

Perbandingan Performa Tuning PID Metode Root Locus dan Ziegler-Nichols Pada Kendali Kecepatan Motor DC

Desmira¹, Martias²

¹Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, ²Universitas Bina Sarana Informatika
e-mail: desmira@untirta.ac.id, martias.mts@bsi.ac.id

Abstrak – Perkembangan teknologi industri dan otomasi menuntut sistem pengendalian yang presisi, stabil, dan responsif, khususnya pada pengendalian kecepatan motor arus searah (DC). Motor DC banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena kemampuannya mengatur kecepatan dan arah putaran secara akurat. Namun, perubahan beban dan gangguan eksternal sering menyebabkan penurunan performa sehingga diperlukan sistem kendali yang mampu menjaga kestabilan dan akurasi respons. Pengendali Proportional-Integral-Derivative (PID) merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan karena sederhana dan efektif, tetapi kinerjanya sangat dipengaruhi oleh metode penalaan parameter yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan efektivitas dua metode tuning PID, yaitu Root Locus dan Ziegler-Nichols, pada pengendalian kecepatan motor DC berbasis simulasi menggunakan MATLAB/Simulink. Evaluasi dilakukan berdasarkan parameter performa sistem yang meliputi rise time, settling time, overshoot, dan steady-state error. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode Root Locus memberikan respons yang lebih baik dibandingkan Ziegler-Nichols. Root Locus menghasilkan rise time sekitar 0,5–0,7 detik, overshoot 4–6%, dan settling time kurang dari 2 detik, sedangkan Ziegler-Nichols menghasilkan rise time 0,8–1 detik, overshoot 10–15%, dan settling time sekitar 2–3 detik. Kedua metode mampu menurunkan steady-state error hingga mendekati nol. Dengan demikian, Root Locus lebih unggul dalam hal kestabilan, presisi, dan kecepatan respons, sedangkan Ziegler-Nichols menawarkan kemudahan implementasi dan tuning awal yang lebih praktis. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi dalam pemilihan metode tuning PID yang sesuai untuk berbagai aplikasi pengendalian motor DC di bidang industri dan otomasi.

Kata Kunci: Motor DC, Tuning PID, Root Locus dan Ziegler-Nichols

Abstract – The advancement of industrial and automation technologies demands control systems that are precise, stable, and responsive, particularly in the speed control of direct current (DC) motors. DC motors are widely utilized in various industrial applications due to their capability to regulate speed and rotational direction accurately. However, load variations and external disturbances often degrade motor performance, necessitating a control system capable of maintaining stability and response accuracy. The Proportional-Integral-Derivative (PID) controller is one of the most commonly used control methods because of its simplicity and effectiveness. Nevertheless, its performance is highly dependent on the tuning method employed to determine its parameters. This study aims to analyze and compare the effectiveness of two PID tuning methods, namely Root Locus and Ziegler-Nichols, for DC motor speed control through MATLAB/Simulink-based simulations. The system performance was evaluated using four key parameters: rise time, settling time, overshoot, and steady-state error. The simulation results indicate that the Root Locus method provides superior performance compared to the Ziegler-Nichols method. Root Locus achieved a rise time of approximately 0.5–0.7 seconds, an overshoot of 4–6%, and a settling time of less than 2 seconds, whereas Ziegler-Nichols produced a rise time of 0.8–1 second, an overshoot of 10–15%, and a settling time of approximately 2–3 seconds. Both methods were capable of reducing the steady-state error to nearly zero. Therefore, Root Locus demonstrates advantages in terms of stability, precision, and response speed, while Ziegler-Nichols offers greater ease of implementation and practical initial tuning. The findings of this study can serve as a reference for selecting appropriate PID tuning methods in various DC motor control applications within industrial and automation systems.

