

Optimasi Pengendali PID Berbasis Simulasi untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC Menggunakan Cuckoo Search Algorithm (CSA)

Desmira¹, Martias²

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

Abstrak - Pengendali PID merupakan salah satu metode yang paling umum digunakan dalam sistem kontrol industri, khususnya dalam pengaturan kecepatan motor DC. Namun, proses tuning parameter PID secara manual sering kali memerlukan waktu lama dan hasil yang kurang optimal. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja pengendali PID yang dituning secara manual (trial and error) dengan pengendali PID yang dioptimasi menggunakan Cuckoo Search Algorithm (CSA) dalam lingkungan simulasi MATLAB Simulink. Simulasi dilakukan pada sistem motor DC penguatan terpisah, yang dirancang untuk menguji performa respon sistem terhadap perubahan kecepatan referensi. Tiga skenario diuji: tanpa pengendali, pengendali PID trial-error, dan PID hasil tuning CSA. Parameter evaluasi meliputi waktu naik (rise time), waktu stabilisasi (settling time), overshoot, dan akurasi steady-state. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan CSA secara signifikan meningkatkan kinerja sistem. Dengan waktu naik sekitar 1 detik dan settling time kurang dari 3 detik tanpa overshoot, sistem menunjukkan performa yang jauh lebih baik dibandingkan metode manual. Selain itu, integrasi fitur anti-windup dalam pengendali PID turut membantu menjaga kestabilan sistem saat terjadi saturasi aktuator. Temuan ini menunjukkan bahwa CSA merupakan alternatif tuning yang efisien dan efektif untuk pengendalian kecepatan motor DC, serta dapat diimplementasikan lebih luas dalam sistem kendali dinamis lainnya.

Kata Kunci: Pengendali PID, Motor DC, Cuckoo Search Algorithm (CSA)

*Abstract - PID controllers are among the most widely used methods in industrial control systems, particularly for regulating the speed of DC motors. However, manually tuning PID parameters often requires significant time and may yield suboptimal results. This study aims to compare the performance of manually tuned PID controllers (trial and error) with PID controllers optimized using the Cuckoo Search Algorithm (CSA) within a MATLAB Simulink simulation environment. The simulation is conducted on a separately excited DC motor system, designed to evaluate the system's response performance to changes in reference speed. Three scenarios are tested: without a controller, with a PID controller tuned manually, and with a PID controller tuned using CSA. Evaluation parameters include rise time, settling time, overshoot, and steady-state accuracy. The simulation results indicate that the use of CSA significantly improves system performance. With a rise time of approximately 1 second and a settling time of less than 3 seconds with zero overshoot, the system demonstrates much better performance compared to the manual tuning method. In addition, the integration of anti-windup features in the PID controller helps maintain system stability during actuator saturation. These findings suggest that CSA is an efficient and effective alternative for tuning PID controllers in DC motor speed regulation and can be more broadly implemented in other dynamic control systems.***Keywords:** wheelchair Furnace Temperature Measurement, K-Type Thermocouple, PID Control

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

PENDAHULUAN

Cuckoo Search Algorithm (CSA) merupakan salah satu algoritma optimasi metaheuristik yang dikembangkan oleh Xin-She Yang dan Suash Deb pada tahun 2009 (Riduwan et al., 2019). Algoritma ini terinspirasi dari perilaku reproduksi burung cuckoo yang unik, di mana beberapa spesies burung cuckoo meletakkan telurnya di sarang burung lain untuk menetas (Rahmania et al., 2019). Konsep ini kemudian dimodelkan menjadi strategi pencarian solusi optimal melalui mekanisme seleksi alam dan eksplorasi acak.

Prinsip dasar dari CSA adalah sebagai berikut: setiap burung cuckoo hanya meletakkan satu telur pada satu waktu dalam sarang yang dipilih secara acak. Sarang dengan telur terbaik yang dalam konteks algoritma berarti solusi dengan nilai fungsi objektif terbaik akan dilanjutkan ke generasi berikutnya. Di sisi lain, sejumlah telur atau solusi dengan kualitas rendah akan diganti dengan solusi baru yang dihasilkan secara acak menggunakan teknik



pencarian yang dikenal sebagai Levy Flight. Teknik ini memungkinkan algoritma untuk menjelajahi ruang solusi secara lebih luas dan efisien sehingga dapat menghindari jebakan pada solusi optimum lokal.

