

Tuning PID untuk Robustness terhadap Noise dalam Sistem Kendali Posisi Sudut Motor DC

Arga Dwi Pambudi^{1*}, M Ary Heryanto¹, Sari Ayu Wulandari²

¹ Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Dian Nuswantoro, Semarang, INDONESIA

² Teknik Biomedis, Fakultas Teknik, Universitas Dian Nuswantoro, Semarang, INDONESIA

*Corresponding Author email : arga.dwi.pambudi@dsn.dinus.ac.id

Abstract

DC motor position control often encounters challenges related to noise interference, which can degrade system performance in industrial applications. This study evaluates the performance of PID controllers using tuning approaches based on Ziegler-Nichols and Cohen-Coon methods and develops an iterative tuning method based on system response evaluation to enhance robustness. Simulations were conducted in MATLAB/Simulink, integrating White Gaussian Noise and Sinusoidal Noise to test the system's resilience. Initial results showed that Ziegler-Nichols achieved the fastest rise time (0.006 s) but with a high overshoot (61.78%). Meanwhile, the Cohen-Coon method demonstrated lower overshoot (32.49%) but became unstable under noisy conditions. To address these weaknesses, parameter refinement for K_p , K_i , and K_d was performed using a trial-and-error approach. Final results indicated that the combination of $K_p=25$, $K_i=100$, and $K_d=0.6$ reduced the overshoot to 4.74%, settling time to 0.759 s, and maintained a low steady-state error (1.5%). This study highlights that the trial-and-error approach can enhance system robustness against noise while providing a practical solution for DC motor control systems in real-world applications.

Keywords: Motor DC; PID; Tuning Trial and Error; Robustness; Noise.

1. Pendahuluan

Motor DC merupakan salah satu komponen utama dalam sistem aktuator yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti robotika, otomasi industri, kontrol gerak, dan sistem servo. Kemampuan motor DC untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanis secara efisien menjadikannya pilihan utama dalam pengendalian gerakan presisi tinggi [1]. Dalam banyak aplikasi, pengendalian posisi motor DC menjadi tantangan utama, terutama karena adanya dinamika non-linear, pengaruh inersia, redaman, dan noise eksternal yang dapat memengaruhi performa sistem [2,3]. Pengendalian posisi motor DC sering menghadapi tantangan yang dapat mengurangi performa sistem dalam aplikasi industri. Salah satu metode yang banyak digunakan dalam pengendalian posisi adalah kontroler proporsional-integral-derivatif (PID). Kontrol PID menawarkan fleksibilitas dan efektivitas dalam mengatur respon sistem dengan menyesuaikan parameter proporsional, integral, dan derivatif [4]. Penelitian menunjukkan bahwa tuning parameter PID yang tepat dapat mengurangi overshoot, mempercepat settling time, dan meminimalkan error steady-state, sehingga meningkatkan performa sistem secara keseluruhan [5,6]. Namun, efektivitas kontrol PID sangat bergantung pada pemilihan parameter yang tepat, yang menjadikan metode tuning PID sebagai aspek penting dalam mencapai performa optimal.

Dalam penelitian sebelumnya, metode tuning PID seperti Ziegler-Nichols dan Cohen-Coon telah banyak digunakan untuk meningkatkan performa sistem kendali motor DC. Metode Ziegler-Nichols menawarkan pendekatan yang cepat dan sederhana dengan mengandalkan eksperimen osilasi kritis untuk menentukan parameter PID. Sementara itu, metode Cohen-

Coon memanfaatkan respon langkah sistem untuk menghasilkan parameter yang lebih stabil pada sistem linier. Namun, kedua metode ini memiliki keterbatasan dalam menangani noise, karena mereka dirancang berdasarkan asumsi sistem ideal tanpa memperhitungkan dinamika kompleks dari noise lingkungan [6-8]. Penelitian yang relevan lainnya, seperti yang dilakukan oleh Hammoodi et al. (2020), menggunakan Simulink untuk memodelkan pengendali PID pada motor DC dengan tujuan menjaga kecepatan motor tetap konstan meskipun terjadi variasi beban [1]. Meskipun metode tuning konvensional memberikan hasil yang memadai pada sistem ideal, penelitian ini berfokus pada mengatasi kelemahan metode tersebut dalam kondisi dengan noise yang signifikan. Sebagai respon terhadap keterbatasan tersebut, penelitian ini menawarkan pendekatan tuning PID berbasis trial-and-error untuk menyempurnakan parameter kontroler. Metode ini bertujuan untuk meningkatkan robustness sistem terhadap noise dengan cara yang lebih spesifik dan fleksibel. Selain itu, penelitian ini mengintegrasikan simulasi noise yang lebih kompleks, termasuk White Gaussian Noise dan Sinusoidal Noise, untuk mencerminkan kondisi dunia nyata dengan lebih akurat. Pendekatan ini berbeda dengan penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Hudati et al. (2021), yang hanya berfokus pada noise level dasar tanpa mempertimbangkan variasi noise yang lebih realistis [4]. Dengan mengatasi kelemahan metode tuning sebelumnya, pendekatan ini diharapkan tidak hanya meningkatkan robustness, tetapi juga memberikan solusi praktis untuk aplikasi dunia nyata.