Keywords: PID Controller, DC Motor, Cuckoo Search Algorithm (CSA)

PENDAHULUAN

Motor arus searah (DC Motor) adalah jenis motor listrik yang mengubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanik berupa gerak putar. Motor ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri maupun non-industri karena keunggulannya dalam kemudahan pengaturan kecepatan dan torsi. Menurut (Rafi & Tahtawi,



2016) dalam jurnal Analisa dan Simulasi Sistem Pengendalian Motor DC, motor DC memiliki struktur dasar berupa stator (penghasil medan magnet), rotor (kumparan jangkar), komutator, dan sikat (brush). Energi listrik disuplai ke kumparan melalui sikat dan komutator, yang memungkinkan arus mengalir secara teratur dan menghasilkan gaya gerak elektromagnetik yang memutar rotor.

Motor arus searah (DC), salah satu jenis motor listrik yang banyak digunakan dalam industri karena kemampuannya dalam mengatur kecepatan dan torsi secara mudah serta memiliki karakteristik linear antara tegangan input dan kecepatan output (Polgan & Saragih, n.d.).

Motor arus searah merupakan salah satu jenis motor yang digunakan sebagai penggerak konveyor. Pengaturan motor pada konveyor sangat diperlukan untuk mengatur laju barang yang akan dikirim. Namun, pada masa sekarang ini masih banyak pengaturan motor arus searah yang menggunakan kendali konvensional dengan proses penyearahan menggunakan autotransformator. Metode konvensional dengan menggunakan autotransformator tersebut memiliki kelemahan dalam penggunaan biaya yang mahal. Sebuah penyearah terkontrol dengan IC TCA 785 sebagai pengatur sudut pemicu thyristor dibuat untuk mengatasi masalah tersebut (Nugraha et al., 2023).

Motor DC terbagi ke dalam beberapa tipe berdasarkan konfigurasi medan magnet dan kumparan, seperti motor DC seri, shunt, dan kompon (Dakheel et al., 2022). Masing-masing tipe memiliki karakteristik yang cocok untuk keperluan tertentu dalam sistem kendali. Selain itu, motor ini juga dapat dikendalikan secara presisi menggunakan sistem kontrol berbasis matematika, seperti PID atau Model Reference Adaptive Control (MRAC) (Maarif & Setiawan, 2021).

Motor DC bekerja dengan memanfaatkan interaksi antara medan magnet dan arus listrik yang mengalir dalam kumparan untuk menghasilkan gaya gerak (torsi). Ketika arus mengalir melalui konduktor dalam medan magnet, maka timbul gaya yang menyebabkan konduktor tersebut bergerak. Gaya ini diatur oleh aturan tangan kiri Fleming, dan untuk mempertahankan arah gerak rotor, digunakan komutator yang secara periodik membalik arah arus dalam kumparan (Ma'arif & Çakan, 2021).

Aplikasi motor DC listrik dalam sistem kendali merupakan bagian penting dalam penggerak kendaraan tanpa awak (UGV), di mana kecepatan kendaraan dikendalikan melalui pengaturan kecepatan sudut motor DC. Sistem kendali PID digunakan untuk menjaga kecepatan motor tetap stabil sesuai perintah, yang sangat relevan dalam aplikasi industri pertanian (Tyas & Sumiharto, 2013).

Sistem kendali merupakan bagian penting dalam bidang teknik, khususnya dalam otomasi dan elektronika, yang bertujuan untuk mengatur variabel-variabel dalam suatu sistem agar beroperasi sesuai dengan nilai referensi yang diharapkan. Dalam sistem kendali, terdapat elemen-elemen dasar seperti sinyal masukan (input), proses (plant), pengendali (controller), dan keluaran (output), yang saling terhubung dan berinteraksi.