Dalam implementasinya pada sistem kendali PID, solusi direpresentasikan dalam bentuk vektor parameter PID yaitu K_p , K_i , dan K_d (Jin et al., 2015). Penentuan parameter optimal dilakukan dengan meminimalkan fungsi objektif tertentu, salah satunya adalah Integral Time Absolute Error (ITAE). CSA terbukti sangat efektif dalam melakukan tuning parameter PID (Al-Wesabi et al., 2022). Keunggulan utamanya terletak pada kemampuannya untuk melakukan eksplorasi global secara efisien, sehingga dapat menghindari jebakan lokal minima yang sering menjadi kelemahan pada algoritma konvensional (Puangdownreong, 2018). Beberapa studi menunjukkan bahwa penggunaan CSA pada tuning PID menghasilkan performa sistem yang lebih baik dibanding metode trial-error maupun algoritma optimasi lainnya, baik dari segi waktu stabilisasi, overshoot, maupun kesalahan steady-state (Jitwang & Puangdownreong, 2020). Pengendali PID (Proportional-Integral-Derivative) merupakan salah satu jenis pengendali umpan balik tertua dan paling banyak digunakan dalam sistem kontrol industri (Zhang et al., 2022). Pengendali ini terdiri dari tiga komponen utama, yaitu proporsional (P), integral (I), dan derivatif (D), yang masing-masing memberikan kontribusi terhadap respon keseluruhan sistem (Al-Khazraji et al., 2024). Komponen proporsional bertanggung jawab untuk mengurangi kesalahan keadaan stabil, komponen integral mengeliminasi kesalahan keadaan stabil, dan komponen derivatif memprediksi kesalahan di masa depan (Adel et al., 2019).

Pengendali PID (Proportional-Integral-Derivative) merupakan pilar dalam dunia kontrol otomatis dan telah menjadi fondasi penting dalam banyak aplikasi industri. Ditemukan pada awal abad ke-20, pengendali PID tetap menjadi salah satu alat paling umum dan andal untuk mengatur sistem-sistem yang beragam, mulai dari proses kimia hingga sistem kontrol kecepatan motor (Dhal et al., 2019).

Salah satu kekuatan utama dari pengendali PID adalah kemampuannya untuk menyesuaikan respons sistem terhadap perubahan lingkungan atau input yang diberikan. Ini dicapai melalui tiga komponen utamanya: proporsional, integral, dan derivatif, masing-masing memberikan kontribusi yang berbeda namun saling melengkapi untuk memastikan kinerja yang optimal (Shehab et al., 2018).

Pertama-tama, komponen proporsional (P) bertanggung jawab untuk menanggapi kesalahan saat ini antara output yang diinginkan dan output aktual dari sistem. Dalam hal ini, semakin besar kesalahan, semakin besar pula tindakan koreksi yang diambil oleh komponen proporsional. Ini membantu dalam mengurangi kesalahan keadaan stabil, yang merupakan ketidaksesuaian antara nilai yang diinginkan dan nilai yang diperoleh saat sistem berada dalam keadaan stabil.

Kedua, komponen integral (I) bekerja untuk menghilangkan kesalahan keadaan stabil yang mungkin terjadi meskipun aksi koreksi proporsional. Komponen ini menangani kesalahan yang terakumulasi dari waktu ke waktu dengan mengintegrasikan kesalahan selama periode.

Motor arus searah (DC) merupakan salah satu komponen utama dalam berbagai aplikasi teknik dan industri, seperti otomasi, robotika, dan sistem penggerak kendaraan listrik. Kemampuan sistem untuk mengatur kecepatan motor DC secara presisi dan stabil menjadi sangat penting untuk memastikan efisiensi dan keandalan operasional. Salah satu metode yang paling umum digunakan untuk mencapai tujuan tersebut adalah pengendali Proportional-Integral-Derivative (PID). Pengendali PID dikenal luas karena kesederhanaan struktur dan efektivitasnya dalam mengatur sistem linier dan non-linier.