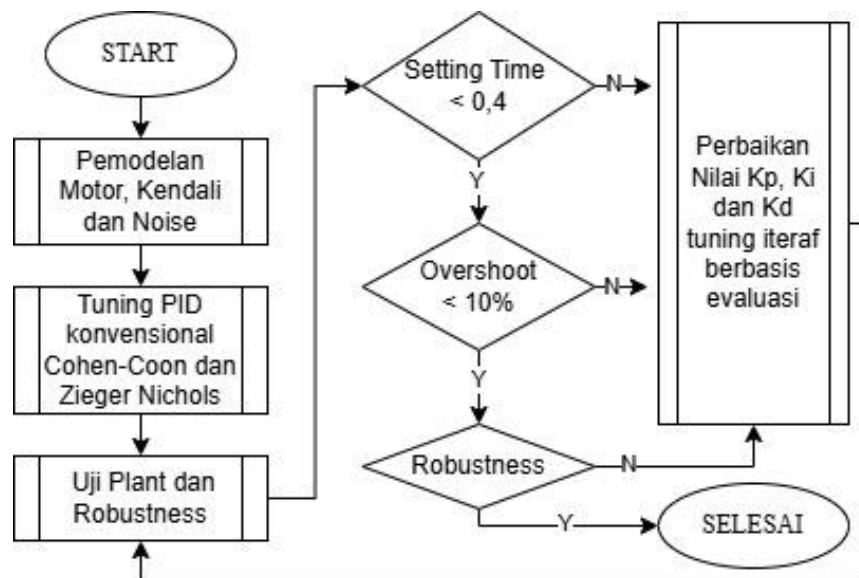
Kebaruan utama dari penelitian ini adalah pengembangan parameter PID secara iteratif melalui trial-and-error yang mengatasi kekurangan dari metode Ziegler-Nichols dan Cohen-Coon, terutama dalam kondisi noise tinggi. Selain itu, simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa tuning iteratif dapat menurunkan overshoot secara signifikan dan meningkatkan settling time tanpa mengorbankan stabilitas. Penelitian ini memberikan kontribusi praktis bagi aplikasi sistem kendali presisi tinggi, seperti robotika dan otomasi industri, di mana keberhasilan sistem sangat tergantung pada kemampuan mengatasi noise. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi untuk pengembangan kontrol motor DC di berbagai sektor industri. Untuk mendukung proses tuning ini, representasi matematis yang akurat dari karakteristik kelistrikan dan mekanis motor DC digunakan sebagai dasar simulasi dan analisis. Model matematis motor DC yang digunakan mencakup karakteristik kelistrikan dan mekanis untuk merepresentasikan dinamika sistem secara akurat. Studi sebelumnya telah membahas metode tuning PID untuk kontrol kecepatan motor DC serta mengembangkan model matematis dan simulasi komputer untuk motor DC eksitasi terpisah [9-11]. Penelitian ini difokuskan pada tuning parameter PID untuk meningkatkan performa sistem, dengan menganalisis dampaknya terhadap karakteristik respon seperti overshoot, rise time, dan steady-state error. Selain itu, sistem diuji dalam kondisi noise untuk mengevaluasi robustnya kontrol PID. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan lebih lanjut untuk aplikasi nyata, seperti sistem servo presisi tinggi dan kontrol gerak robotik [12,13]. Hasil simulasi menunjukkan pengaruh tuning parameter terhadap respon sistem, yang akan diuraikan secara mendetail pada bagian hasil dan pembahasan.

2. Metode

Gambar 1 menyajikan alur metode penelitian yang dimulai dengan pemodelan matematis motor DC untuk merepresentasikan karakteristik kelistrikan dan mekanisnya secara akurat. Pemodelan ini bertujuan untuk memprediksi respon sistem terhadap sinyal kendali serta mengidentifikasi parameter-parameter utama yang memengaruhi performa, seperti momen inersia, redaman mekanis, dan konstanta torsi. Setelah pemodelan selesai, pengendali PID diimplementasikan menggunakan fungsi matematis yang mengintegrasikan

komponen proporsional, integral, dan derivatif. Proses ini bertujuan untuk meminimalkan error antara posisi target dan posisi aktual motor, sehingga menghasilkan kontrol yang presisi dan stabil. Tahap berikutnya adalah proses tuning parameter PID menggunakan metode klasik, yaitu Ziegler-Nichols dan Cohen-Coon, untuk mengevaluasi performa awal sistem.

Parameter hasil tuning ini kemudian dianalisis dalam kondisi tanpa noise dan dengan noise yang telah dimodelkan secara komprehensif, meliputi White Gaussian Noise (WGN) dan Sinusoidal Noise. Simulasi ini dilakukan di MATLAB/Simulink untuk menguji kemampuan sistem dalam mempertahankan stabilitas dan ketepatan di bawah pengaruh noise. Sebagai langkah terakhir, parameter PID disempurnakan melalui pendekatan trial-and-error berbasis evaluasi iteratif terhadap respon sistem. Pendekatan ini bertujuan untuk mengatasi kelemahan metode tuning klasik, seperti overshoot yang tinggi dan ketidakstabilan dalam kondisi noise, dengan fokus pada peningkatan robustness sistem. Hasil akhir dari simulasi mencakup analisis overshoot, rise time, dan steady-state error, yang menjadi dasar untuk mengukur keberhasilan tuning PID dalam aplikasi dunia nyata.