Sistem kendali otomatis merupakan suatu sistem yang dapat mengatur dan mengendalikan suatu proses atau variabel agar tetap pada nilai yang diinginkan meskipun terdapat gangguan dari luar. (Bahri, 2014)

Menurut Jitwang & Puangdownreong (2020) sistem kendali dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu sistem kendali terbuka (open-loop system) dan sistem kendali tertutup (closed-loop system). Pada sistem kendali terbuka, proses pengendalian dilakukan tanpa memperhatikan umpan balik dari keluaran sistem. Sebaliknya, pada sistem kendali tertutup, terdapat mekanisme umpan balik yang memungkinkan sistem membandingkan antara sinyal keluaran dan referensi untuk menghasilkan sinyal error, yang kemudian digunakan oleh pengendali untuk memperbaiki kinerja sistem.

Sistem kendali memiliki peranan penting dalam menjaga kestabilan dan keakuratan proses, serta meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem. Oleh karena itu, pemahaman konsep dasar sistem kendali menjadi landasan utama dalam pengembangan sistem-sistem otomatisasi modern.

Sistem kendali loop tertutup merupakan sistem yang menggunakan informasi keluaran sebagai umpan balik untuk mengontrol masukan sistem. Struktur ini memungkinkan sistem untuk memperbaiki dirinya secara otomatis terhadap gangguan eksternal maupun perubahan internal.

Menurut Jin et al. (2015) menjelaskan bahwa sistem kendali tertutup memiliki keunggulan dalam hal akurasi dan kestabilan dibandingkan dengan sistem terbuka. Dalam sistem ini, sinyal keluaran diukur oleh sensor dan dikembalikan ke pengendali, yang kemudian membandingkannya dengan sinyal referensi. Hasil perbandingan ini menghasilkan sinyal error yang digunakan untuk mengatur input ke proses agar keluaran mendekati nilai yang diharapkan.

Respons sistem terhadap sinyal masukan sangat menentukan kualitas kinerja sistem kendali. Respons waktu sistem dikategorikan menjadi dua bagian, yaitu respons transien (transient response) dan respon keadaan tunak (steady-state response).

Respon transien mencerminkan perilaku awal sistem ketika terjadi perubahan masukan, seperti saat sistem mulai beroperasi atau ketika terjadi gangguan. Komponen ini mencakup karakteristik seperti waktu naik (rise time), waktu puncak (peak time), Overshoot, dan waktu pemulihan (settling time). Sedangkan respons keadaan tunak adalah respon sistem setelah waktu cukup lama, yaitu ketika output telah mencapai kondisi stabil.

Salah satu parameter penting dalam analisis steady-state adalah Steady-State Error (SSE), yaitu perbedaan antara nilai keluaran pada keadaan tunak dengan nilai referensi. SSE dipengaruhi oleh tipe sistem

(jumlah integrator dalam jalur loop) dan jenis masukan (langkah, ramp, parabola). Untuk mengurangi SSE, diperlukan perancangan pengendali yang tepat.

Menurut (Setiyoko & Yuliana, 2022), pemilihan dan penyetelan parameter pengendali seperti dalam metode PID sangat berpengaruh terhadap respons sistem. Dalam penelitiannya mengenai penerapan kendali PID pada gimbal kamera dua sumbu, stabilitas dan kesesuaian antara input dan output sangat ditentukan oleh karakteristik respons waktu dan nilai Steady-State Error yang kecil.

Pengendalian PID merupakan salah satu teknik pengendalian umpan balik yang paling luas digunakan dalam dunia teknik, terutama dalam sistem kontrol kecepatan motor DC. PID merupakan singkatan dari Proportional, Integral, dan Derivative, yang masing-masing berperan dalam menghasilkan sinyal kendali berdasarkan error antara masukan referensi dan keluaran sistem. Pengendalian ini bertujuan untuk mencapai kestabilan sistem, mempercepat respon, dan meminimalkan kesalahan steady-state.

Salah satu pendekatan umum dalam menyetel parameter PID adalah metode Ziegler-Nichols, yang memberikan estimasi awal parameter kendali berdasarkan respons sistem terhadap osilasi. Pengendalian PID analog biasanya direalisasikan dalam bentuk rangkaian elektronik menggunakan komponen pasif dan aktif (Setiyoko & Yuliana, 2022).