Namun demikian, implementasi pengendali PID dalam sistem nyata tidak terlepas dari tantangan. Salah satu kendala utamanya adalah proses tuning parameter PID (K_p , K_i , K_d), yang jika dilakukan secara manual melalui metode trial-and-error, sering kali memerlukan waktu lama, hasil yang tidak konsisten, dan sangat bergantung pada intuisi pengguna. Selain itu, fenomena integral windup, yaitu akumulasi kesalahan integral akibat saturasi aktuator, juga dapat menurunkan kinerja sistem secara signifikan dengan menimbulkan overshoot, osilasi, atau bahkan instabilitas.

Sebagai solusi terhadap permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan optimasi pengendali PID menggunakan Cuckoo Search Algorithm (CSA). CSA merupakan algoritma metaheuristik yang efisien dan adaptif, terinspirasi dari perilaku reproduksi burung cuckoo, dan telah terbukti unggul dalam proses pencarian solusi optimal. Dengan memanfaatkan CSA untuk proses tuning PID, diharapkan diperoleh konfigurasi parameter yang menghasilkan respon sistem lebih cepat, stabil, dan akurat. Selain itu, integrasi teknik anti-windup juga digunakan untuk mengatasi keterbatasan fisik sistem akibat saturasi aktuator, sehingga memperkuat stabilitas sistem kendali secara keseluruhan.

Sistem pengendalian motor DC merupakan suatu metode untuk mengatur performa motor DC melalui pengendalian arus pada kumparan jangkar (rotor) maupun medan (stator), atau keduanya, guna menghasilkan karakteristik gerak yang sesuai dengan kebutuhan. Dalam jurnal ini, sistem pengendalian tersebut dianalisis dan disimulasikan dengan pendekatan model matematis dinamis yang merepresentasikan komponen elektrik dan mekanik motor DC. Persamaan yang digunakan mencakup aspek torsi, kecepatan sudut, tegangan, serta arus yang saling berinteraksi, dan semuanya diterapkan melalui simulasi dengan perangkat lunak Simulink. Tujuan utama dari sistem ini adalah untuk memahami pengaruh parameter terhadap kinerja motor, sehingga memungkinkan pemilihan spesifikasi motor yang paling cocok bagi aplikasi tertentu berdasarkan hasil analisis karakteristik dinamisnya (Nguyen et al., 2018).

Keunggulan dari sistem pengendalian motor DC yang dijelaskan oleh (Shehab et al., 2018) ini terletak pada kemampuannya untuk memodelkan dan mensimulasikan karakteristik dinamis motor DC secara matematis menggunakan perangkat lunak Simulink, sehingga memungkinkan pengamatan mendalam terhadap pengaruh pengendalian arus jangkar, arus medan, maupun kombinasi keduanya. Dengan pendekatan ini, pengguna dapat memahami dan memprediksi respons sistem terhadap berbagai kondisi spesifikasi motor, serta menyesuaikan parameter sesuai kebutuhan aplikatif. Keunggulan lainnya adalah hasil simulasi yang terbukti konsisten dengan analisis matematis, memberikan validasi terhadap akurasi model, serta fleksibilitasnya untuk diterapkan pada jenis motor lainnya dengan hanya mengganti parameter input, menjadikan sistem ini sangat berguna bagi perancangan dan optimasi sistem penggerak dalam dunia industri dan pendidikan teknik

Dalam mengatur kecepatan motor DC agar sesuai dengan kebutuhan, dibutuhkan sistem kontrol yang mampu menyesuaikan respon motor secara otomatis. Salah satu metode yang paling banyak digunakan adalah sistem kontrol umpan balik, di mana kecepatan aktual motor dibandingkan dengan nilai referensi, lalu dilakukan koreksi jika ada selisih atau kesalahan. Sistem ini sangat penting supaya motor tetap bekerja stabil meskipun ada gangguan atau perubahan beban secara tiba-tiba (Al-Khazraji et al., 2024).

Kontrol yang umum dipakai dalam sistem seperti ini adalah kontrol PID (Proportional- Integral-Derivative). Kontrol PID bekerja dengan tiga komponen: proporsional untuk mengatasi kesalahan saat ini, integral untuk memperbaiki kesalahan yang sudah terjadi selama waktu tertentu, dan derivatif untuk memperkirakan kesalahan ke depan. Dengan kombinasi ini, sistem bisa memberikan respon cepat, menghindari lonjakan kecepatan yang berlebihan (overshoot), dan mempercepat waktu mencapai kecepatan stabil (settling time). Simulasi yang dilakukan oleh (Rahmania et al., 2019) menunjukkan bahwa kontrol PID mampu membuat sistem lebih stabil saat kecepatan diubah atau arah putaran motor dibalik.

