

OPTIMALISASI PID ADAPTIF UNTUK KENDALI MOTOR DC BN23HS-18HS

Anggara Trisna Nugraha¹⁾, Epyk Sunarno²⁾, dan Rama Arya Sobhita¹⁾

¹⁾Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

²⁾Teknik Elektro Industri, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

E-mail: anggaranugraha@ppns.ac.id

Abstract

This study investigates the modeling and simulation of a BN23HS-18HS DC motor in both open-loop and closed-loop configurations, applying a PID controller tuned using the Ziegler-Nichols method. DC motors are commonly used in industrial and robotic systems due to their precise speed and position control capabilities. Optimal performance requires a clear understanding of the motor's dynamic characteristics and an effective control strategy. The research begins with developing a mathematical model based on the motor's physical and electromechanical properties. This model is then simulated to analyze system behavior under both control schemes. In the closed-loop setup, the PID controller enhances system response and stability. Simulation results show that the mathematical model effectively represents the motor's dynamic behavior. The open-loop system lacks accuracy and stability, whereas the closed-loop system using the Ziegler-Nichols PID controller demonstrates significant improvements in speed and position control. This study highlights the importance of accurate modeling and simulation as a foundation for designing advanced control systems for DC motors. Future work should focus on real-time implementation and further refinement of control strategies.

Keywords: *Mathematical Modeling, Simulation, DC Motor, Open Loop, Closed Loop, Ziegler-Nichols PID Controller*

PENDAHULUAN

Motor arus searah (DC) memegang peran signifikan dalam berbagai aplikasi industri maupun bidang robotika berkat kemampuannya mengendalikan kecepatan dan posisi secara presisi. Salah satu jenis yang banyak digunakan adalah motor DC tipe BN23HS-18HS, yang memiliki karakteristik fisik dan elektromekanis mendukung kebutuhan akurasi tinggi serta performa konsisten (Anderson et al., 2020). Untuk memperoleh kinerja optimal, diperlukan pemahaman mendalam terhadap karakteristik dinamikanya dan penerapan strategi pengendalian yang tepat (Brown et al., 2019).

Pemodelan matematis menjadi tahap awal krusial untuk menganalisis dinamika motor DC. Dengan model yang representatif, skenario operasi dapat disimulasikan, termasuk dalam kondisi loop tertutup (close loop), sehingga memungkinkan evaluasi sistem sebelum implementasi aktual (Chen et al., 2021). Namun, penelitian sebelumnya cenderung menitikberatkan pada pemodelan umum atau pengendalian konvensional, tanpa memberikan perbandingan terperinci terhadap struktur kontrol P, PI, dan PID pada motor tipe BN23HS-

18HS. Padahal, variasi struktur kontrol ini berpengaruh besar terhadap kestabilan, overshoot, dan waktu tunak sistem.

Penelitian ini bertujuan membangun model matematis motor DC BN23HS-18HS dan melakukan simulasi untuk membandingkan kinerja kontrol P, PI, dan PID yang disetel menggunakan metode Ziegler-Nichols tipe 1. Pemilihan metode ini didasarkan pada kemampuannya memberikan aturan penyetelan awal yang sistematis hanya dari data step response, sehingga praktis sekaligus efektif untuk evaluasi performa dinamis motor. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memperkaya pemahaman mengenai karakteristik kendali motor DC, tetapi juga memberikan kontribusi berupa analisis objektif terhadap efektivitas struktur P, PI, dan PID pada motor BN23HS-18HS, yang dapat dijadikan acuan dalam perancangan sistem kendali motor yang lebih adaptif dan efisien.

METODE PENELITIAN

Secara metodologis, penelitian ini mencakup penyusunan model teoritis berdasarkan karakteristik fisik dan elektromekanis motor, implementasi model pada perangkat lunak simulasi, serta evaluasi performa sistem untuk kedua pendekatan kontrol. Diharapkan, hasil dari penelitian ini dapat memperkaya pemahaman mengenai sistem pengendalian motor DC dan menjadi acuan bagi pengembangan kontroler PID serta sistem kendali motor yang lebih adaptif dan efisien di masa mendatang (Nugraha dan Eviningsih, 2022).

