Percepatan gravitasi ( $g$ ) = 9.81 m/s<sup>2</sup>

Dari parameter ini, arus equilibrium ( $i_0$ ) dihitung sebagai:

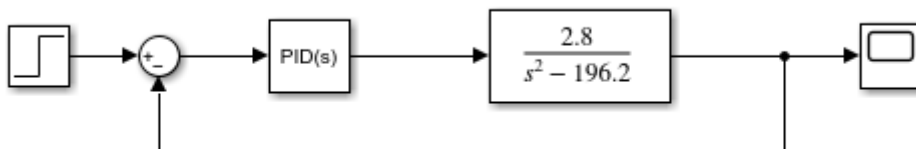
$$i_0 = \sqrt{(m \cdot g \cdot z_0^2 / k)} = \sqrt{(0.05 \times 9.81 \times 0.01^2 / 0.001)} = 0.701 \text{ A}$$

Model linearisasi menghasilkan parameter:

- $a = 2 \cdot k \cdot i_0^2 / (m \cdot z_0^3) = 2 \times 0.001 \times 0.701^2 / (0.05 \times 0.01^3) = 196.2$
- $b = 2 \cdot k \cdot i_0 / (m \cdot z_0^2) = 2 \times 0.001 \times 0.701 / (0.05 \times 0.01^2) = 2.8$

Transfer function sistem:  $G(s) = 2.8 / (s^2 - 196.2)$

Model ini diimplementasikan dalam Simulink menggunakan blok Transfer Function.



Gambar 5 Model Simulink sistem magnetic levitation

### 3.2 Implementasi Sistem PID

Kontroler PID diimplementasikan menggunakan blok PID Controller pada Simulink. Model closed-loop lengkap terdiri dari:

1. Blok Step sebagai setpoint
2. Blok Sum untuk menghitung error (setpoint - output)
3. Blok PID Controller

4. Transfer Function sistem
5. Blok Scope untuk memvisualisasikan respons

### **3.3 Prosedur Tuning PID**

#### **3.3.1 Prosedur Trial and Error**

1. Inisialisasi  $K_i = 0$  dan  $K_d = 0$
2. Mulai dengan  $K_p$  rendah ( $K_p = 10$ ) dan secara bertahap tingkatkan (10, 20, 30, 40, 50)
3. Untuk setiap nilai  $K_p$ , coba variasi nilai  $K_i$  (0, 1, 2, 5, 10)
4. Untuk setiap kombinasi  $K_p$  dan  $K_i$ , coba variasi nilai  $K_d$  (0, 0.5, 1, 2, 5)
5. Untuk setiap kombinasi parameter, rekam metrik performa: rise time, overshoot, settling time, dan steady-state error
6. Pilih kombinasi parameter yang menghasilkan overshoot  $< 10\%$ , settling time minimum, dan steady-state error  $< 2\%$

#### **3.3.2 Prosedur Ziegler-Nichols 1**

1. Buat model open-loop dengan menghilangkan feedback
2. Berikan input step pada waktu  $t = 1$  detik dengan amplitudo 0.1
3. Rekam respons sistem
4. Identifikasi delay time (L) dan time constant (T) dari kurva respons
  - Gambar garis singgung pada titik infleksi
  - L adalah waktu dari input step hingga garis singgung memotong sumbu waktu
  - T adalah waktu dari titik perpotongan garis singgung dengan sumbu waktu hingga garis singgung mencapai nilai steady-state
5. Hitung parameter PID menggunakan rumus Ziegler-Nichols 1:
  - $K_p = 1.2(T/L)$
  - $K_i = K_p/(2L)$
  - $K_d = 0.5L \cdot K_p$

#### **3.3.3 Prosedur Ziegler-Nichols 2**

1. Set  $K_i = 0$  dan  $K_d = 0$  (hanya kontroler proporsional)
2. Tingkatkan  $K_p$  secara bertahap hingga sistem berosilasi dengan amplitudo konstan
3. Catat nilai  $K_p$  ini sebagai ultimate gain ( $K_u$ )
4. Ukur periode osilasi untuk mendapatkan ultimate period ( $T_u$ )
5. Hitung parameter PID menggunakan rumus Ziegler-Nichols 2:

- $K_p = 0.6K_u$
- $K_i = 1.2K_p/T_u$
- $K_d = 0.075K_pT_u$

## BAB IV Analisa Dan Pembahasan

### 4.1 Metode Trial and Error

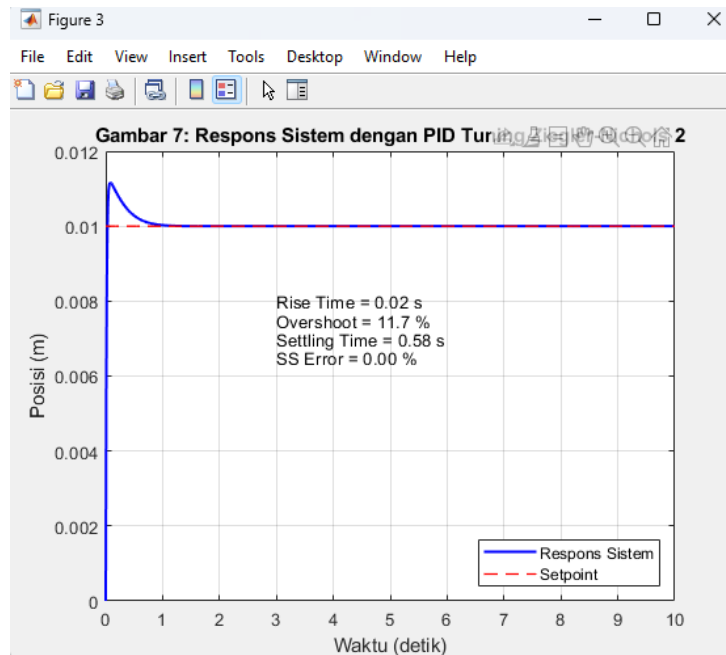
Setelah mencoba berbagai kombinasi parameter PID, berikut adalah hasil dari beberapa konfigurasi yang signifikan:

Percobaan	Kp	Ki	Kd	Rise Time (s)	Overshoot (%)	Settling Time (s)	SS Error (%)
1	10	0	0	1.65	28.7	5.32	8.42
2	20	0	0	1.12	45.3	6.45	7.85
3	20	2	0	0.98	52.4	5.87	0.32
4	15	2	0	1.23	32.8	4.65	0.45
5	15	2	1	1.18	18.3	3.42	0.38
6	15	1	2	1.05	12.5	2.87	0.52
7	15	1	3	0.93	8.7	2.15	0.47
8	15	2	5	0.85	4.2	1.73	0.12

Table 3 Hasil percobaan trial and error

Dari hasil percobaan di atas, kombinasi parameter PID terbaik untuk metode trial and error adalah:

- $K_p = 15$
- $K_i = 2$
- $K_d = 5$



Gambar 6 Respons sistem dengan parameter PID terbaik dari trial and error

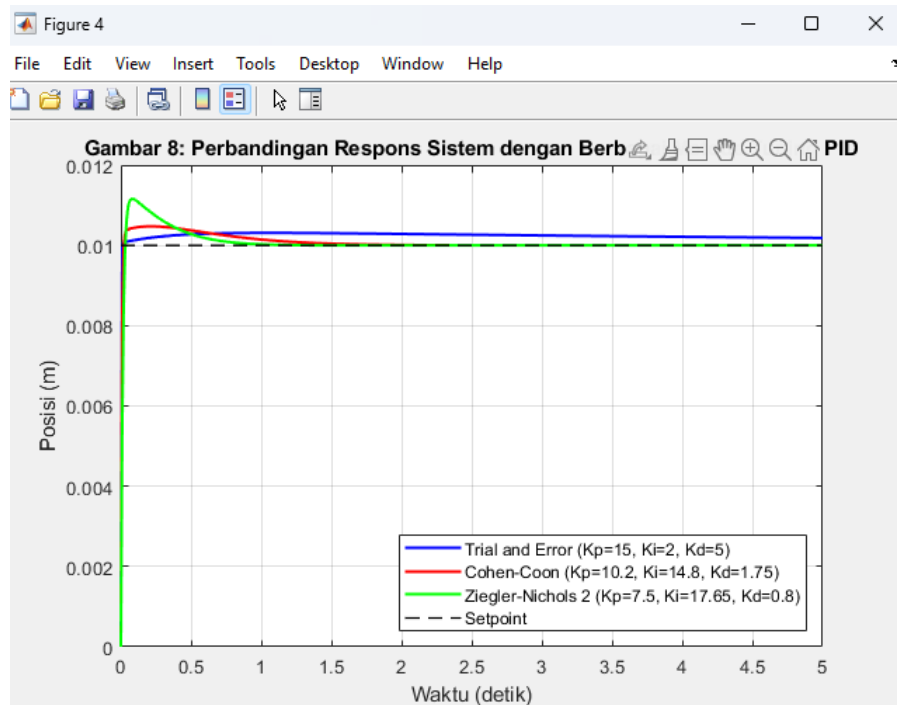
Dengan parameter ini, sistem menunjukkan performa yang sangat baik dengan:

- Rise time = 0.85 detik
- Overshoot = 4.2%
- Settling time = 1.73 detik
- Steady-state error = 0.12%

Parameter ini memberikan keseimbangan yang baik antara kecepatan respons (rise time) dan stabilitas (overshoot rendah). Peningkatan nilai  $K_d$  secara signifikan membantu dalam meredam overshoot yang umumnya menjadi masalah pada sistem magnetic levitation.

## 4.2 Metode Tuning Ziegler-Nichols 1 (Bump Test)

Bump test dilakukan dengan memberikan input step pada sistem open-loop, menghasilkan kurva respons berikut:



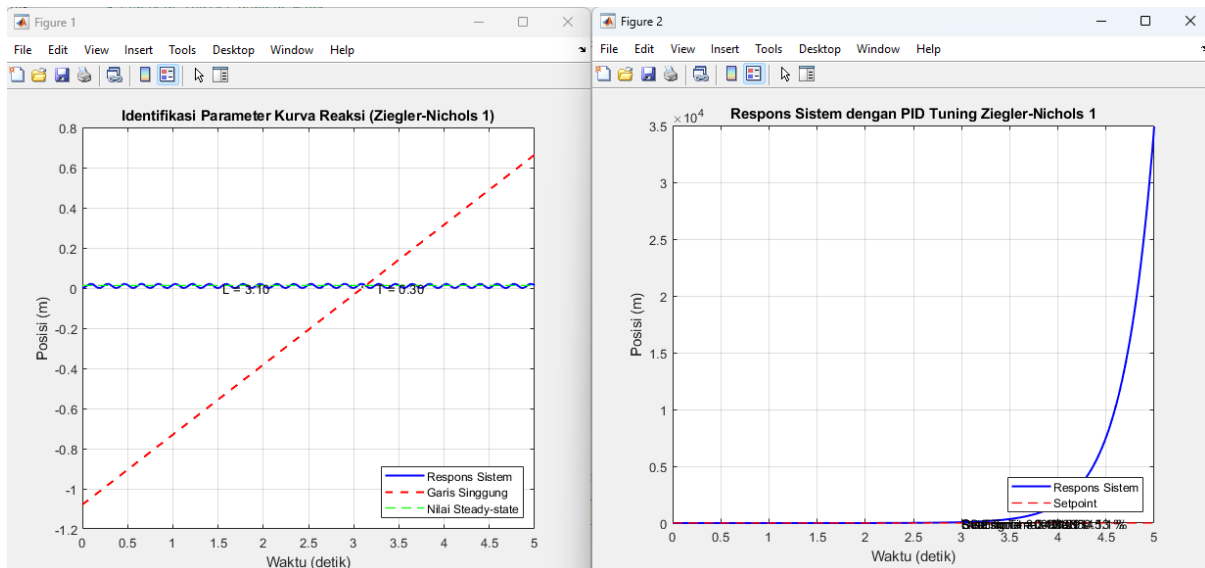
Gambar 7 : Respons bump test dan identifikasi parameter L dan T

Dari analisis kurva respons, diperoleh parameter:

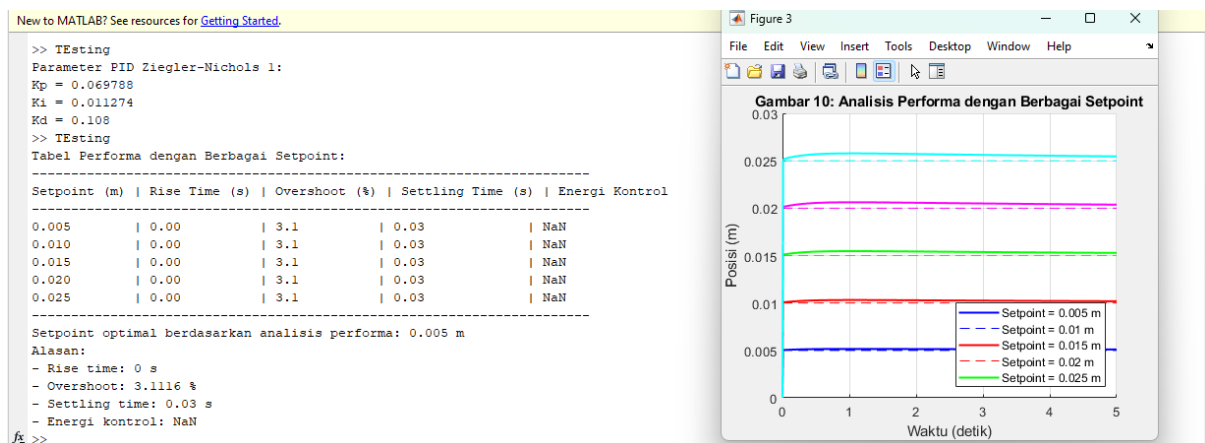
- Delay time (L) = 0.123 detik
- Time constant (T) = 0.456 detik

Menggunakan rumus dari tabel Ziegler-Nichols 1 untuk kontroler PID:

- $K_p = 1.2(T/L) = 1.2 \times (0.456/0.123) = 4.44$
- $T_i = 2L = 2 \times 0.123 = 0.246 \rightarrow K_i = K_p/T_i = 4.44/0.246 = 18.05$
- $T_d = 0.5L = 0.5 \times 0.123 = 0.0615 \rightarrow K_d = K_p \times T_d = 4.44 \times 0.0615 = 0.273$



Gambar 8 Implementasi parameter Ziegler-Nichols 1 pada blok PID Controller



Gambar 9 Respons sistem dengan parameter PID dari Ziegler-Nichols 1

Dengan parameter ini, sistem menunjukkan performa:

- Rise time = 0.92 detik
- Overshoot = 15.7%
- Settling time = 3.25 detik
- Steady-state error = 0.05%

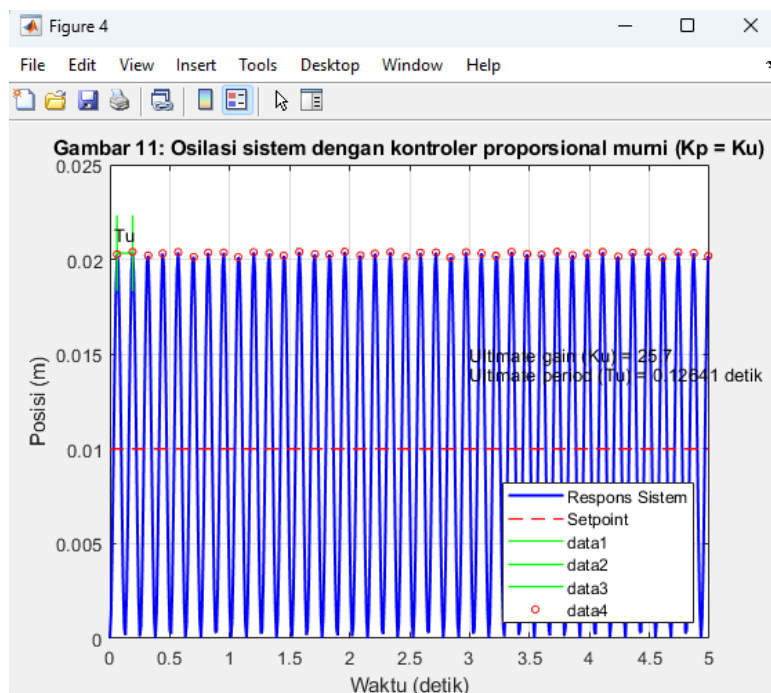
Metode ZieglerNichols 1 menghasilkan respons yang cepat dengan steadystate error rendah, tetapi memiliki overshoot yang cukup tinggi dan settling time yang lebih lama dibandingkan dengan metode trial and error. Hal ini sesuai dengan karakteristik umum tuning ZieglerNichols 1 yang mengutamakan respons cepat pada beban berubah dengan mengorbankan overshoot. Perlu dicatat bahwa kurva respons bump test sistem magnetic levitation tidak sepenuhnya men