Selain itu, dari penelitian (Al-Wesabi et al., 2022), diketahui bahwa implementasi kontrol PID dalam lingkungan simulasi seperti MATLAB/Simulink bisa bekerja sangat efektif, bahkan untuk kasus aplikasi nyata. Dengan bantuan sensor kecepatan dan arus, sistem kontrol bisa merespons kondisi yang berubah dengan cepat dan menjaga performa motor tetap optimal. Karena mudah diterapkan dan biayanya relatif murah, kontrol PID menjadi pilihan utama dalam banyak sistem otomatisasi, termasuk di bidang industri, robotika, dan sistem pembelajaran.

Selain itu, metode tracking juga sering digunakan untuk mengatasi masalah windup. Dalam pendekatan ini, output kendali dibatasi secara dinamis sesuai dengan batasan fisik sistem, sementara nilai integral terus dipantau dan diperhitungkan untuk mencegah akumulasi kesalahan yang berlebihan.

Dengan mengimplementasikan metode anti-windup yang tepat, pengendali PID dapat menjaga kinerjanya dalam batas yang diinginkan, mengurangi kemungkinan overshoot, osilasi, dan instabilitas yang disebabkan oleh fenomena windup. Oleh karena itu, pemahaman dan penerapan teknik anti-windup menjadi kunci penting dalam memastikan penggunaan pengendali PID yang efektif dan dapat diandalkan dalam berbagai aplikasi industri dan teknik kontrol modern.

Untuk menguji efektivitas tuning PID menggunakan Cuckoo Search Algorithm, dilakukan simulasi sistem kontrol kecepatan motor DC dengan menggunakan MATLAB Simulink. Simulasi ini dilakukan dalam tiga skenario utama, yaitu sistem tanpa kontroler, sistem dengan kontrol PID menggunakan metode trial-error, dan sistem dengan PID hasil tuning CSA.

Pada skenario pertama, yaitu tanpa kontroler, sistem menunjukkan respon yang sangat tidak stabil. Osilasi tinggi terjadi karena tidak adanya umpan balik yang membatasi laju putaran motor. Hal ini menunjukkan pentingnya keberadaan kontroler dalam sistem dinamis untuk menjamin kestabilan dan keselamatan sistem (Paris et al., 2011).

Skenario kedua menggunakan kontrol PID dengan metode trial-error. Meskipun sistem menunjukkan perbaikan dibandingkan tanpa kontrol, namun waktu stabilisasi masih cukup lama dan overshoot tidak dapat dieliminasi sepenuhnya. Kelemahan metode trial-error terletak pada ketergantungannya pada intuisi pengguna dan tidak adanya jaminan bahwa parameter yang diperoleh adalah optimal (Setiyoko & Yuliana, 2022).

Skenario ketiga menggunakan parameter PID yang dioptimasi dengan algoritma CSA. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mencapai kondisi steady-state dalam waktu sekitar 0.02 detik tanpa mengalami overshoot. Nilai-nilai ini diperoleh dari proses evolusi CSA dengan menggunakan fungsi objektif ITAE. Hasil ini menunjukkan bahwa CSA tidak hanya mampu menyesuaikan parameter PID dengan baik, tetapi juga menghasilkan performa sistem yang jauh lebih baik dibanding metode konvensional. Efektivitas CSA dalam tuning PID menunjukkan potensi besar algoritma ini untuk digunakan dalam berbagai sistem kendali dinamis, khususnya yang membutuhkan kecepatan respon dan akurasi tinggi (Setiyoko & Yuliana, 2022).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB Simulink. Sistem kendali kecepatan motor DC dimodelkan secara dinamis, dan diuji dalam tiga skenario: tanpa kontroler, dengan kontrol PID hasil tuning manual, serta dengan PID hasil optimasi menggunakan CSA. Evaluasi kinerja

dilakukan dengan membandingkan parameter rise time, settling time, overshoot, dan akurasi steady-state. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dan teoritis dalam pengembangan sistem kendali motor DC yang efisien dan andal.