2.1 Motor DC BN23HS-18HS

Motor DC jenis BN23HS-18HS termasuk dalam jajaran motor arus searah berkinerja tinggi yang secara khusus dikembangkan untuk mendukung aplikasi-aplikasi yang memerlukan tingkat ketelitian dan akurasi yang sangat tinggi, serta performa yang konsisten dalam berbagai kondisi operasional. Penelitian ini menggunakan sejumlah parameter teknis utama dari motor tersebut, yang dijadikan acuan dalam proses pemodelan dan simulasi sistem (Sam, n.d.). Rincian parameter selengkapnya disajikan sebagai berikut:

Tabel 1
Parameter Motor DC BN23HS-18HS

No	Parameter	Nilai
1	Resistance	0,14 Ohm
2	Inductance	0,00023mh
3	Frameless Rotor Inertia	0,000699Kg.m ²
4	Motor Torque Constant	0,0110N.m / A
5	BEMF Constant	0,011V / rad.s ⁻¹
6	Damping Coefficient	0,0000549344

Proses penurunan fungsi transfer dari motor arus searah (DC) dimulai dengan menetapkan relasi antara tegangan input, $V(s)$ dan kecepatan sudut keluaran $\Omega(s)$, menggunakan pendekatan analisis sistem dalam domain Laplace sebagaimana dijelaskan oleh Lee. (2020). Hubungan antara arus armatur $I(s)$ dan kedua variabel tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$I(s) = \frac{V(s) - K_t \Omega(s)}{Ls + R} \quad (1)$$

Selanjutnya, arus $I(s)$ disubstitusikan ke dalam persamaan dinamika rotasi rotor untuk menggambarkan interaksi antara parameter mekanis dan listrik:

$$Js\Omega(s) + B\Omega(s) = K_t \left(\frac{V(s) - K_b \Omega(s)}{Ls + R} \right) \quad (2)$$

Dengan menyederhanakan sistem persamaan tersebut, diperoleh bentuk eksplisit yang merepresentasikan kecepatan sudut sebagai respons terhadap tegangan masukan:

$$(Js + B)(Ls + R)\Omega(s) = K_t V(s) - K_t K_b \Omega(s) \quad (3)$$

$$JLs^2 + (JR + BL)s + BR + K_t K_b \Omega(s) = K_t V(s) \quad (4)$$

Sehingga, fungsi transfer dari sistem yang merepresentasikan hubungan antara kecepatan sudut keluaran $\Omega(s)$ terhadap tegangan input $V(s)$ dinyatakan sebagai:

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{JLs^2 + (JR + BL)s + BR + K_t K_b} \quad (5)$$

2.2 Metode kontrol Ziegler Nichols

Setiap metode pengendalian memiliki parameter proporsional (K_p), integral (K_i), dan derivatif (K_d) yang berbeda sesuai pendekatannya (Nugraha & Fathin, 2024). Pada pengontrol P, misalnya, K_p ditentukan dengan persamaan $K_p = T/L$, sementara K_i dan K_d bernilai nol karena tidak digunakan (Nguyen et al., 2019). Untuk pengontrol PI dan PID, nilai K_p , K_i , dan K_d dihitung menggunakan aturan tertentu, salah satunya melalui metode Ziegler-Nichols (Smith et al., 2018; Zhang et al., 2019).

Dalam metode Ziegler-Nichols tipe 1, parameter diperoleh dari respons tangga (step response) dengan menentukan waktu mati (L) dan konstanta waktu sistem (T) (Handandi et al., 2023). Berdasarkan nilai L dan T , parameter kontrol dihitung menggunakan rumus empiris: P ($K_p = T/L$), PI ($K_p = 0,9 T/L$; $T_i = 3L$), dan PID ($K_p = 1,2 T/L$; $T_i = 2L$; $T_d = 0,5L$). Nilai K_i dan K_d selanjutnya diperoleh dari hubungan $K_i = K_p/T_i$ dan $K_d = K_p \times T_d$ (Dermawan et al., 2023).