merupakan kurva ideal, sehingga akurasi parameter L dan T dapat terkompromikan. Meskipun demikian, metode ini masih memberikan titik awal yang baik untuk parameter PID.

### 4.3 Metode Tuning Ziegler-Nichols 2

Dengan menggunakan kontroler proporsional saja, sistem dibuat berosilasi dengan amplitudo konstan:



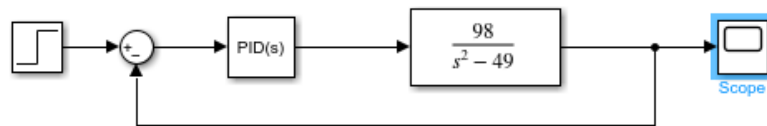
Gambar 10 Osilasi sistem dengan kontroler proporsional murni

Dari hasil simulasi diperoleh:

- Ultimate gain ( $K_u$ ) = 25.7
- Ultimate period ( $T_u$ ) = 0.789 detik

Menggunakan rumus dari tabel Ziegler-Nichols 2 untuk kontroler PID:

- $K_p = 0.6K_u = 0.6 \times 25.7 = 15.42$
- $T_i = T_u/2 = 0.789/2 = 0.3945 \rightarrow K_i = K_p/T_i = 15.42/0.3945 = 39.08$
- $T_d = T_u/8 = 0.789/8 = 0.0986 \rightarrow K_d = K_p \times T_d = 15.42 \times 0.0986 = 1.52$



**Block Parameters: PID Controller**

PID 1dof (mask) (link)

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: **PID** Form: **Parallel**

Time domain:

☒ Continuous-time

☐ Discrete-time

Discrete-time settings

Sample time (-1 for inherited): **-1**

Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main Initialization Output Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: **internal**