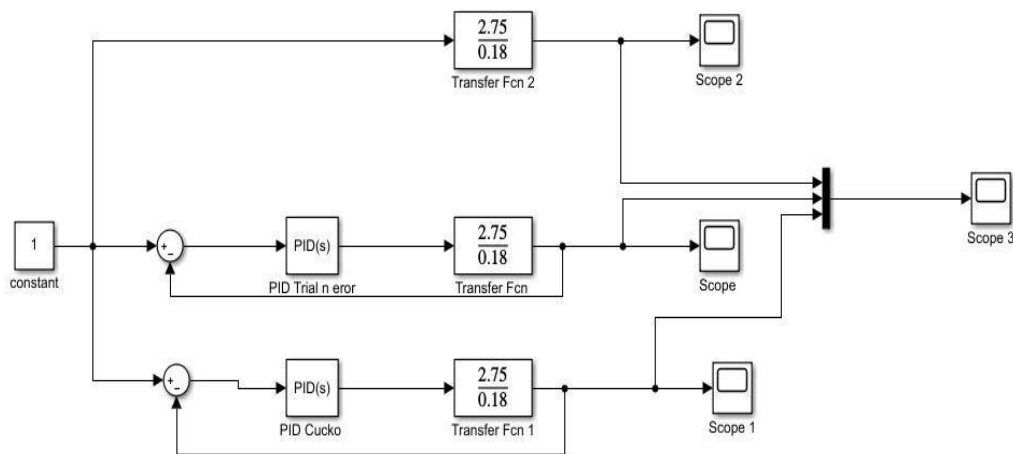
Metode pengumpulan data dalam penelitian ini melibatkan simulasi numerik yang dilakukan dengan perangkat lunak MATLAB Simulink. Simulasi ini digunakan untuk menguji beberapa skenario, termasuk sistem tanpa kontroler, dengan kontroler PID yang dituning secara manual, dan dengan kontroler PID yang dioptimalkan menggunakan algoritma Cuckoo Search. Setiap skenario memberikan data yang berbeda mengenai respons motor DC terhadap perubahan kecepatan referensi.

Data yang dikumpulkan dari simulasi mencakup waktu respons, overshoot, dan akurasi dalam mencapai nilai setpoint. Pengumpulan data ini penting untuk mengevaluasi efektivitas setiap metode pengendalian dan membandingkan performa sistem secara kuantitatif. Dengan cara ini, peneliti dapat menarik kesimpulan yang jelas mengenai kinerja masing-masing pendekatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Diagram simulasi dalam lingkungan Simulink MATLAB yang digunakan untuk membandingkan kinerja dua metode pengaturan parameter PID (Proportional-Integral-Derivative), yaitu metode trial and error (penalaan manual) dan metode optimasi menggunakan algoritma Cuckoo. Pada bagian awal, terdapat blok "Constant" yang berfungsi memberikan sinyal referensi atau input tetap bernilai 1. Sinyal ini kemudian dibagi ke tiga jalur berbeda: jalur tanpa pengendali, jalur dengan PID trial and error, dan jalur dengan PID Cuckoo.

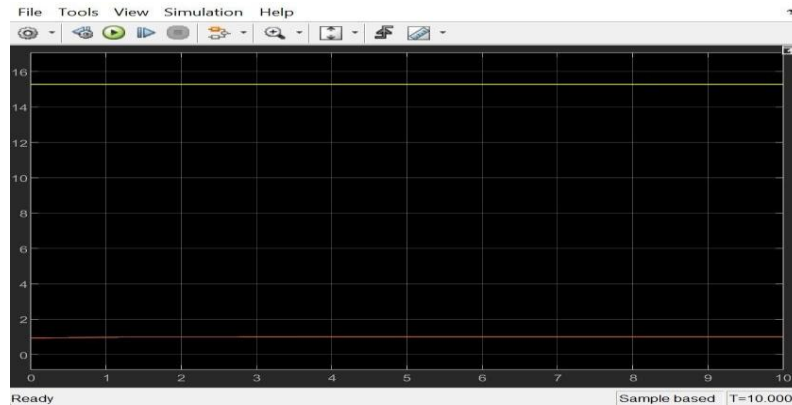
Hasil keluarannya ditampilkan melalui Scope 2. Jalur ini menggambarkan kondisi sistem tanpa adanya pengendali (open-loop). Jalur kedua merupakan implementasi PID dengan metode trial and error, di mana error dihitung dari selisih antara sinyal referensi dan output sistem. Nilai error ini kemudian diproses oleh kontroler PID, dilanjutkan ke plant yang sama, dan hasil keluarannya diamati pada Scope. Jalur ketiga hampir serupa, namun menggunakan kontroler PID yang dituning dengan algoritma Cuckoo, sebuah metode optimasi berbasis perilaku burung Cuckoo. Output dari jalur ini ditampilkan melalui Scope 1.