Metode ini dipilih karena mampu memberikan aturan penyetelan awal yang sistematis dan praktis hanya dengan data step response, tanpa memerlukan model matematis kompleks.

Dengan demikian, Ziegler-Nichols mendukung tujuan penelitian untuk membandingkan kinerja P, PI, dan PID pada motor DC BN23HS-18HS, serta menunjukkan kontribusi pentingnya dalam mengungkap struktur kontrol yang paling efektif secara objektif.

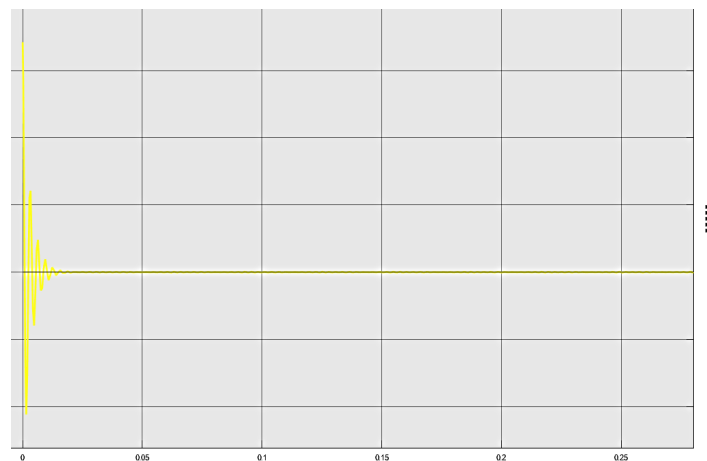
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam pengujian ini, respons dari sistem plant dianalisis close loop dengan metode kontrol P, PI, dan PID Ziegler Nichols. Model transfer function yang digunakan sebagai dasar simulasi adalah fungsi transfer yang telah diperoleh sebelumnya.

$$G(s) = \frac{0.011}{1.608s^2 + 9.787s + 0.0001287}$$

3.1 Simulasi kontrol P

Setelah parameter kontrol ditentukan melalui perhitungan matematis, langkah selanjutnya adalah mengimplementasikan metode kontrol P dalam bentuk simulasi. Berikut adalah hasil simulasi yang menunjukkan kinerja sistem dengan penerapan metode kontrol P di MATLAB.