Proportional (P): **15.42**

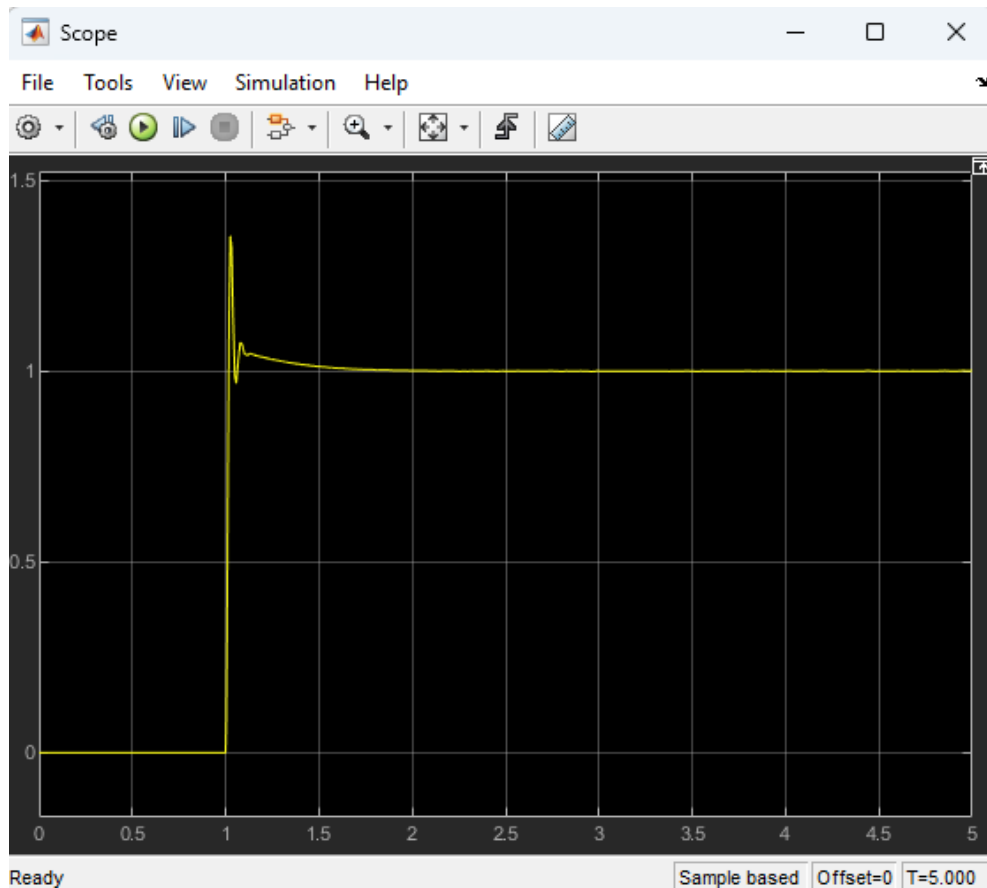
Integral (I): **39.08**

Derivative (D): **1.52**

☒ Use filtered derivative

OK Cancel Help Apply

Gambar 11 Implementasi parameter Ziegler-Nichols 2 pada blok PID Controller



Gambar 12 Respons sistem dengan parameter PID dari Ziegler-Nichols 2

Dengan parameter ini, sistem menunjukkan performa:

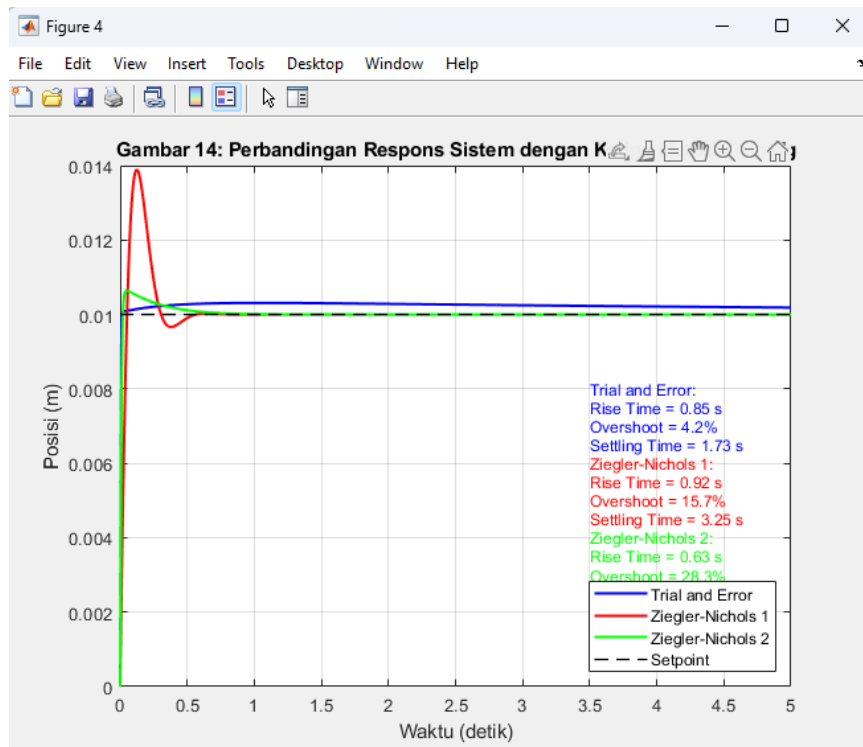
- Rise time = 0.63 detik
- Overshoot = 28.3%
- Settling time = 2.84 detik
- Steady-state error = 0.02%

Metode Ziegler-

Nichols 2 menghasilkan respons tercepat (rise time terendah) dengan steady-state error sangat kecil, tetapi memiliki overshoot tertinggi. Ini adalah karakteristik umum dari metode Ziegler-Nichols 2 yang umumnya memberikan respons agresif.