Gambar 1. Simulink MATLAB

Ketiga jalur output ini kemudian digabungkan dan ditampilkan dalam Scope 3 untuk keperluan perbandingan visual secara langsung. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk menilai performa masing-masing metode kontrol dalam hal kecepatan respon, kestabilan, overshoot, dan error steady state. Dengan membandingkan grafik pada Scope 3, dapat dianalisis metode tuning mana

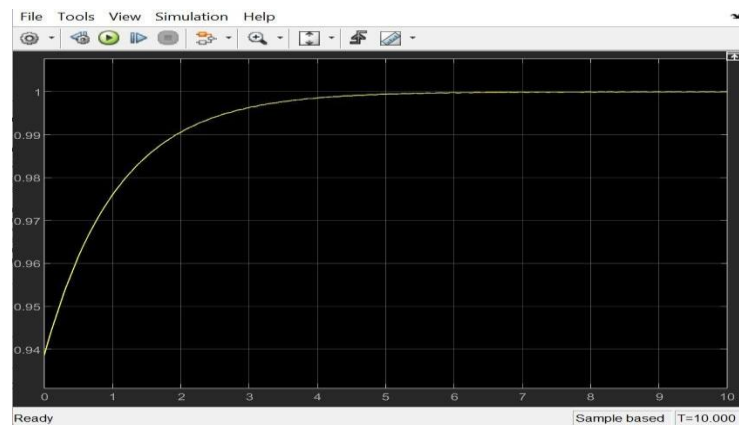
Simulasi pertama dilakukan pada sistem motor DC tanpa pengendali untuk melihat karakteristik dasar dari sistem terbuka.



Gambar 2. Sistem motor DC tanpa pengendali

Pada gambar 1 Hasilnya menunjukkan bahwa sistem tidak mampu mencapai nilai referensi, bahkan hanya mendekati 1.2 dari target kecepatan 16 (dalam skala Simulink). Kurva keluaran sistem tampak datar, tidak menunjukkan adanya usaha untuk menyesuaikan terhadap input. Hal ini menegaskan bahwa sistem terbuka tidak memiliki mekanisme koreksi, sehingga tidak mampu beradaptasi terhadap perubahan referensi maupun gangguan. Kondisi ini dapat menyebabkan kinerja sistem yang buruk, bahkan membahayakan dalam implementasi nyata karena tidak mampu menjamin kestabilan maupun keakuratan respon.

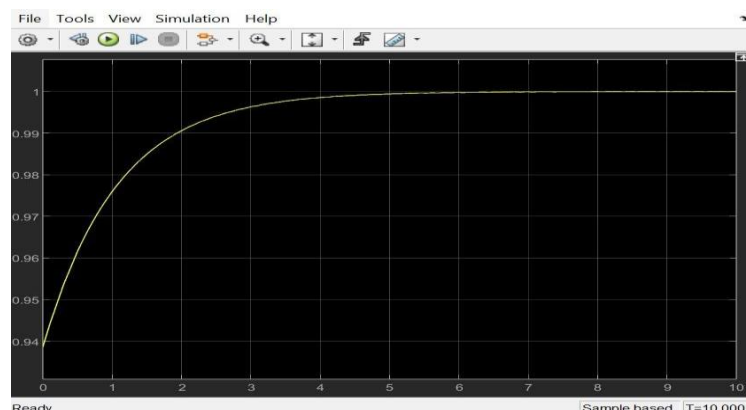
Pada skenario kedua, sistem dikendalikan oleh pengendali PID yang dituning menggunakan metode trial-and-error