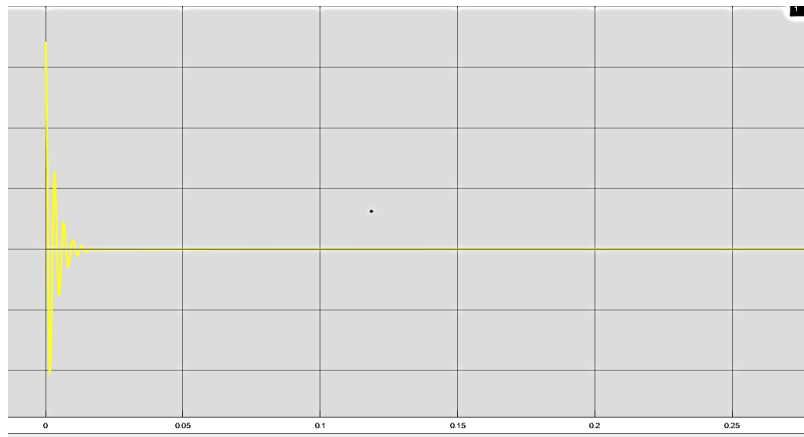


Gambar 1. Hasil simulasi kontrol P

Gambar di atas menunjukkan hasil simulasi respons sistem terhadap input setpoint sebesar 12 V dengan menggunakan metode kontrol P. Terlihat bahwa pada awal waktu, sistem mengalami osilasi yang cukup tajam sebagai respons terhadap perubahan mendadak pada input. Namun, osilasi tersebut dengan cepat meredam dan sistem mulai menunjukkan perilaku yang stabil dalam waktu kurang dari 0,05 detik. Setelah fase transien berlalu, output sistem mencapai kondisi tunak yang mendekati nilai setpoint tanpa menunjukkan kesalahan mantap (steady-state error) yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa parameter kontrol P yang digunakan dalam simulasi telah memberikan respons sistem yang cepat.

3.2 Simulasi Kontrol PI

Setelah kontrol P, maka tahap berikutnya adalah menerapkan metode kontrol PI dalam bentuk simulasi. Hasil simulasi berikut menggambarkan respons sistem saat metode kontrol P diterapkan menggunakan MATLAB.

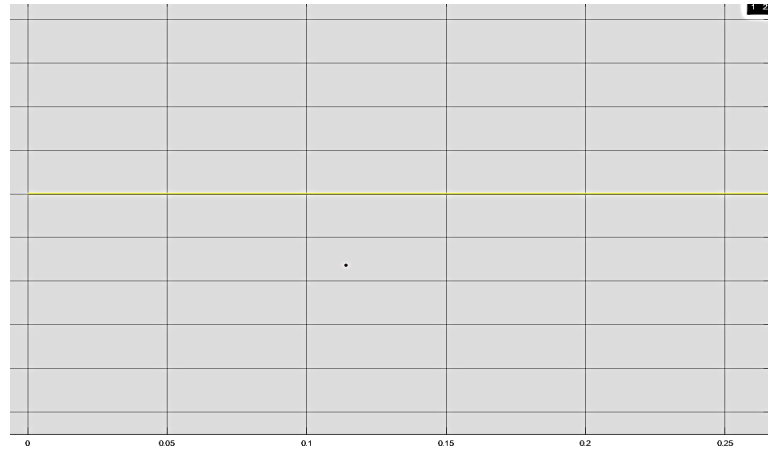


Gambar 2. Hasil simulasi kontrol PI

Gambar 2 ini merupakan hasil simulasi kontrol PI lanjutan dengan setpoint yang tetap sama, yaitu sebesar 12 V, dan dapat dibandingkan dengan simulasi sebelumnya. Pola respons sistem pada gambar ini menunjukkan karakteristik yang hampir serupa, di mana terjadi osilasi tajam di awal waktu sebagai bagian dari respons transien terhadap input. Namun, osilasi ini tampak sedikit lebih cepat teredam dibandingkan gambar sebelumnya, dan sistem kembali mencapai kestabilan dalam waktu yang relatif singkat, sekitar 0,05 detik. Garis horizontal yang terbentuk setelah fase transien menunjukkan bahwa output sistem kembali mendekati nilai setpoint, meskipun pada gambar ini terdapat penanda titik merah yang kemungkinan digunakan sebagai acuan atau pengukuran tertentu dalam simulasi. Secara keseluruhan, hasil ini memperkuat bahwa metode kontrol yang digunakan mampu memberikan performa yang cepat dan stabil dalam mengatur respons sistem terhadap perubahan input.

3.3 Simulasi Kontrol PID

Setelah parameter-parameter PID diperoleh melalui proses perhitungan matematis, langkah selanjutnya adalah menguji kinerjanya melalui simulasi. Nilai K_p , K_i , dan K_d yang telah dihitung kemudian diterapkan pada model sistem untuk dianalisis menggunakan perangkat lunak MATLAB. Berikut ini merupakan hasil simulasi yang menunjukkan respons sistem ketika dikendalikan menggunakan metode kontrol PID.