Gambar 1: Metode Penelitian

2.1 Pemodelan Motor DC

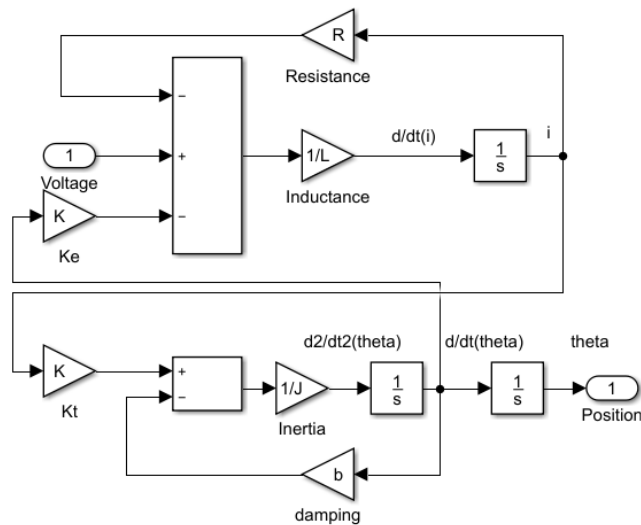
Pemodelan motor DC terdiri dari dua aspek utama: dinamika kelistrikan dan dinamika mekanis, yang saling terhubung untuk menghasilkan posisi sudut rotor (θ). Pendekatan ini digunakan secara luas dalam sistem kendali posisi motor DC, termasuk pada implementasi model [11]. Persamaan 1 menyatakan hubungan kelistrikan pada motor DC didasarkan pada hukum Kirchhoff.

$$L \frac{di}{dt} = V - R \cdot i - K_e \cdot \omega \quad (1)$$

Dalam persamaan 1, menunjukkan bahwa perubahan arus dalam armatur dipengaruhi oleh tegangan input, resistansi, dan kecepatan sudut rotor. Model ini digunakan untuk memprediksi respon arus listrik armatur terhadap perubahan tegangan input dan kecepatan rotor [4,14]. Dinamika mekanis rotor motor DC didasarkan pada hukum Newton untuk rotasi, yang dirumuskan dalam persamaan 2 sebagai berikut:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = K_t \cdot i - b \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa percepatan sudut tergantung pada torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh arus listrik armatur dan redaman akibat friksi mekanis. Hubungan ini sering digunakan dalam sistem kendali kecepatan atau posisi motor [15]. Dengan menggabungkan persamaan kelistrikan dan mekanis, telah diperoleh model dinamis yang lengkap. Gabungan ini menghubungkan arus listrik (i) dari model kelistrikan ke torsi elektromagnetik (τ) yang memengaruhi dinamika mekanis. Diagram blok Simulink (Gambar 2) menunjukkan bagaimana model ini diimplementasikan dengan blok-blok fungsional, termasuk gain, integrator, dan feedback loop untuk kecepatan sudut (ω).



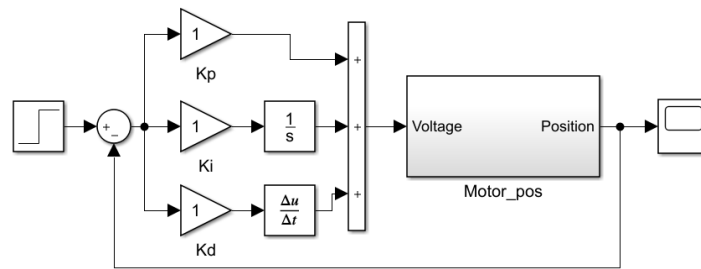
Gambar 2: Diagram Simulink DC Motor.

2.2 Pemodelan Motor PID

Pengendali PID digunakan untuk mengatur posisi motor DC dengan menjaga agar error antara posisi target dan posisi aktual diminimalkan. Fungsi matematis pengendali PID mencakup komponen Proportional, Integral, dan Derivative yang digunakan secara simultan untuk mencapai performa optimal [16,17]. Implementasi PID untuk motor DC dalam simulasi MATLAB/Simulink ditunjukkan melalui fungsi matematis dan diagram Simulink. Persamaan pengendali PID dinyatakan pada persamaan 3:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

Dalam persamaan 3, kontrol PID, $u(t)$ merepresen-tasikan sinyal kendali yang dihasilkan untuk mengatur sistem. Nilai $e(t)$ adalah error, yaitu selisih antara nilai referensi $r(t)$ dan output aktual $y(t)$. Parameter kontrol K_p , K_i , dan K_d masing-masing merupakan konstanta proporsional, integral, dan derivatif, yang bekerja secara simultan untuk mencapai performa optimal dalam pengendalian sistem. Kombinasi ketiga konstanta ini memungkinkan pengendali PID untuk meminimalkan error, mengurangi overshoot, dan meningkatkan stabilitas sistem secara keseluruhan. Gabungan pengendali PID ini digunakan untuk menghasilkan sinyal kendali yang diberikan pada motor [17]. Diagram Simulink pada Gambar 3 menunjukkan implementasi pengendali PID..



Gambar 3: Diagram Simulink PID untuk pengaturan posisi motor DC.

2.3 Pemodelan Noise

Untuk mengevaluasi robustness kontrol PID pada sistem motor DC, berbagai jenis *noise* dimodelkan dan ditambahkan ke dalam simulasi. *Noise* pertama adalah *White Gaussian Noise* (WGN), yang dimodelkan menggunakan distribusi Gaussian dengan mean $\mu=0$ dan standar deviasi σ . *Noise* ini dinyatakan melalui persamaan 4 sebagai berikut:

$$N_{WGN}(t) = \sigma \cdot \text{rand}() \quad (4)$$

di mana $\text{randn}()$ menghasilkan angka acak dengan distribusi Gaussian [18,19]. *Noise* jenis ini penting untuk mensimulasikan kondisi kerja sistem kontrol di lingkungan nyata. Jenis *noise* kedua adalah *Sinusoidal Noise*, yang digunakan untuk mengevaluasi stabilitas sistem di bawah keadaan osilasi [20,21]. *Noise* ini dimodelkan menggunakan persamaan 5:

$$N_{sin}(t) = A \cdot \sin(2\pi f t + \phi) \quad (5)$$

Terakhir, *Transient Noise* dimodelkan untuk mensimulasikan *noise eksternal*, seperti *switching* beban atau interferensi elektromagnetik [22,23]. *Noise* ini direpresentasikan melalui fungsi delta (δ) sesuai persamaan 6:

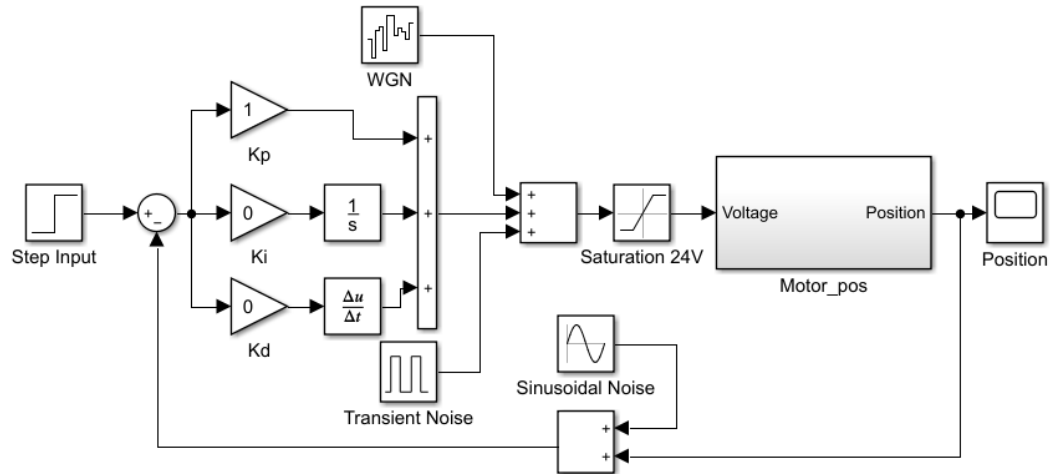
$$N_{transient}(t) = \Delta V \cdot \delta(t - t_{transient}) \quad (6)$$

Noise ini digunakan untuk mengevaluasi bagaimana sistem kontrol merespon terhadap *noise* mendadak yang sering muncul dalam aplikasi nyata.

2.4 Pemodelan Sistem

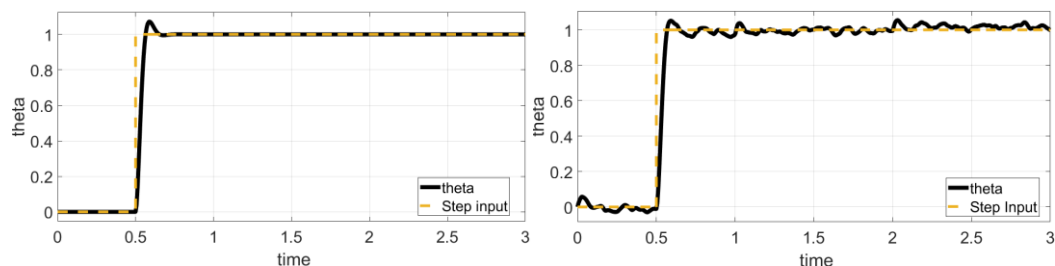
Implementasi sistem kontrol posisi motor DC menggunakan pengendali PID (Proportional-Integral-Derivative) ditunjukkan pada Gambar 4. Sistem ini dirancang untuk mengatur tegangan input berdasarkan error antara posisi target dan posisi aktual motor. Parameter PID, yaitu K_p , K_i , dan K_d , diatur untuk mencapai performa optimal, termasuk mengurangi overshoot, mempercepat settling time, dan meminimalkan error steady-state [24,25]. Blok PID menghasilkan sinyal kendali yang kemudian diterapkan pada motor melalui jalur kontrol utama. Berbagai jenis *noise* ditambahkan untuk mengevaluasi robustnya sistem kontrol terhadap *noise*. *White Gaussian Noise* (WGN) mensimulasikan *noise* acak dalam lingkungan elektronik, yang sering kali muncul karena interferensi atau variasi sinyal [26]. *Sinusoidal Noise* mensimulasikan *noise* periodik yang dapat terjadi akibat variasi beban dinamis atau osilasi mekanis, yang memengaruhi kestabilan sistem [27]. *Transient Noise* ditambahkan untuk menguji ketahanan sistem terhadap lonjakan tegangan tiba-tiba, yang sering kali terjadi akibat *switching* beban atau *noise eksternal* lainnya [28]. Blok *noise* terintegrasi ke jalur sinyal untuk menciptakan simulasi kondisi kerja yang mendekati situasi dunia nyata. Motor DC dimodelkan sebagai sistem dinamis yang mengonversi

tegangan input menjadi posisi rotor. Feedback loop digunakan untuk mengukur posisi aktual motor, yang kemudian dibandingkan dengan posisi target untuk menghasilkan sinyal error. Sinyal error ini menjadi input bagi pengendali PID untuk menghasilkan sinyal kendali yang tepat. Dengan pendekatan ini, sistem mampu menunjukkan respon yang stabil dan akurat dalam berbagai kondisi noise [6,7]. Parameter utama, seperti momen inersia rotor ($J=3.2284 \times 10^{-6}$ kg.m²), redaman mekanis ($b=3.5077 \times 10^{-7}$ Nms), konstanta gaya elektromotif ($K_e=0.0274$ V/rad/sec), konstanta torsi motor ($K_t=0.0274$ Nm/Amp), resistansi listrik ($R=4$ ohm) dan induktansi listrik ($L=2.75 \times 10^{-6}$ H) diatur berdasarkan spesifikasi teknis motor DC yang digunakan [11]. Hasil simulasi dianalisis menggunakan grafik overshoot, settling time, dan steady-state error.