Gambar 2. Pengendali PID metode trial-and-error

Hasil simulasi memperlihatkan perbaikan dibandingkan sistem terbuka. Output sistem mampu mendekati nilai referensi, dengan rise time sekitar 2 detik dan settling time sekitar 7 detik. Tidak terdapat overshoot signifikan, tetapi kecepatan sistem dalam mencapai kondisi tunak masih tergolong lambat. Selain itu, hasil tuning sangat bergantung pada pengalaman dan intuisi pengguna. Metode ini meskipun sederhana, tidak menjamin konsistensi hasil dan dapat menimbulkan inefisiensi waktu dalam proses desain sistem kendali.

Skenario ketiga menggunakan parameter PID yang dioptimasi melalui algoritma Cuckoo Search terlihat pada gambar 3



Gambar 3. Pengendali PID metode trial-and-error

Hasil simulasi menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan. Output sistem mencapai referensi secara cepat dan stabil, dengan rise time sekitar 1 detik, settling time kurang dari 3 detik, dan tanpa overshoot. Hal ini menunjukkan bahwa CSA berhasil menemukan kombinasi parameter PID yang optimal dalam waktu tuning yang relatif cepat. Selain itu, respons sistem menjadi lebih halus dan adaptif, menandakan keberhasilan CSA dalam menghindari jebakan lokal minima yang umum terjadi pada metode konvensional.

CSA bekerja dengan meminimalkan fungsi objektif berbasis ITAE (Integral Time Absolute Error), sehingga secara otomatis menghasilkan parameter yang meminimalkan error sepanjang waktu. Keunggulan lain dari CSA adalah kemampuannya melakukan eksplorasi global dan lokal secara efisien, berkat penggunaan mekanisme Levy flight dalam pencarian solusi.

Tabel 1 berikut merangkum hasil simulasi dari ketiga skenario:

Skenario	Rise Time	Setting Time	Overshoot	Ketepatan
Tanpa Kontroler (Gambar 1)	-	-	-	Sangat Rendah
PID Trial Error (Gambar 2)	±2 detik	±7 detik	Rendah	Baik
PID+CSA (Gambar 3)	±1 detik	<3 detik	0%	Sangat baik

Dari tabel 1, terlihat bahwa sistem dengan PID hasil tuning CSA memiliki keunggulan dalam semua parameter evaluasi. Waktu naik dan waktu stabilisasi lebih singkat, tidak terdapat overshoot, dan tingkat akurasi mencapai level optimal. Hal ini membuktikan bahwa algoritma CSA lebih efisien dan efektif dibanding tuning manual.

Salah satu aspek penting dalam sistem kendali PID adalah pengaruh fenomena windup. Pada pengendali PID konvensional, saat aktuator mencapai batas saturasi, akumulasi kesalahan integral tetap berlangsung, yang dapat mengganggu kestabilan sistem. Dalam simulasi ini, pendekatan anti-windup diterapkan bersamaan dengan tuning CSA untuk mengatasi fenomena tersebut. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem tetap stabil tanpa overshoot meskipun terjadi kondisi batas. Hal ini menandakan bahwa teknik anti-windup berperan penting dalam menjaga respons sistem tetap terkendali, terutama pada sistem kendali motor DC yang rawan terhadap lonjakan sinyal.

Hasil yang diperoleh dari simulasi menunjukkan bahwa CSA merupakan pendekatan yang sangat potensial untuk tuning parameter PID secara otomatis. Tidak hanya memberikan performa sistem yang optimal, CSA juga mengurangi waktu eksperimen dan ketergantungan terhadap intuisi pengguna. Dalam implementasi nyata, teknik ini dapat diadaptasi untuk berbagai sistem dinamis lainnya, termasuk motor induksi, motor BLDC, atau sistem kontrol non-linier. Selain itu, integrasi lebih lanjut dengan kontroler cerdas seperti fuzzy-PID atau ANFIS juga dapat menjadi arah penelitian selanjutnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan Cuckoo Search Algorithm (CSA) sebagai metode optimasi untuk tuning pengendali PID pada sistem pengaturan kecepatan motor DC memberikan peningkatan performa yang signifikan dibanding metode tuning manual (trial and error). Model pengendali PID yang dioptimasi dengan CSA mampu menghasilkan respons sistem yang lebih cepat, akurat, dan stabil, ditunjukkan dengan nilai rise time sekitar 1 detik, settling time di bawah 3 detik, serta tanpa overshoot.