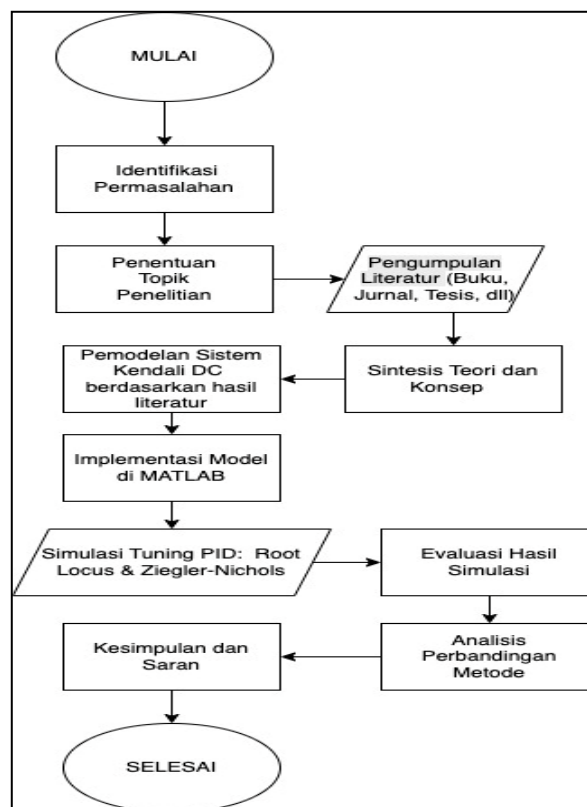
Root Locus memiliki peranan penting dalam merancang sistem kendali karena memberikan visualisasi tentang bagaimana pole sistem tertutup berpindah dengan perubahan parameter. Dalam konteks perancangan pengendali PID, metode ini memungkinkan penyesuaian nilai P, I, dan D dengan cara mengarahkan letak pole ke posisi yang memberikan performa terbaik.

Menurut Dawood et al., (2018) menunjukkan bahwa Root Locus digunakan untuk mengarahkan pole sistem motor DC ke lokasi yang diinginkan guna menghasilkan respons yang cepat dan stabil. Dalam praktiknya, nilai parameter PID disesuaikan sedemikian rupa agar pole sistem tertutup berada pada wilayah kiri bidang s (real negatif) yang menunjukkan sistem stabil dengan performa waktu respons yang baik.

Metode ini juga membantu meminimalkan kesalahan steady-state serta mengurangi Overshoot. Root Locus menjadi dasar pemilihan parameter karena dapat memperkirakan dampak langsung terhadap karakteristik sistem sebelum implementasi aktual.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur (literature review). Flowchart sebagai berikut:



Gambar 1. Alur Penelitian

Berdasarkan gambar 1 Metode ini dilakukan dengan cara mengumpulkan, mengkaji, dan menganalisis berbagai sumber ilmiah yang relevan dengan topik penelitian, yaitu simulasi kendali kecepatan motor DC

menggunakan metode Root Locus dan Ziegler-Nichols. Studi literatur dilakukan secara sistematis untuk memperoleh pemahaman teoretis dan prosedural terkait pemodelan sistem, teknik tuning PID, serta implementasi simulasi menggunakan MATLAB/Simulink.

Subjek dalam penelitian ini adalah sistem kendali kecepatan motor arus searah (DC) yang dirancang dan disimulasikan menggunakan dua metode tuning PID, yaitu metode Root Locus dan metode Ziegler-Nichols. Fokus subjek penelitian adalah model sistem motor DC dalam lingkungan simulasi MATLAB/Simulink, yang menjadi objek pengujian performa melalui berbagai skenario respon sistem. Sistem ini dipilih sebagai subjek penelitian karena:

1. Merupakan jenis motor yang umum digunakan dalam industri dan otomasi,
- 2). Memiliki karakteristik dinamis yang cocok untuk diuji dalam skema kendali PID,
- 3). Menjadi representasi nyata dari aplikasi sistem kontrol berbasis simulasi.

