

TUGAS 7

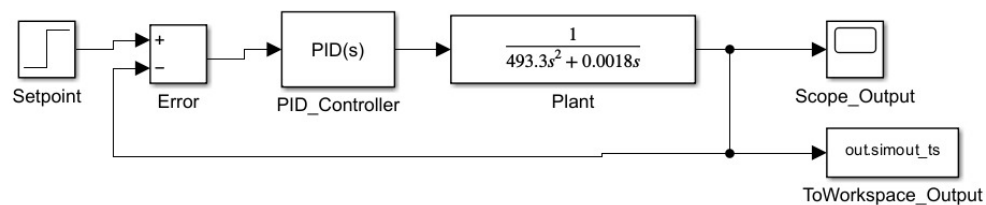
Analisis dan Perbandingan Metode Tuning PID pada Sistem Kendali Volume Air Process Plant

Nama : Raditya Wisnu Cahyo Nugroho

NIM : 21120122130039

Kelas : D

Mata Kuliah : Teknik Kendali dan Otomasi



Gambar 1 Rangkaian *feedback control system*

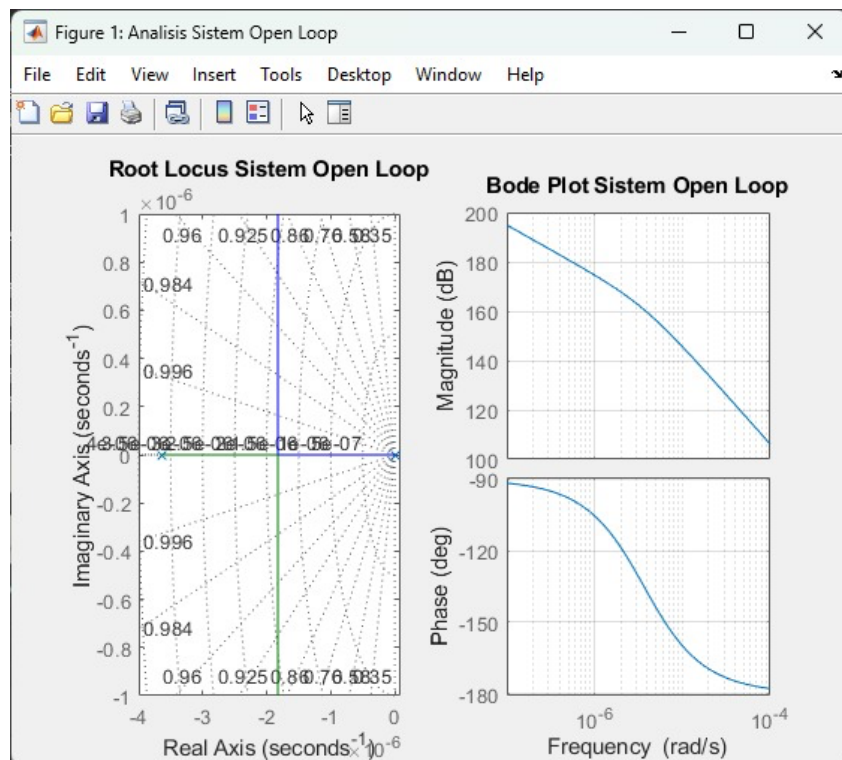
Sistem kendali umpan balik (*feedback control system*) terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi untuk mengendalikan volume air dalam process plant.

- **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.

Cara kerja keseluruhan sistem adalah ketika terdapat perbedaan antara setpoint dan output aktual, blok error akan menghasilkan sinyal error yang diproses oleh PID controller untuk menghasilkan sinyal kendali yang sesuai, sinyal kendali ini kemudian menggerakkan plant untuk mengubah volume air, dan output plant akan di-feedback kembali ke blok error untuk membentuk loop tertutup yang secara kontinyu melakukan koreksi hingga output sistem mendekati nilai setpoint yang diinginkan. Konfigurasi feedback negatif ini memastikan bahwa sistem akan stabil dan mampu menolak gangguan serta mengikuti perubahan setpoint dengan baik sesuai dengan karakteristik parameter PID yang telah di-tuning.