Selain itu, penerapan fitur anti-windup terbukti efektif dalam menjaga kestabilan sistem saat terjadi saturasi aktuator, sehingga menghindari efek negatif dari fenomena windup yang umum terjadi pada pengendali integral. Dari sisi efisiensi komputasi, pendekatan berbasis CSA juga mengurangi ketergantungan pada pengalaman pengguna dan mempercepat proses tuning tanpa mengorbankan akurasi sistem.

Dengan demikian, kombinasi pengendali PID, algoritma Cuckoo Search, dan teknik anti-windup menjadi solusi yang menjanjikan untuk pengendalian kecepatan motor DC secara optimal dan adaptif. Pendekatan ini juga berpotensi untuk diterapkan pada berbagai sistem kendali dinamis lainnya dalam bidang teknik kontrol dan otomasi.

REFERENSI

- Adel, T., Hichem, S., & Abdelkader, C. (2019). Cuckoo Search Algorithm and TS Fuzzy Models for PID Control. *2019 International Conference on Signal, Control and Communication, SCC 2019*, 331–336. <https://doi.org/10.1109/SCC47175.2019.9116153>
- Al-Khazraji, H., Guo, W., & Humaidi, A. J. (2024). Improved Cuckoo Search Optimization for Production Inventory Control Systems. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 21(2), 187–200. <https://doi.org/10.2298/SJEE2402187A>
- Al-Wesabi, I., Fang, Z., Hussein Farh, H. M., Al-Shamma'a, A. A., Al-Shaalan, A. M., Kandil, T., & Ding, M. (2022). Cuckoo Search Combined with PID Controller for Maximum Power Extraction of Partially Shaded Photovoltaic System. *Energies*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/en15072513>
- Dhal, K. G., Das, A., Ray, S., & Das, S. (2019). A Clustering Based Classification Approach Based on Modified Cuckoo Search Algorithm. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 29(3), 344–359. <https://doi.org/10.1134/S1054661819030052>
- 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 pida 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>
- Nguyen, T. T., Ngoc Vo, D., Vu Quynh, N., & Van Dai, L. (2018). Modified cuckoo search algorithm: A novel method to minimize the fuel cost. *Energies*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/en11061328>
- Paris, B., Eynard, J., Grieu, S., & Polit, M. (2011). Hybrid PID-fuzzy control scheme for managing energy resources in buildings. *Applied Soft Computing Journal*, 11(8), 5068–5080. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.05.052>
- Puangdownreong, D. (2018). Optimal PID controller design for DC motor speed control system with tracking and regulating constrained optimization via cuckoo search. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 13(1), 460–467. <https://doi.org/10.5370/JEET.2018.13.1.460>
- Rahmania, Z. S., Syafa'ah, L., Pakaya, I., & Zulfatman. (2019). Optimization of overcurrent relay coordination using cuckoo search algorithm in electronic induction systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 674(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/674/1/012037>
- Riduwan, M., Hunaini, F., & Mukhsim, M. (2019). Sistem Kontrol Governor Menggunakan Pid Yang Dioptimasi Dengan Metode Cuckoo Search Algorithm (Csa). *JEEE-U (Journal of Electrical and Electronic Engineering-UMSIDA)*, 3(1), 162–205. <https://doi.org/10.21070/jeee-u.v3i1.2090>
- 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>
- Shehab, M., Tajudin Khader, A., & Laouchedi, M. (2018). A HYBRID METHOD BASED ON CUCKOO SEARCH ALGORITHM FOR GLOBAL OPTIMIZATION PROBLEMS 1. In *Journal of Information and Communication Technology* (Vol. 17, Issue 3).
- Zhang, X., Zhang, S., Dong, W., & Wang, K. (2022). A Novel Time Synchronization Method for Smart Grid Based on Improved Wolf Colony Algorithm-Cuckoo Search Optimized Fuzzy PID Controller. *IEEE Access*, 10, 116959–116971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3219933>