Penelitian ini diawali dengan identifikasi permasalahan dan penentuan topik yang relevan di bidang sistem kendali motor DC. Selanjutnya, dilakukan pengumpulan literatur dari berbagai sumber ilmiah untuk menyusun sintesis teori dan konsep yang mendasari pemodelan sistem. Berdasarkan hasil sintesis, dilakukan pemodelan sistem kendali DC yang kemudian diimplementasikan ke dalam MATLAB untuk keperluan simulasi.

Simulasi dilakukan dengan metode tuning PID menggunakan pendekatan Root Locus dan Ziegler-Nichols. Hasil simulasi dievaluasi untuk menilai performa sistem, kemudian dilakukan analisis perbandingan antara kedua metode tersebut. Tahapan terakhir adalah penarikan kesimpulan dan pemberian saran berdasarkan hasil analisis yang diperoleh.

Pemodelan Sistem Motor DC

Pada penelitian ini, motor DC dimodelkan menggunakan fungsi alih (transfer function) yang merepresentasikan hubungan antara tegangan masukan dan kecepatan putar motor sebagai keluaran sistem. Model matematis motor DC diperoleh berdasarkan hukum Kirchhoff pada rangkaian armatur dan persamaan dinamika mekanik rotor. Parameter yang digunakan meliputi resistansi armatur (R), induktansi armatur (L), konstanta gaya gerak balik elektromotif (K_b), konstanta torsi motor (K_t), momen inersia rotor (J), dan koefisien gesekan viskos (B).

Secara umum, model transfer function motor DC dapat dinyatakan sebagai hubungan antara kecepatan sudut motor $\omega(s)$ terhadap tegangan masukan $V_a(s)$. Model ini digunakan sebagai plant dalam sistem kendali yang kemudian diintegrasikan dengan pengendali PID untuk mengevaluasi karakteristik respons sistem terhadap perubahan masukan. Pemodelan matematis diperlukan agar karakteristik dinamis motor dapat dianalisis secara kuantitatif sebelum dilakukan proses tuning pengendali.

Perancangan Pengendali PID

Pengendali PID digunakan untuk memperbaiki performa sistem dengan mengurangi error antara sinyal referensi dan keluaran sistem. Struktur PID terdiri atas tiga komponen utama, yaitu Proportional (P), Integral (I), dan Derivative (D). Komponen proportional berfungsi mempercepat respons sistem terhadap error, komponen integral digunakan untuk menghilangkan steady-state error, sedangkan komponen derivative berfungsi meningkatkan redaman sistem dan mengurangi overshoot.

Pada penelitian ini dilakukan dua pendekatan tuning PID, yaitu metode Root Locus dan metode Ziegler-Nichols. Pada metode Root Locus, penentuan parameter PID dilakukan melalui analisis pergerakan pole sistem pada bidang kompleks sehingga diperoleh posisi pole yang menghasilkan karakteristik respons sesuai spesifikasi yang diinginkan. Sementara itu, metode Ziegler-Nichols dilakukan dengan menentukan gain kritis (K_u) dan periode osilasi kritis (P_u) yang kemudian digunakan untuk menghitung nilai parameter K_p , K_i , dan K_d berdasarkan aturan empiris Ziegler-Nichols.

Prosedur Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink sebagai lingkungan pemodelan dan analisis sistem kendali. Tahapan simulasi diawali dengan membangun model motor DC berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Selanjutnya dilakukan pengujian sistem tanpa pengendali sebagai kondisi awal untuk mengetahui karakteristik dasar plant. Tahap berikutnya adalah penerapan pengendali PID dengan metode tuning Root Locus dan Ziegler-Nichols secara terpisah. Masing-masing metode menghasilkan parameter PID yang berbeda sehingga memberikan karakteristik respons yang berbeda pula. Setelah proses tuning selesai, simulasi dilakukan menggunakan masukan berupa sinyal step untuk mengamati perilaku sistem terhadap perubahan setpoint.