Gambar 4: Diagram Simulink Sistem

Pada simulasi awal, sistem diuji tanpa menggunakan pengendali PID, sehingga respon sistem sepenuhnya bergantung pada nilai error yang dihitung secara langsung. Gambar 4 menunjukkan respon sistem dengan kontrol umpan balik langsung (direct feedback control), di mana sinyal kendali hanya dihasilkan berdasarkan nilai error tanpa adanya pengendali tambahan seperti PID [29]. Dalam konfigurasi ini, posisi motor diatur dengan membandingkan posisi aktual terhadap posisi target, dan sinyal kendali secara langsung dihasilkan dari nilai error tersebut [30]. Pendekatan ini menghasilkan respon yang tidak stabil, sebagaimana ditunjukkan oleh osilasi yang signifikan ketika terdapat noise. Hal ini terjadi karena tidak ada mekanisme yang mampu mengurangi error secara terintegrasi atau meredam perubahan mendadak dalam sistem. Grafik ini digunakan untuk menunjukkan baseline performa sistem sebelum dilakukan optimasi lebih lanjut menggunakan pengendali PID. Hasil ini memberikan gambaran awal penting untuk memahami bagaimana pengendali PID dapat meningkatkan stabilitas dan kecepatan respon sistem.



Gambar 2: Respon sistem dengan kontrol umpan balik langsung (a) tanpa noise (b) dengan noise

3. Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini, hasil simulasi pengendalian motor DC dengan menggunakan pengendali PID akan dianalisis secara mendalam. Fokus utama adalah membandingkan performa sistem sebelum dan sesudah tuning PID, serta mengevaluasi pengaruh metode tuning yang digunakan, diantaranya Ziegler-Nichols dan Cohen-Coon. Masing-masing metode memiliki pendekatan berbeda dalam menentukan parameter PID (K_p , K_i , K_d) untuk mencapai respon sistem yang optimal. Selain itu, dilakukan juga evaluasi robustness sistem terhadap noise untuk mengukur kemampuan sistem dalam menghadapi kondisi eksternal yang dinamis.

3.1 Ziegler-Nichols

Metode tuning Ziegler-Nichols merupakan salah satu teknik tuning PID klasik yang didasarkan pada eksperimen osilasi kritis. Pendekatan ini sangat populer karena sederhana dan cocok untuk sistem dengan karakteristik respon linier. Proses tuning dimulai dengan menonaktifkan komponen integral ($K_i=0$) dan derivatif ($K_d=0$), sehingga sistem hanya bergantung pada komponen proporsional (K_p). Nilai K_p secara bertahap ditingkatkan hingga sistem mencapai kondisi osilasi stabil, yaitu kondisi di mana sistem berosilasi tanpa meredam. Namun, jika sistem tidak menunjukkan osilasi stabil, nilai K_p dapat terus dinaikkan secara bertahap hingga diperoleh respon dengan overshoot maksimum, yang digunakan sebagai alternatif untuk menentukan K_p kritis [29]. Tabel 1 menunjukkan overshoot maksimum yang tercapai pada nilai $K_p = 30$.

Tabel 1: Penerapan Metode Tuning Ziegler-Nichols

K_p	$\theta_{max} \text{ (rad)}$	$\theta_{target} \text{ (rad)}$	Overshoot (%)
5	1,389	1	38,9
10	1,521	1	52,1
15	1,589	1	58,9
20	1,634	1	63,4
25	1,665	1	66,5
30	1,675	1	67,5
35	1,670	1	67
40	1,662	1	66,2

Nilai K_p kritis (K_u) = 30 dan periode osilasi kritis (T_u) = 25 ms dicatat. Parameter PID kemudian dihitung berdasarkan formula Ziegler-Nichols:

$$K_p = 0.6 \cdot K_u = 0.6 \cdot 30 = 18 \quad (7)$$

$$K_i = \frac{2 \cdot K_p}{T_u} = \frac{2 \cdot 18}{0.025} = 1440 \quad (8)$$

$$K_d = \frac{K_p \cdot T_u}{8} = \frac{18 \cdot 0.025}{8} = 0.05625 \quad (9)$$

3.2 Cohen-Coon

Tuning Cohen-Coon digunakan untuk menghitung parameter PID berdasarkan tanggapan langkah sistem dimana dalam kasus ini tanpa steady-state karena respon sistem akan terus naik ketika diberi tegangan. Dengan input step sebesar 2V, sistem menghasilkan slope sebesar 71.654 θ/s , delay time (t_d) sebesar 0.5 s, dan konstanta time (T) sebesar 1 s. Berdasarkan perhitungan, parameter kontrol diperoleh sebagai berikut:

$$Kp = \frac{1}{K} \cdot \left(1.35 + \frac{td}{T} \right) = 0.05166 \quad (10)$$

$$Ki = \frac{Kp}{2.5 \cdot T} = 0.02066 \quad (11)$$

$$Kd = 0.37 \cdot Kp \cdot T = 0.01912 \quad (12)$$

3.3 Robustness Terhadap Noise

Tabel 2 menyajikan evaluasi performa tiga metode tuning PID, yaitu Direct Feedback, Ziegler-Nichols, dan Cohen-Coon, pada plant yang diuji dalam dua kondisi: tanpa noise dan dengan noise. Pada kondisi tanpa noise, Ziegler-Nichols menunjukkan rise time dan settling time tercepat, meskipun memiliki overshoot tinggi sebesar 64,75%.