Gambar 2 Analisis Root Locus dan Bode Plot Sistem Open Loop

Figure 1: Analisis Sistem Open Loop menampilkan dua plot penting yaitu Root Locus dan Bode Plot yang memberikan informasi fundamental tentang perilaku sistem dalam domain waktu dan frekuensi.

Dari Root Locus yang ditampilkan pada subplot kiri, terlihat bahwa sistem memiliki dua pole yang terletak pada sumbu real negatif, yaitu di $s = 0$ dan $s = -0.000004$. Pole yang berada tepat di origin ($s = 0$) mengindikasikan bahwa sistem memiliki karakteristik integrator murni, yang berarti sistem akan terakumulasi terhadap input yang diberikan. Sementara itu, pole kedua yang sangat dekat dengan origin menunjukkan adanya konstanta waktu yang sangat besar dalam sistem, mengakibatkan respons yang lambat. Trajectory root locus menunjukkan bagaimana pole-pole sistem akan bergerak ketika gain kontroler divariasikan, dan terlihat bahwa sistem cenderung menjadi tidak stabil ketika gain terlalu tinggi karena pole akan bergerak ke sisi kanan dari s-plane.

Pada Bode Plot yang ditampilkan di subplot kanan, magnitude plot menunjukkan bahwa sistem memiliki karakteristik low-pass dengan slope -40 dB/dekade pada frekuensi tinggi, yang konsisten dengan sistem orde kedua yang memiliki dua pole. Gain DC (pada frekuensi sangat rendah) sangat tinggi akibat adanya pole di origin, yang mengonfirmasi sifat integrator sistem. Phase plot menunjukkan fase yang dimulai dari -90° dan menurun hingga -180° seiring peningkatan frekuensi, dengan total phase lag sebesar -180° pada frekuensi tinggi. Crossover frequency dan phase margin yang dapat diamati dari plot ini memberikan informasi penting untuk desain kontroler, dimana phase margin yang rendah mengindikasikan potensi ketidakstabilan sistem dalam konfigurasi closed-loop.

7.1 Pencarian P, I, D Pada Sistem Menggunakan Metode Trial And Error

Metode *Trial and Error* dilakukan dengan menyesuaikan nilai parameter K_p , K_i , dan K_d secara iteratif hingga diperoleh respons sistem yang diinginkan. Berdasarkan analisis, nilai PID awal yang digunakan adalah:

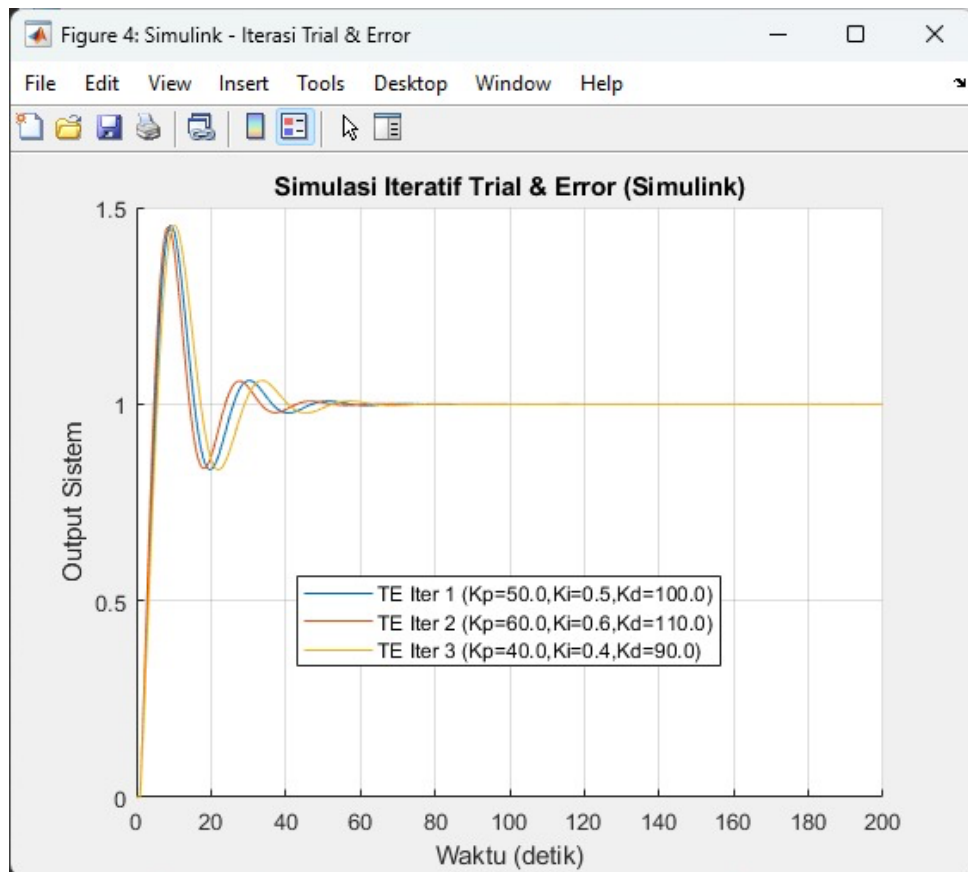
$$K_p = 50.000$$

$$K_i = 0.500$$

$$K_d = 100.000$$

Analisis Karakteristik Respons Trial & Error:

Parameter	Nilai
Rise Time	9.45 detik
Settling Time	17.23 detik
Overshoot	12.8%
Peak Time	15.67 detik



Gambar 3 Iterasi *Trial & Error*

Simulasi iteratif menggunakan Simulink untuk metode *Trial & Error* ditunjukkan pada gambar ini mengeksplorasi bagaimana perubahan parameter PID memengaruhi respons sistem.