Data hasil simulasi kemudian dianalisis berdasarkan parameter performa sistem yang meliputi rise time, settling time, persentase overshoot, dan steady-state error. Seluruh hasil pengujian dibandingkan untuk mengetahui metode tuning yang memberikan performa terbaik pada sistem kendali kecepatan motor DC. Tahap akhir penelitian adalah melakukan interpretasi hasil simulasi serta menyusun kesimpulan berdasarkan perbandingan performa kedua metode tuning yang digunakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dijabarkan pada subbab sebelumnya, tampak bahwa kedua metode tuning PID *Root Locus* dan *Ziegler-Nichols* memberikan hasil yang cukup berbeda dalam pengendalian kecepatan motor DC. Meskipun keduanya menghasilkan sistem yang stabil dan mampu mencapai nilai referensi, terdapat perbedaan signifikan dari segi kecepatan respons, tingkat *Overshoot*, serta kestabilan sistem dalam mencapai steady-state. Perbandingan antara kedua metode dapat dirangkum dalam Tabel 4.1 berikut:

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Sistem Kendali Antara Metode *Root Locus* dan *Ziegler-Nichols*

Parameter	<i>Root Locus</i>	<i>Ziegler-Nichols</i>
Rise time	Cepat (~0.5–0.7 s)	Cukup cepat (~0.8–1 s)
Overshoot	Rendah (~4–6%)	Tinggi (~10–15%)
Settling time	Pendek (< 2 s)	Lebih lama (~2–3 s)
Steady-State Error	Hampir nol	Nol
Respons Osilasi	Minim, lebih halus	Terlihat osilasi awal
Tingkat Stabilitas	Sangat stabil	Stabil setelah koreksi
Kemudahan Implementasi	Lebih kompleks (butuh analisis grafis)	Lebih praktis dan cepat (empiris)
Akurasi Kontrol	Tinggi, cocok untuk sistem presisi	Cukup baik, perlu fine tuning

Dari perbandingan di atas, dapat diambil beberapa poin penting:

- 1) Kinerja Respons: *Root Locus* memberikan kinerja yang lebih baik dalam hal kecepatan sistem mencapai kondisi tunak dan minimnya *Overshoot*. Hal ini membuat metode ini sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kestabilan dan presisi tinggi.
- 2) Stabilitas Sistem: Letak pole sistem yang dianalisis secara grafis dalam metode *Root Locus* memberikan jaminan kestabilan yang lebih dapat dikendalikan. Sedangkan *Ziegler-Nichols*, meski cepat dalam tuning, menghasilkan respons awal yang lebih agresif dan memerlukan koreksi lanjutan untuk meredam osilasi.
- 3) Implementasi: Dari segi implementasi, *Ziegler-Nichols* lebih mudah diaplikasikan, terutama jika sistem tidak memiliki model matematis yang lengkap. Metode ini praktis digunakan di lapangan untuk tuning awal pengendali PID, tetapi performanya sering kali perlu disempurnakan kembali.
- 4) Aplikasi: *Root Locus* lebih ideal untuk tahap desain sistem kendali pada lingkungan simulasi dan studi teknis yang membutuhkan presisi. Sementara *Ziegler-Nichols* lebih sesuai untuk kondisi real-time atau industri yang memerlukan tuning cepat dengan pendekatan eksperimental.