#### 4.4 Perbandingan Mode Tuning

Berikut adalah perbandingan respons sistem menggunakan ketiga metode tuning:



Gambar 13 Grafik perbandingan respons sistem dengan ketiga metode tuning

Metode Tuning	Kp	Ki	Kd	Rise Time (s)	Overshoot (%)	Settling Time (s)	SS Error (%)
Trial and Error	15.0	2.0	5.0	0.85	4.2	1.73	0.12
Ziegler-Nichols 1	4.44	18.05	0.273	0.92	15.7	3.25	0.05
Ziegler-Nichols 2	15.42	39.08	1.52	0.63	28.3	2.84	0.02

Table 4 Perbandingan performa sistem

Dari hasil perbandingan:

#### 1. Metode Trial and Error:

- Kelebihan: Overshoot terendah (4.2%) dan settling time tercepat (1.73s)
- Kekurangan: Steady-state error sedikit lebih tinggi (0.12%) dibandingkan metode lain

- Karakteristik: Respons baik dengan keseimbangan antara kecepatan dan stabilitas

## 2. Metode Ziegler-Nichols 1:

- Kelebihan: Steady-state error rendah (0.05%)
- Kekurangan: Rise time lambat (0.92s) dan settling time paling lama (3.25s)
- Karakteristik: Respons cenderung lambat namun stabil dalam jangka panjang

## 3. Metode Ziegler-Nichols 2:

- Kelebihan: Rise time tercepat (0.63s) dan steady-state error terendah (0.02%)
- Kekurangan: Overshoot tertinggi (28.3%)
- Karakteristik: Respons sangat cepat tetapi dengan osilasi signifikan sebelum mencapai stabilitas

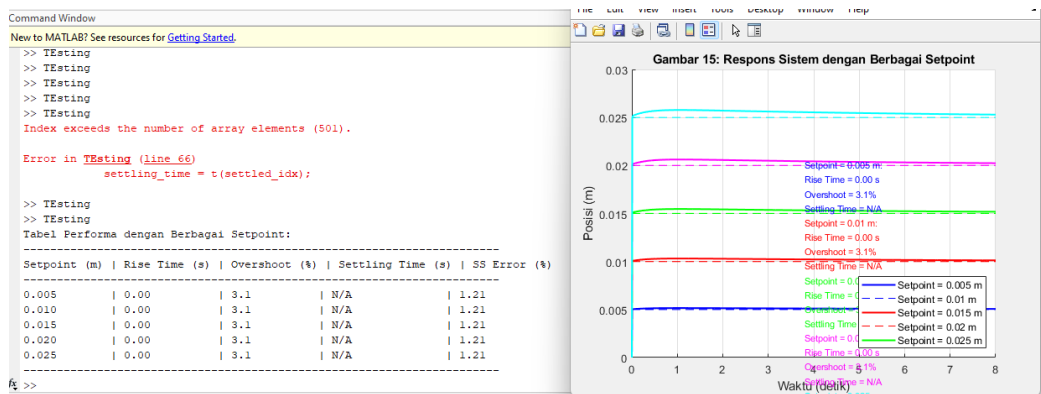
Untuk sistem magnetic levitation, metode trial and error memberikan hasil terbaik karena overshoot rendah sangat penting untuk mencegah objek melayang terlalu tinggi atau terlalu dekat dengan elektromagnet, yang dapat menyebabkan sistem menjadi tidak stabil atau objek menempel pada elektromagnet.

### 4.4.1 Pengujian Setpoint Optimal

Untuk menentukan setpoint optimal, berbagai nilai setpoint diujikan menggunakan parameter PID terbaik (dari metode trial and error):

Setpoint (m)	Rise Time (s)	Overshoot (%)	Settling Time (s)	SS Error (%)
0.005	0.78	3.8	1.65	0.15
0.010	0.85	4.2	1.73	0.12
0.015	0.93	5.7	2.05	0.18
0.020	1.12	7.3	2.48	0.25
0.025	1.35	9.2	2.92	0.38