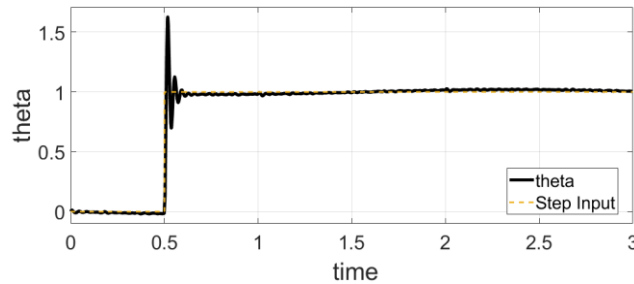
Tabel 2: Evaluasi Performa Metode Tuning PID pada Plant Dengan dan Tanpa Noise

<i>Pendekatan Kendali</i>	<i>Rise Time (s)</i>	<i>Settling Time (s)</i>	<i>Over-shoot (%)</i>	<i>Steady State Error (%)</i>
Tanpa Noise				
Direct Feedback	0.042	0.130	7.16	2
Ziegler-Nichols	0.006	0.097	64.75	2
Cohen-Coon	1.356	10.739	32.49	2
Dengan Noise				
Direct Feedback	0.044	∞	5.63	-
Ziegler-Nichols	0.006	1,508	61.78	2.7
Cohen-Coon	0.977	∞	24.08	-

Cohen-Coon menunjukkan overshoot yang lebih rendah (32,49%) tetapi dengan rise time dan settling time yang jauh lebih lama. Ketika noise ditambahkan, hanya metode Ziegler-Nichols yang mampu menjaga stabilitas sistem, meskipun overshootnya masih sangat tinggi (61,78%). Sementara itu, metode Direct Feedback dan Cohen-Coon tidak mencapai kondisi stabil dalam pengaruh noise, yang ditunjukkan oleh tanda " ∞ " pada settling time. Penting untuk dicatat bahwa hasil ini bergantung pada karakteristik plant yang diuji, dan performa metode tuning ini mungkin berbeda jika diterapkan pada plant lain dengan dinamika yang berbeda. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa Ziegler-Nichols adalah metode tuning paling stabil untuk plant yang diuji dalam kondisi noise, meskipun memiliki kelemahan berupa overshoot yang tinggi (61,78%). Direct Feedback dan Cohen-Coon menunjukkan performa yang baik pada kondisi tanpa noise tetapi menjadi tidak stabil ketika noise ditambahkan. Untuk mengatasi kelemahan overshoot pada Ziegler-Nichols, diperlukan tuning trial and error lebih lanjut dengan penyesuaian parameter Kp, Ki, dan Kd secara iteratif untuk menurunkan overshoot tanpa mengorbankan stabilitas dan rise time.

3.4 Peningkatan Performa Hasil Tuning Ziegler-Nichols

Performa dengan tuning ziegler nichols, Meskipun sistem stabil dan mencapai steady-state dengan settling time 1,508 s, overshoot yang tinggi dapat menimbulkan risiko dalam aplikasi yang membutuhkan kontrol presisi ditunjukkan pada Gambar 6.



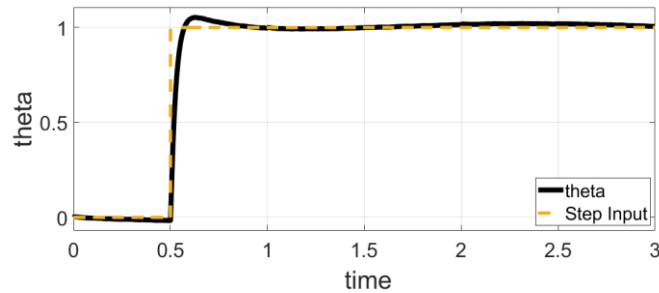
Gambar 3: Hasil respon sistem menggunakan metode tuning ziegler-nichols

Pada tahap awal tuning berbasis Ziegler-Nichols, dilakukan penyesuaian terhadap parameter K_i yang awalnya memiliki nilai sangat besar. Nilai K_i yang besar muncul karena hasil perhitungan Ziegler-Nichols menggunakan formula standar yang bersifat umum, yang sering kali tidak mempertimbangkan karakteristik spesifik dari plant. Dalam kasus ini, nilai K_i yang besar menyebabkan integrator dalam kontrol PID memberikan respon yang terlalu agresif terhadap error, yang terlihat pada osilasi besar dan overshoot signifikan pada Gambar 5. Untuk mengatasi kelemahan ini, dilakukan penyesuaian trial and error terhadap parameter K_p , K_i , dan K_d . Penyesuaian ini dilakukan secara iteratif hingga mencapai parameter yang menghasilkan performa sistem yang lebih baik. Hasil tuning trial and error berbasis Ziegler-Nichols ini dirangkum dalam Tabel 3.

Tabel 3: Tuning Trial and Error untuk peningkatan performa PID

<i>Gain PID (K_p, K_i, K_d)</i>	<i>Rise Time (s)</i>	<i>Settling Time (s)</i>	<i>Over- shoot (%)</i>	<i>Steady State Error (%)</i>
18, 1440, 0.056	0.006	1.508	61.78	2.7
18, 100, 0.056	0.008	1.511	20.97	2.3
18, 100, 0.08	0.009	1.510	11.52	2,2
18, 100, 0.09	0.010	1.509	8.6	1.6
18, 100, 0.12	0.012	0.675	3.4	1.6
18, 100, 0.4	0.040	0.247	6.5	1.5
20, 100, 0.4	0.038	0.217	5.18	1.7
25, 100, 0.4	0.032	0.149	2.90	1.8
25, 100, 1	0.069	0.405	7.6	1.4
25, 100, 0.6	0.0457	0.259	4,74	1.5

Pada tahap awal tuning berbasis Ziegler-Nichols, nilai parameter K_i yang sangat besar (1440) menghasilkan overshoot tinggi (61,78%) dan osilasi signifikan. Untuk mengatasi hal ini, K_i dikurangi drastis menjadi 100, yang berhasil menurunkan overshoot menjadi 20,97%. Namun, settling time tetap lambat, sehingga nilai K_d ditingkatkan secara bertahap untuk meredam osilasi dan meningkatkan stabilitas. Penyesuaian ini terus dilakukan, dengan kombinasi nilai $K_p=18$, $K_i=100$, dan $K_d=0.09$ yang mampu menurunkan overshoot menjadi 8,6% tanpa memperburuk rise time.