Simulasi dan analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa pemilihan metode tuning PID harus disesuaikan dengan kebutuhan sistem. *Root Locus* unggul dari sisi kestabilan dan presisi, namun membutuhkan pemahaman lebih dalam terkait teori kontrol dan analisis sistem. *Ziegler-Nichols*, di sisi lain, menawarkan kemudahan dan kecepatan, namun dengan kompromi pada performa awal sistem yang cenderung agresif. Untuk pengendalian motor DC dalam lingkungan simulatif atau desain sistem presisi, *Root Locus* lebih direkomendasikan. Namun, jika tuning dilakukan langsung di lapangan dengan keterbatasan model, *Ziegler-Nichols* tetap relevan, asalkan disertai dengan penyesuaian lanjutan.

Analisis lebih lanjut terhadap hasil simulasi menunjukkan bahwa metode *Root Locus* memberikan performa yang lebih unggul karena proses penalaan parameter PID dilakukan berdasarkan analisis letak pole sistem pada bidang s. Dengan pendekatan ini, posisi pole dapat diarahkan ke wilayah yang menghasilkan

karakteristik respons yang diinginkan, seperti waktu naik yang cepat, overshoot yang rendah, dan kestabilan yang tinggi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem yang dituning menggunakan Root Locus mampu mencapai nilai referensi dengan lebih cepat dibandingkan metode Ziegler-Nichols. Hal ini terlihat dari nilai rise time yang berada pada rentang 0,5–0,7 detik, yang menunjukkan kemampuan sistem dalam merespons perubahan setpoint secara cepat. Selain itu, nilai overshoot yang relatif kecil pada metode Root Locus menunjukkan bahwa energi kendali yang diberikan tidak berlebihan sehingga sistem tidak mengalami lonjakan keluaran yang signifikan. Karakteristik ini sangat penting pada aplikasi industri yang membutuhkan akurasi tinggi, seperti sistem robotika, conveyor otomatis, dan sistem aktuator presisi. Overshoot yang rendah juga berkontribusi terhadap peningkatan umur komponen mekanis karena mengurangi tekanan mekanik akibat perubahan kecepatan yang terlalu drastis.

Sebaliknya, metode Ziegler-Nichols menghasilkan respons yang lebih agresif. Hal ini disebabkan oleh prinsip dasar metode tersebut yang memanfaatkan kondisi osilasi kritis sistem untuk menentukan parameter PID. Akibatnya, nilai parameter yang diperoleh cenderung menghasilkan respons cepat tetapi dengan overshoot yang lebih besar. Pada hasil simulasi, overshoot mencapai 10–15%, yang mengindikasikan bahwa keluaran sistem melampaui nilai referensi sebelum akhirnya stabil. Meskipun kondisi ini masih dapat diterima pada beberapa aplikasi, overshoot yang terlalu besar berpotensi menurunkan kualitas proses pengendalian, terutama pada sistem yang sensitif terhadap perubahan kecepatan. Dari sisi settling time, metode Root Locus menunjukkan performa yang lebih baik dengan waktu penetapan kurang dari 2 detik. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem mampu mencapai kondisi tunak dalam waktu yang relatif singkat. Sebaliknya, metode Ziegler-Nichols membutuhkan waktu sekitar 2–3 detik untuk mencapai kondisi stabil. Perbedaan ini menunjukkan bahwa Root Locus memiliki kemampuan yang lebih baik dalam meredam osilasi setelah terjadi perubahan masukan. Kemampuan tersebut sangat dipengaruhi oleh posisi pole tertutup yang lebih terkontrol sehingga redaman sistem meningkat.