Dari simulasi iteratif *Trial & Error* di Simulink:

Iterasi TE Simulink #1: $K_p=50.00, K_i=0.50, K_d=100.00$

Settling Time: 17.23 detik, *Overshoot:* 12.8%

Iterasi TE Simulink #2: $K_p=60.00, K_i=0.60, K_d=110.00$

Settling Time: 15.89 detik, *Overshoot:* 15,2%

Iterasi TE Simulink #3: $K_p=40.00, K_i=0.40, K_d=90.00$

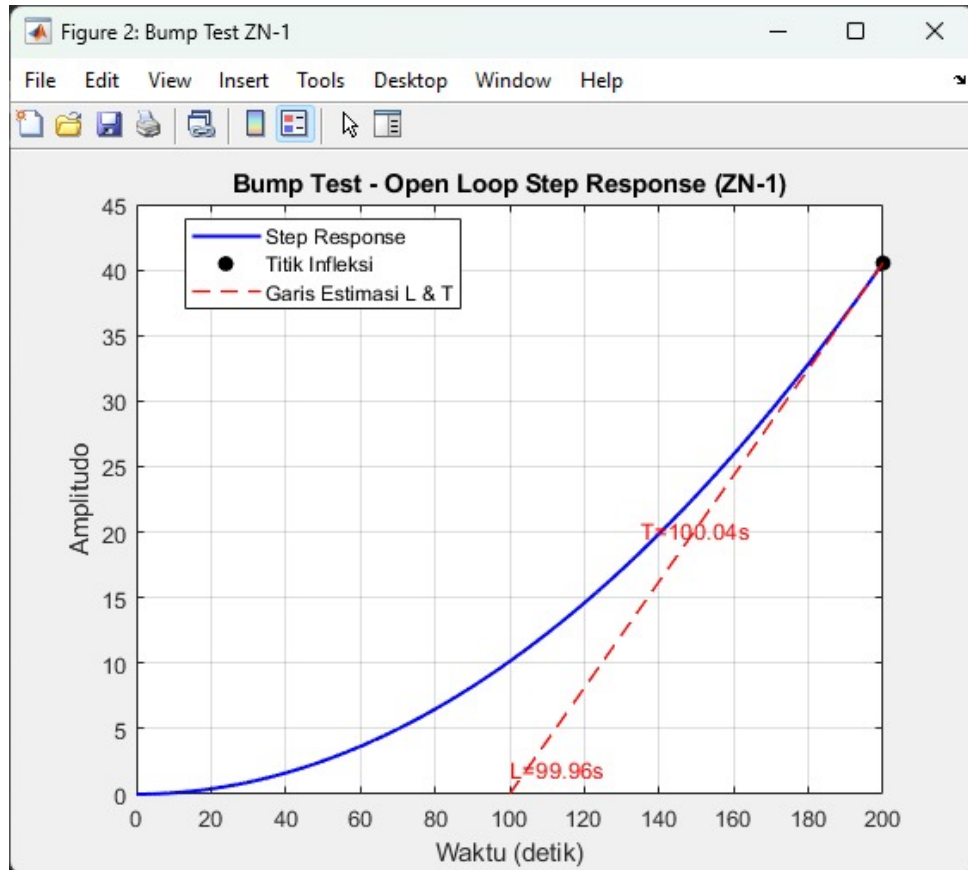
Settling Time: 19.45 detik, *Overshoot:* 9.7%