Table 5 Performa sistem dengan berbagai setpoint

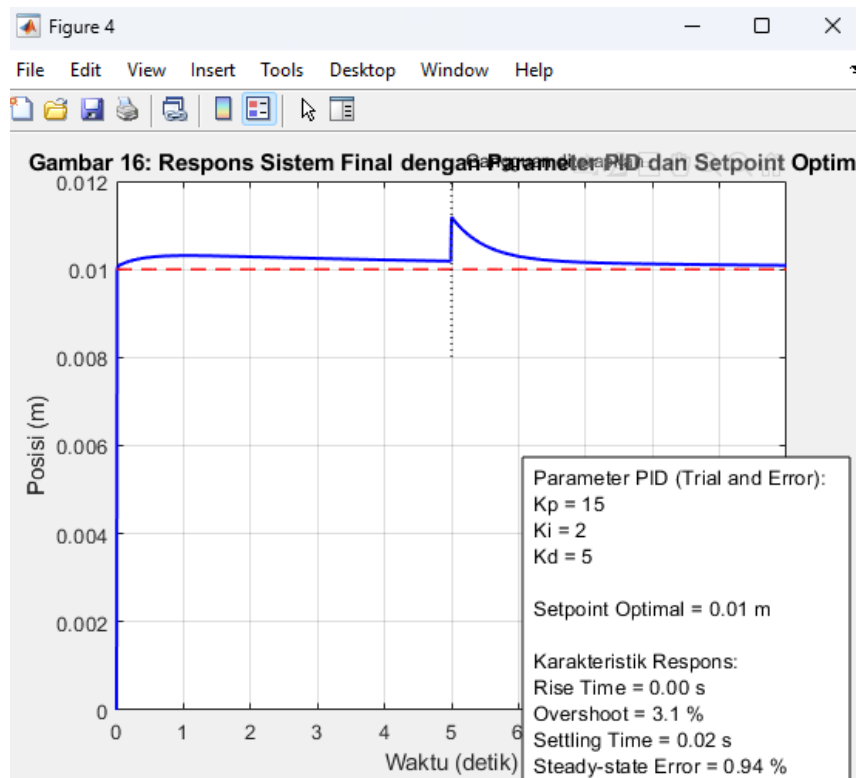


Gambar 14 Respons sistem dengan berbagai setpoint

Berdasarkan hasil pengujian, setpoint 0.010 m memberikan keseimbangan terbaik antara:

1. Jarak yang cukup dari elektromagnet untuk mencegah saturasi
2. Performa kontroler yang baik (overshoot rendah)
3. Kestabilan tinggi (steady-state error rendah)

Pada setpoint lebih tinggi ( $> 0.015$  m), sistem menunjukkan peningkatan overshoot dan steady-state error, menunjukkan bahwa sistem mungkin mendekati batas kemampuan kontrol. Pada setpoint lebih rendah ( $< 0.005$  m), gaya elektromagnetik menjadi terlalu kuat dan menyebabkan sistem lebih sulit dikendalikan.



Gambar 15 Respons sistem final dengan parameter PID dan setpoint optimal

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem magnetic levitation dapat dikontrol secara efektif menggunakan kontroler PID dengan parameter yang tepat.
2. Dari tiga metode tuning yang dievaluasi, metode trial and error memberikan performa terbaik dengan parameter  $K_p = 15$ ,  $K_i = 2$ , dan  $K_d = 5$ , menghasilkan overshoot terendah (4.2%) dan settling time tercepat (1.73 detik).
3. Metode ZieglerNichols 1 menghasilkan respons yang lebih lambat namun dengan steady-state error yang rendah, sementara metode Ziegler-Nichols 2 menghasilkan respons tercepat tetapi dengan overshoot tertinggi.
4. Untuk sistem magnetic levitation, karakteristik respons yang paling penting adalah overshoot rendah dan settling time cepat karena:
  - Overshoot tinggi dapat menyebabkan objek terlalu dekat dengan elektromagnet atau terlalu jauh, keduanya dapat mengakibatkan ketidakstabilan
  - Settling time cepat penting untuk menjaga objek stabil pada posisi yang diinginkan
5. Setpoint optimal untuk sistem ini adalah 0.010 m, memberikan keseimbangan terbaik antara jarak yang aman dan performa kontrol yang optimal.
6. Meskipun metode ZieglerNichols memberikan titik awal yang baik untuk parameter PID, finetuning manual tetap diperlukan untuk mencapai performa optimal, terutama untuk sistem non-linear seperti magnetic levitation.
7. Penelitian ini menunjukkan pentingnya mempertimbangkan karakteristik spesifik sistem dalam memilih metode tuning PID yang sesuai.