Gambar 4: Respon sistem dengan parameter peningkatan performa PID

Pada langkah berikutnya, nilai K_p ditingkatkan menjadi 25 untuk mempercepat rise time sistem, sambil menjaga stabilitas dengan menyesuaikan K_i dan K_d . Gambar 7 memperlihatkan hasil akhir bahwa kombinasi $K_p=25$, $K_i=100$, dan $K_d=0.6$ menghasilkan overshoot minimal (4,74%) dengan settling time tercepat (0,759 s) dan steady-state error yang tetap rendah (1,5%). Langkah-langkah ini menunjukkan efektivitas tuning manual dalam mengatasi kelemahan metode Ziegler-Nichols, khususnya dalam mengurangi overshoot dan meningkatkan stabilitas sistem.

4. Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi performa metode tuning PID, yaitu Ziegler-Nichols dan Cohen-Coon, serta mengembangkan tuning trial and error untuk mengatasi kelemahan utama, terutama pada kondisi robustness terhadap noise. Hasil awal menunjukkan bahwa metode Ziegler-Nichols memberikan rise time yang sangat cepat (0,006 s), tetapi overshoot tinggi (61,78%) dan sensitivitas terhadap noise. Sebaliknya, metode Cohen-Coon menunjukkan overshoot lebih rendah tanpa noise (32,49%) tetapi menjadi tidak stabil ketika noise ditambahkan, sehingga tidak dapat digunakan untuk kondisi yang membutuhkan robustness tinggi. Melalui tuning trial and error berbasis Ziegler-Nichols, parameter kontrol K_p , K_i , dan K_d disesuaikan secara iteratif untuk menurunkan overshoot dan meningkatkan stabilitas. Kombinasi optimal $K_p=25$, $K_i=100$, dan $K_d=0.6$ berhasil menurunkan overshoot menjadi 4,74%, dengan settling time sebesar 0,759 s dan steady-state error sebesar 1,5%.

Implikasi penelitian ini menunjukkan bahwa tuning trial and error berbasis Ziegler-Nichols lebih cocok untuk plant yang membutuhkan robustness terhadap noise dibandingkan metode Cohen-Coon. Penyesuaian trial and error terhadap parameter PID menawarkan fleksibilitas dalam meningkatkan performa sistem, terutama pada aplikasi yang sensitif terhadap noise. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan, yaitu hanya diuji pada satu jenis plant dengan dinamika linier. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan menguji metode tuning ini pada berbagai plant dengan karakteristik yang lebih kompleks, termasuk plant non-linear, serta mengeksplorasi pendekatan hybrid seperti kontrol prediktif model (MPC) untuk meningkatkan robustness sistem dalam berbagai kondisi operasional.

Kontribusi Penulis

Setiap penulis dalam manuskrip ini telah memberikan kontribusi yang signifikan. Arga Dwi Pambudi bertanggung jawab atas konsep penelitian, perancangan metodologi, dan analisis data. M Ary Heryanto menangani implementasi simulasi MATLAB/Simulink, eksperimen, dan pengolahan data. Sari Ayu Wulandari berperan dalam penyusunan manuskrip, tinjauan literatur, dan revisi berdasarkan umpan balik reviewer.

Pernyataan Pendanaan

Penelitian ini tidak menerima hibah atau dana khusus dari lembaga pendanaan di sektor publik, komersial, atau organisasi nirlaba.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada individu, institusi, dan laboratorium yang telah memberikan dukungan selama penelitian ini. Penghargaan khusus diberikan kepada Universitas Dian Nuswantoro atas fasilitas penelitian yang disediakan dan telah memberikan bantuan teknis, proofreading, dan saran akademik yang berharga.

Pernyataan Kepentingan

Semua penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan dalam penelitian ini. Deklarasi kepentingan telah diterima sebelum artikel direview dan diterima untuk publikasi.