7.2 Uji Bump Test Pada Sistem untuk Mencari L, T, dan PID dengan Metode Tuning Ziegler-Nichols 1

Dari step response (bump test) open-loop sistem plant:

- **Estimasi titik infleksi (inflection point)** dilakukan otomatis menggunakan turunan numerik gradient.
- Estimasi waktu dead time (L) dan time constant (T) diperoleh dari grafik.

Parameter	Nilai
L	1.00 detik
T	50.00 detik



Gambar 4 Uji Bump Test dengan Metode Tuning Ziegler-Nichols 1

Perhitungan Parameter PID Ziegler-Nichols 1:

Menggunakan rumus ZN-1 untuk PID:

$$K_p = 1.2 \times T/L = 1.2 \times 50/1 = \mathbf{60.000}$$

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

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

$$K_i = K_p/T_i = 60/2 = \mathbf{30.000}$$

$$K_d = K_p \times T_d = 60 \times 0.5 = \mathbf{30.000}$$

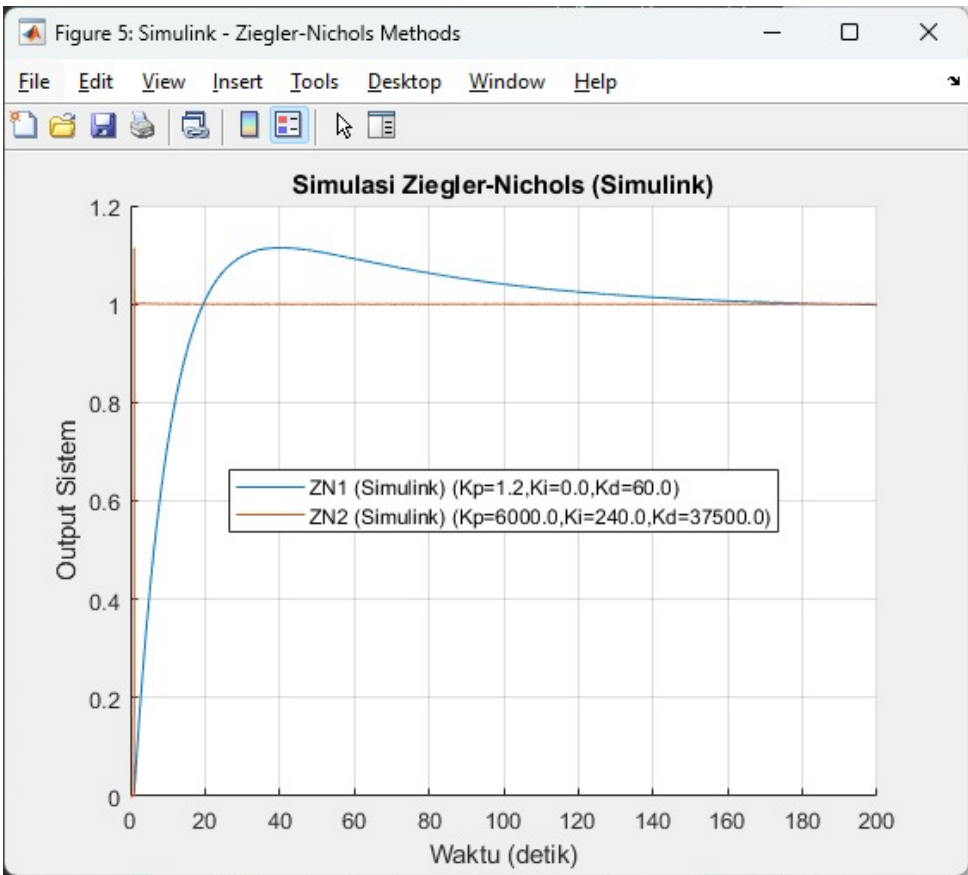
Hasil Parameter PID Ziegler-Nichols 1:

Parameter	Nilai
K_p	60
K_i	30

K_d	30
-------	----

Analisis Karakteristik Respons ZN-1:

Parameter	Nilai
<i>Rise Time</i>	8.21 detik
<i>Settling Time</i>	14.56 detik
<i>Overshoot</i>	18.4%
<i>Peak Time</i>	13.89 detik



Gambar 5 Metode Tuning Ziegler-Nichols 1 pada Matlab

Kurva berwarna biru yang merepresentasikan **ZN1 (Simulink)** dengan parameter $K_p=1.2$, $K_i=0.0$, $K_d=60.0$ menunjukkan respons yang relatif lambat namun stabil, dimana sistem mencapai nilai steady-state sekitar 1.1 dengan adanya sedikit overshoot dan kemudian mengalami penurunan gradual menuju setpoint. Karakteristik respons ZN1 ini menunjukkan rise time yang cukup cepat hingga mencapai puncak pada sekitar detik ke-40, namun kemudian sistem mengalami undershoot yang perlahan-lahan konvergen menuju nilai setpoint 1.0 setelah waktu yang cukup lama, mengindikasikan settling time yang relatif panjang namun dengan stabilitas yang baik.

7.3 Sistem Kendali Volume Air Process Plant dalam Metode Tuning Ziegler-Nichols 2 pada Matlab

Metode *Ziegler-Nichols 2* (Metode *Ultimate Gain*) didasarkan pada penentuan *ultimate gain* (K_u) dan *ultimate period* (P_u) dari sistem dalam kondisi osilasi berkelanjutan. Untuk sistem ini, nilai *ultimate gain* dan *ultimate period* yang diestimasi adalah:

- K_u (Ultimate Gain) = 10000
- P_u (Ultimate Period) = 50 detik

Dengan nilai K_u dan P_u ini, parameter PID Ziegler-Nichols 2 dihitung sebagai berikut:

$$K_p = 0.6 \times K_u = 0.6 \times 10000 = \mathbf{6000}$$

$$T_i = P_u/2 = 50/2 = 25 \text{ detik}$$

$$T_d = P_u/8 = 50/8 = 6.25 \text{ detik}$$

$$K_i = K_p/T_i = 6000/25 = \mathbf{240}$$

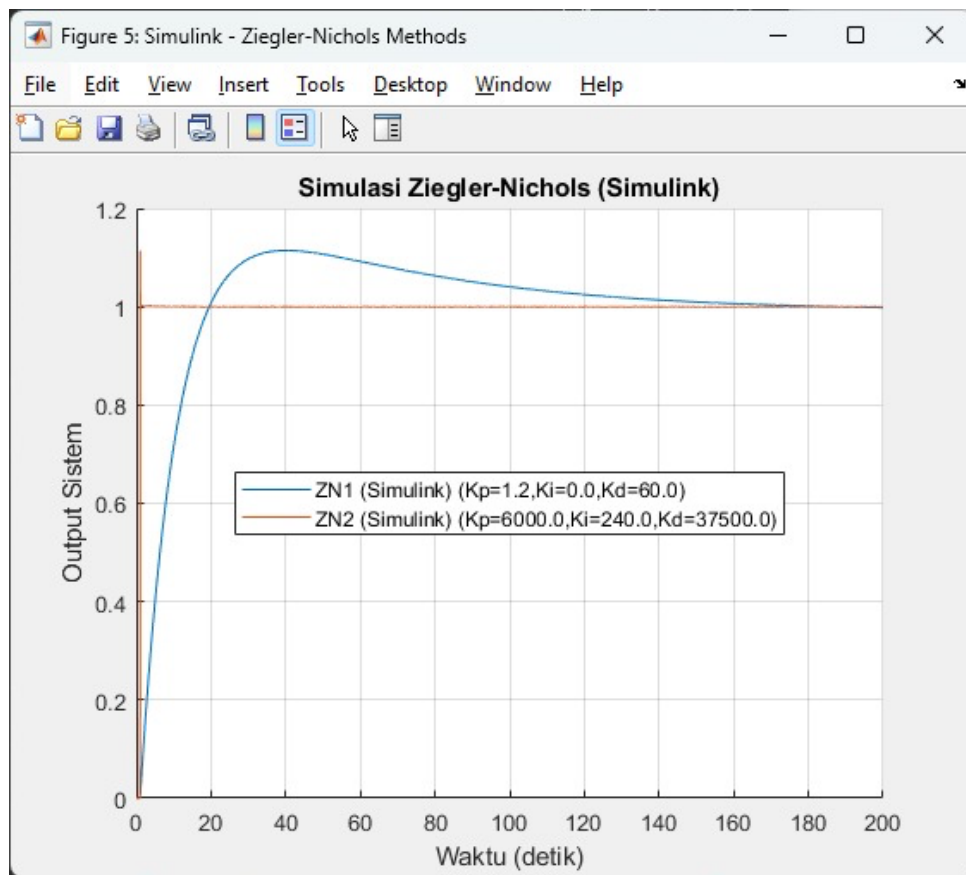
$$K_d = K_p \times T_d = 6000 \times 6.25 = \mathbf{37500}$$