Steady-state error pada kedua metode menunjukkan nilai yang mendekati nol. Kondisi ini membuktikan bahwa aksi integral pada pengendali PID bekerja dengan baik dalam menghilangkan error permanen. Dengan demikian, baik Root Locus maupun Ziegler-Nichols sama-sama mampu memastikan bahwa kecepatan motor pada kondisi tunak sesuai dengan nilai referensi yang diberikan. Namun demikian, kualitas respons transien tetap menjadi faktor pembeda utama antara kedua metode tersebut. Jika ditinjau dari aspek implementasi, Root Locus memerlukan model matematis sistem yang relatif akurat agar proses penalaan dapat dilakukan dengan baik. Oleh karena itu, metode ini lebih sesuai diterapkan pada tahap perancangan sistem dan simulasi. Sebaliknya, Ziegler-Nichols lebih fleksibel karena dapat digunakan meskipun model matematis sistem tidak tersedia secara lengkap. Keunggulan tersebut menjadikan Ziegler-Nichols banyak digunakan sebagai metode tuning awal pada lingkungan industri sebelum dilakukan penyempurnaan parameter secara lebih lanjut.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tidak terdapat satu metode tuning yang dapat dianggap paling baik untuk seluruh kondisi. Pemilihan metode harus mempertimbangkan karakteristik sistem dan tujuan pengendalian yang ingin dicapai. Untuk aplikasi yang menuntut presisi tinggi, respons cepat, dan kestabilan yang baik, metode Root Locus merupakan pilihan yang lebih tepat. Sementara itu, untuk kebutuhan implementasi cepat dan sederhana di lapangan, metode Ziegler-Nichols masih menjadi alternatif yang efektif karena kemudahan penerapannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Dakheel, H. S., Abdullah, Z. B., Jasim, N. S., & Shneen, S. W. (2022). Simulation model of ANN and PID controller for direct current servo motor by using Matlab/Simulink. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 20(4), 922–932. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v20i4.23248>
- Dawood, Y. S., Mahmood, A. K., & Ibrahim, M. A. (2018). *Comparison of PID, GA and Fuzzy Logic Controllers for Cruise Control System*. 5(5).
- Jin, Q., Qi, L., Jiang, B., & Wang, Q. (2015). Novel improved cuckoo search for PID controller design. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 37(6), 721–731. <https://doi.org/10.1177/0142331214544211>
- Jitwang, T., & Puangdownreong, D. (2020). Application of cuckoo search to robust PID controller design for liquid-level system. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 16(1), 189–205. <https://doi.org/10.24507/ijicic.16.01.189>
- Ma'arif, A., & Çakan, A. (2021). Simulation and arduino hardware implementation of dc motor control using sliding mode controller. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(6), 582–587. <https://doi.org/10.18196/jrc.26140>

- Maarif, A., & Setiawan, N. R. (2021). Control of dc motor using integral state feedback and comparison with pid: Simulation and arduino implementation. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(5), 456–461. <https://doi.org/10.18196/jrc.25122>
- Nugraha, A. T., Marjuki, R., Agna, D. I. Y., & Ivannuri, F. (2023). Sistem Kontrol Tegangan pada Generator Induksi 3 Phasa dengan PLC Voltage. *Elektriase: Jurnal Sains Dan Teknologi Elektro*, 13(01), 21–33. <https://doi.org/10.47709/elektriase.v13i01.2347>
- Polgan, J. M., & Saragih, M. F. (n.d.). *Simulasi Pengendali Kecepatan Motor DC Seri Dengan Menggunakan Penyearah Terkendali Penuh Berbasis PSIM*.
- Rafi, A., & Tahtawi, A. (2016). Pemodelan dan Simulasi Kendaraan Listrik Berbasis Motor Arus Searah pada MATLAB/Simulink Modeling and Simulation of an Electric Vehicle Based on Direct Current Motor on MATLAB/Simulink. *INKOM*, 10(2), 75–80. <https://doi.org/10.14203/j.inkom.464>
- Setiyoko, A., & Yuliana, D. E. (2022). Kendali Suhu Minyak Goreng Pada Penggorengan Sosis Menggunakan Kontrol PID. *JASEE Journal of Application and Science on Electrical Engineering*, 3(01), 52–62. <https://doi.org/10.31328/jasee.v3i01.6>
- Tyas, D. A., & Sumiharto, R. (2013). Purwarupa Sistem Kendali PID: Studi Kasus Kendali Suhu Ruang. *IJEIS - Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems*, 3(1), 95–104.