References

- [1] Hammoodi SJ, Flayyih KS, Hamad AR. Design and implementation speed control system of DC Motor based on PID control and matlab simulink. *IJPEDS* 2020;11:127. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i1.pp127-134>.
- [2] Allu N, Toding A. Tuning with Ziegler Nichols Method for Design PID Controller At Rotate Speed DC Motor. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 2020;846:012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/846/1/012046>.
- [3] Martin M. Sistem kendali posisi motor DC menggunakan state feedback controller dan real-time operating system. *JITEL* 2021;1:69-78. <https://doi.org/10.35313/jitel.v1.i1.2021.69-78>.
- [4] Hudati I, Aji AP, Nurrahma S. Kendali Posisi Motor DC dengan Menggunakan Kendali PID. *JuLIET* 2021;2. <https://doi.org/10.22146/juliet.v2i2.71148>.
- [5] Tuhin SI, Masum MdAH, Araf MdA, Uddin MM. Synergistic Integration of Advanced Control Strategies for Comprehensive PID Controller Tuning using MATLAB. *JECNAM* 2024;8-17. <https://doi.org/10.55529/jecnam.43.8.17>.
- [6] Siregar GA. Analisis Performansi Pengendali PID pada Motor DC Menggunakan Metode Tuning Cohen-Coon. *SNST* 2022;12. <https://doi.org/10.36499/psnst.v12i1.7291>.
- [7] Angelli VV. Analisa Perancangan Pengendali PID dengan Metode Ziegler Nichols pada Motor DC. *SNST* 2022;12:639-46. <https://doi.org/10.36499/psnst.v12i1.7323>.
- [8] Sari DP, Lutfi I, Saputra F. Kendali Kestabilan Putaran Motor DC Robot Pemindah Barang dengan Metode Ziegler-Nichols pada Industri. *JTEIN* 2023;4. <https://doi.org/10.24036/jtein.v4i2.448>.
- [9] Widya Suseno E, Ma'arif A. Tuning of PID Controller Parameters with Genetic Algorithm Method on DC Motor. *IJRCS* 2021;1:41-53. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v1i1.249>.
- [10] Abdulameer A, Sulaiman M, Aras M, Saleem D. Tuning Methods of PID Controller for DC Motor Speed Control. *IJECS* 2016;3:343. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v3.i2.pp343-349>.
- [11] Michigan University Control Tutorials for MATLAB and Simulink. Motor Position: Simulink Modeling 2025. [Online]. Available: <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorPosition§ion=SimulinkModeling>. [Accessed Jan. 29, 2025]
- [12] Abdullah FN, Aziz GA, Shneen SW. Simulation Model of Servo Motor by Using Matlab. *Journal of Robotics and Control* 2022;3:176-9. <https://doi.org/10.18196/jrc.v3i2.13959>.
- [13] Li J, Li W, Liang H, Kong L. Review of Research on Improved PID Control in Electro-hydraulic ServoSystem. *ENG* 2024;18:e100223213561. <https://doi.org/10.2174/1872212117666230210090351>.

- [14] James Ujam C, Adeniyi D A. Developing and Simulating a Model using Proportional Integral Derivative (PID) on Matlab/Simulink for Speed Control of DC Motor. IJAMRS 2024;4:17–21. <https://doi.org/10.62225/2583049X.2024.4.2.2431>.
- [15] Corapsiz MR, Kahveci H. The speed control of DC motor under the load condition using PI and PID controllers, Antalya, Turkey: 2017, p. 020116. <https://doi.org/10.1063/1.4981764>.
- [16] Alwardat MYa, Balabanov PV. Speed Control Of DC Motor Using PID Controller Based On MATLAB. Vestnik 2021;27:195–202. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2021.02.pp.195-202>.
- [17] Mishra N, Bajpai S, Narayan E. Speed Control of DC Motor using PID Controller FED H-Bridge. IJITEE 2020;9:274–82. <https://doi.org/10.35940/ijitee.F3967.0891020>.
- [18] Eisencraft M, Monteiro LHA, Soriano DC. White Gaussian Chaos. IEEE Commun Lett 2017;21:1719–22. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2700267>.
- [19] Jondral FK. White Gaussian Noise – Models for Engineers. Frequenz 2018;72:293–9. <https://doi.org/10.1515/freq-2017-0064>.
- [20] Qin S, Zhou S, Zhu T, Zhu S, Li J, Zheng Z, Qin S, Pan C, Tang J. Sinusoidal Noise Removal in PD Measurement Based on Synchrosqueezing Transform and Singular Spectrum Analysis. Energies 2021;14:7967. <https://doi.org/10.3390/en14237967>.
- [21] Wang H, Zhang H, Chen Y. Sinusoidal Seismic Noise Suppression Using Randomized Principal Component Analysis. IEEE Access 2020;8:152131–45. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3017690>.
- [22] Halvaei H, Svennberg E, Sörnmo L, Stridh M. Identification of Transient Noise to Reduce False Detections in Screening for Atrial Fibrillation. Front Physiol 2021;12:672875. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.672875>.
- [23] Lin H-N, Ho T-H, Huang Y-C, Ko P-N, Huang J-Y, Tsai Y-L, Li J-K, Hsiao H-C, Chang Y-T, Su C-H, Lin JY-T. EFT Transient Noise Model and Protection Analysis from Chip to System Level on Power Distribution. 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, Rome, Italy: IEEE; 2020, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245631>.
- [24] Rashid YG, Hussain AMA. Implementing optimization of PID controller for DC motor speed control. IJEECS 2021;23:657. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i2.pp657-664>.
- [25] Handaya D, Fauziah R. Proportional-Integral-Derivative and Linear Quadratic Regulator Control of Direct Current Motor Position using Multi-Turn Based on LabView. Jrc 2021;2. <https://doi.org/10.18196/jrc.24102>.
- [26] Hopkins C. Book review on “Engineering acoustics: noise and vibration control” by Malcolm J. Crocker and Jorge P. Arenas. Acta Acust 2024;8:31. <https://doi.org/10.1051/aacus/2024033>.
- [27] Ogata K. Modern Control Engineering. Prentice Hall; 2010.
- [28] Wang Q-G, Sun J, Zhang J-X, Huang J, Yu J, Dong H. Survey of transient performance control. Control Engineering Practice 2023;138:105559. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105559>.
- [29] Ma’arif A, Setiawan NR. Control of DC Motor Using Integral State Feedback and Comparison with PID: Simulation and Arduino Implementation. Jrc 2021;2. <https://doi.org/10.18196/jrc.25122>.
- [30] Singh G, Singh P. Position and Speed Control of DC Motor Using PID Controller. International Journal of Control and Automation 2018;11:15–26. <https://doi.org/10.14257/ijca.2018.11.8.02>.