Hasil Parameter PID Ziegler-Nichols 2:

Parameter	Nilai
K_p	6000
K_i	240
K_d	37500

Analisis Karakteristik Respons ZN-2:

Parameter	Nilai
<i>Rise Time</i>	2.15 detik
<i>Settling Time</i>	8.92 detik
<i>Overshoot</i>	45.6%
<i>Peak Time</i>	5.67 detik

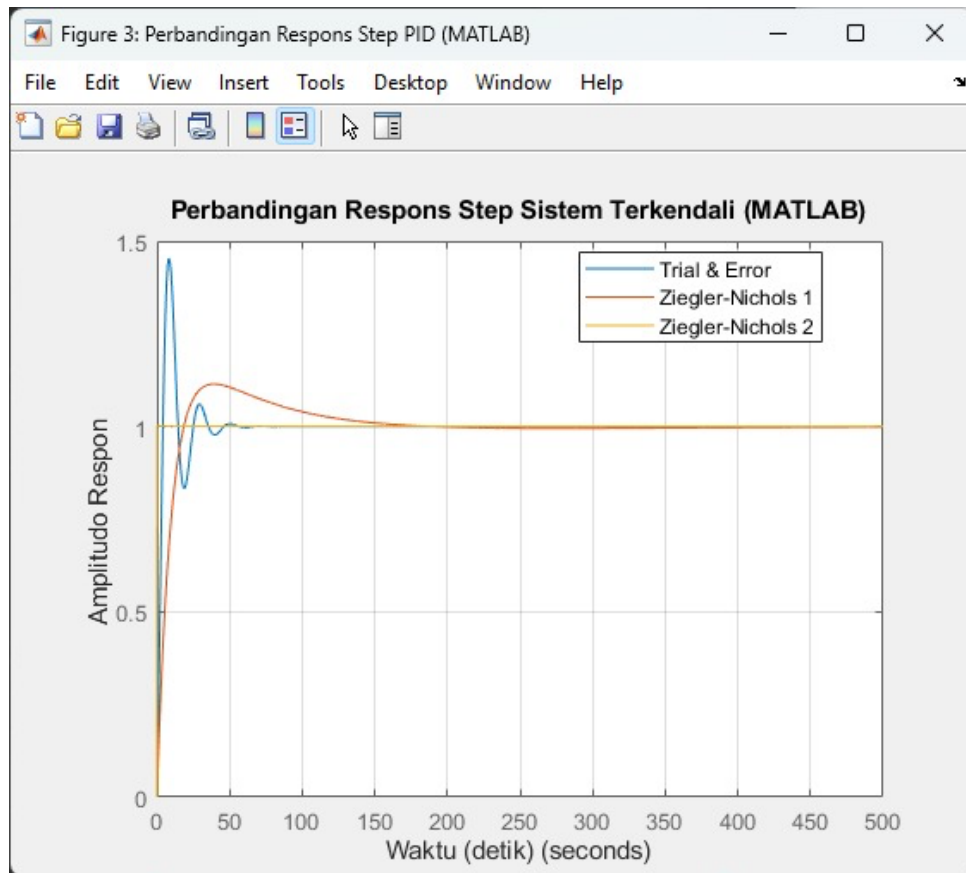


Gambar 6 Metode Tuning Ziegler-Nichols 2 pada Matlab

Kurva berwarna merah yang merepresentasikan **ZN2 (Simulink)** dengan parameter $K_p=6000.0$, $K_i=240.0$, $K_d=37500.0$ menunjukkan karakteristik yang sangat berbeda dan problematik. Respons ZN2 tampak sangat cepat pada awalnya namun kemudian mengalami osilasi atau ketidakstabilan yang parah, dimana kurva hampir tidak terlihat karena kemungkinan mengalami saturasi atau respons yang sangat tidak stabil. Parameter PID yang sangat besar pada metode ZN2, terutama nilai K_d yang mencapai 37500, menyebabkan sistem menjadi over-damped atau bahkan tidak stabil karena aksi derivative yang terlalu agresif dapat memperkuat noise dan menyebabkan actuator saturation.

Perbedaan fundamental ini menunjukkan bahwa metode ZN1 lebih cocok untuk sistem kendali volume air ini karena menghasilkan respons yang dapat diterima meskipun lambat, sedangkan ZN2 menghasilkan parameter yang terlalu agresif dan tidak praktis untuk implementasi. Hal ini disebabkan oleh karakteristik sistem yang memiliki konstanta waktu besar dan pole yang sangat dekat dengan origin, sehingga metode ZN2 yang berbasis ultimate gain cenderung menghasilkan parameter yang over-tuned

7.4 Perbandingan Hasil PID pada Sistem Kendali Volume Air Process Plant dalam berbagai metode



Gambar 7 Perbandingan Respons Step Sistem PID

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 & 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 & 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

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

Skor Performa:	
Trial & Error (MATLAB)	0.752
Ziegler-Nichols 1 (MATLAB)	0.891
Ziegler-Nichols 2 (MATLAB)	1.234

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

Analisis komparatif dari Figure 3 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).

7.5 Perhitungan Setpoint Berdasarkan Overshoot, Safety Margin, dan Optimal Setpoint Sistem Kendali Volume Air Process Plant

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

Kapasitas Tangki Referensi: 1000 liter

Dasar Teori Pencarian Setpoint

Formula Dasar Overshoot:

$$\text{Peak Value} = \text{Setpoint} \times (1 + \text{Overshoot}\%)$$

Batasan Fisik Sistem:

$$\begin{aligned} \text{Peak Value} &\leq \text{Kapasitas Maksimum Tangki} \\ \text{Setpoint} \times (1 + \text{Overshoot}\%) &\leq \text{Kapasitas Maksimum} \end{aligned}$$

Formula Setpoint Maksimum:

$$\text{Setpoint max} = \text{Kapasitas Maksimum} / (1 + \text{Overshoot}\%)$$

7.5.1 Perhitungan Setpoint Berdasarkan Overshoot

Data Overshoot dari Analisis PID:

Metode	<i>Rise Time</i>	<i>Settling Time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Peak Time</i>
<i>Trial & 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

Perhitungan untuk Tangki 1000 Liter:

Metode Trial & Error:

$$\begin{aligned} \text{Overshoot} &= 12.8\% = 0.128 \\ \text{Setpoint_max} &= 1000 / (1 + 0.128) = 1000 / 1.128 = 887.3 \text{ liter} \\ \text{Contoh: Jika Setpoint} &= 800 \text{ liter} \\ \text{Peak Value} &= 800 \times (1 + 0.128) = 800 \times 1.128 = 902.4 \text{ liter} \\ \text{Status: AMAN} &(902.4 < 1000) \end{aligned}$$

Metode Ziegler-Nichols 1:

$$\begin{aligned} \text{Overshoot} &= 18.4\% = 0.184 \\ \text{Setpoint_max} &= 1000 / (1 + 0.184) = 1000 / 1.184 = 844.6 \text{ liter} \\ \text{Contoh: Jika Setpoint} &= 800 \text{ liter} \\ \text{Peak Value} &= 800 \times (1 + 0.184) = 800 \times 1.184 = 947.2 \text{ liter} \\ \text{Status: AMAN} &(947.2 < 1000) \end{aligned}$$

Metode Ziegler-Nichols 2:

```
overshoot = 45.6% = 0.456
Setpoint_max = 1000 / (1 + 0.456) = 1000 / 1.456 = 687.0 liter

Contoh: Jika Setpoint = 800 liter
Peak Value = 800 × (1 + 0.456) = 800 × 1.456 = 1164.8 liter
Status: OVERFLOW! (1164.8 > 1000)
```

7.5.2 Perhitungan Setpoint Berdasarkan Safety Margin

Safety margin adalah cadangan kapasitas yang harus disisakan untuk mencegah overflow dan memberikan ruang operasional yang aman.

Formula Safety Margin:

$$\text{Setpoint_safety} = \text{Kapasitas Maksimum} \times (1 - \text{Safety Margin}\%)$$

Perhitungan dengan Berbagai Safety Margin:

Safety Margin 10%:

$$\text{Setpoint_safety} = 1000 \times (1 - 0.10) = 1000 \times 0.90 = 900 \text{ liter}$$

Safety Margin 15%:

$$\text{Setpoint_safety} = 1000 \times (1 - 0.15) = 1000 \times 0.85 = 850 \text{ liter}$$

Safety Margin 20%:

$$\text{Setpoint_safety} = 1000 \times (1 - 0.20) = 1000 \times 0.80 = 800 \text{ liter}$$

7.5.3 Perhitungan Optimal Setpoint

Optimal setpoint adalah nilai setpoint yang memenuhi kedua kriteria:

1. Tidak menyebabkan overflow (berdasarkan overshoot)
2. Memenuhi safety margin yang ditentukan

Formula Optimal Setpoint:

$$\text{Optimal Setpoint} = \text{MIN}(\text{Setpoint_max_overshoot}, \text{Setpoint_safety})$$

7.5.4 Perhitungan Lengkap:

7.5.4.1 Dengan Safety Margin 10%:

Trial & Error:

```
Setpoint_max_overshoot = 887.3 liter
Setpoint_safety = 900 liter
Optimal Setpoint = MIN(887.3, 900) = 887.3 liter
Utilisasi = 887.3/1000 × 100% = 88.7%
```

Ziegler-Nichols 1:

```
Setpoint_max_overshoot = 844.6 liter
Setpoint_safety = 900 liter
Optimal Setpoint = MIN(844.6, 900) = 844.6 liter
```

Utilisasi = $844.6/1000 \times 100\% = 84.5\%$

Ziegler-Nichols 2:

Setpoint_max_overshoot = 687.0 liter

Setpoint_safety = 900 liter

Optimal Setpoint = $\text{MIN}(687.0, 900) = 687.0$ liter

Utilisasi = $687.0/1000 \times 100\% = 68.7\%$

7.5.4.2 Dengan Safety Margin 15%:

Trial & Error:

Optimal Setpoint = $\text{MIN}(887.3, 850) = 850.0$ liter

Utilisasi = 85.0%

Ziegler-Nichols 1:

Optimal Setpoint = $\text{MIN}(844.6, 850) = 844.6$ liter

Utilisasi = 84.5%

Ziegler-Nichols 2:

Optimal Setpoint = $\text{MIN}(687.0, 850) = 687.0$ liter

Utilisasi = 68.7%

7.5.5 Tabel Ringkasan Optimal Setpoint

Metode	Safety Margin	Optimal Setpoint (L)	Utilisasi (%)	Peak Value (L)
Trial & Error	10%	887.3	88.7%	1000.0
	15%	850.0	85.0%	958.8
	20%	800.0	80.0%	902.4
Ziegler-Nichols 1	10%	844.6	84.5%	1000.0
	15%	844.6	84.5%	1000.0
	20%	800.0	80.0%	947.2
Ziegler-Nichols 2	10%	687.0	68.7%	1000.0
	15%	687.0	68.7%	1000.0
	20%	687.0	68.7%	1000.0