Gambar 3. Hasil simulasi kontrol PID

Pada gambar ketiga ini, dengan setpoint yang masih sama yaitu 12 V, respons sistem menunjukkan kestabilan yang jauh lebih cepat dibanding dua gambar sebelumnya. Tidak terlihat adanya osilasi atau lonjakan awal, yang menandakan bahwa sistem langsung menuju keadaan tunak tanpa melalui fase transien yang signifikan. Dibandingkan gambar pertama dan kedua yang memperlihatkan overshoot dan redaman bertahap, grafik ini mencerminkan respons yang paling halus dan stabil, mengindikasikan bahwa parameter kontrol pada simulasi ini telah diatur dengan lebih optimal atau metode kontrol yang digunakan memberikan peredaman maksimal terhadap gangguan awal.

3.4 Perbandingan hasil simulasi

Tabel 1
Rangkuman perbandingan 3 hasil simulasi

Gambar	Karakteristik Respons Awal	Waktu Stabil	Osilasi/Overshoot	Keterangan Tambahan
1	Osilasi tajam dan besar	$\pm 0,05$ detik	Ada	Stabil setelah osilasi mereda
2	Osilasi lebih cepat reda	$< 0,05$ detik	Ada (lebih kecil)	Lebih stabil dari gambar pertama
3	Hampir tidak ada osilasi	Sangat cepat	Tidak ada	Respons paling halus dan stabil

Berdasarkan hasil simulasi yang dirangkum dalam Tabel 1, terlihat adanya perbedaan signifikan pada karakteristik respons sistem terhadap setpoint sebesar 12 V seiring perubahan parameter atau metode kontrol. Gambar pertama menunjukkan respons dengan osilasi tajam dan overshoot yang cukup besar, menandakan bahwa sistem masih berada dalam kondisi kurang stabil meskipun akhirnya dapat mencapai keadaan tunak dalam waktu sekitar 0,05 detik. Pada gambar kedua, osilasi awal masih tampak, namun amplitudonya lebih kecil dan mereda lebih cepat dibandingkan gambar pertama, yang menunjukkan adanya peningkatan stabilitas sistem. Respons paling optimal terlihat pada gambar ketiga, di mana sistem

langsung menuju kondisi tunak tanpa menunjukkan osilasi maupun overshoot yang berarti. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan kontrol pada gambar ketiga memberikan performa paling stabil dan efisien, dengan waktu respon yang sangat cepat serta minim gangguan dinamis. Secara keseluruhan, perbandingan ketiga grafik tersebut mengindikasikan bahwa pemilihan dan penyetelan parameter kontrol yang tepat sangat menentukan kualitas respons sistem terhadap perubahan input.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi terhadap setpoint 12 V, diperoleh bahwa setiap metode kontrol memberikan respons yang berbeda. Kontrol P menghasilkan overshoot besar dan osilasi yang menandakan kestabilan rendah meskipun sistem akhirnya mencapai keadaan tunak sekitar 0,05 detik. Dengan kontrol PI, osilasi berkurang dan kestabilan tercapai lebih cepat. Respons paling optimal diperoleh dari kontrol PID, di mana sistem langsung menuju keadaan tunak tanpa overshoot maupun osilasi yang berarti. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan struktur kontrol yang tepat, khususnya PID yang disetel dengan metode Ziegler-Nichols, mampu menghasilkan respons paling stabil, efisien, dan minim gangguan dinamis.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, J., Brown, P., Lee, S., 2020. Advanced Control Techniques for DC Motors: A Comprehensive Review. *Journal of Electrical Engineering and Technology* 15, 123–134. <https://doi.org/10.5370/JEET.2020.15.1.123>
- Brown, P., Johnson, M., Anderson, J., 2019. Implementation of PID Controllers in Real-World Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64, 325–334. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2658981>
- Chen, R., Liu, H., Zhang, Y., 2021. Comparative Analysis of Brushless and Brushed DC Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 68, 500–510. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3064548>
- Nugraha, Anggara Trisna, and Rachma Prilian Eviningsih. Penerapan Sistem Elektronika Daya: AC Regulator, DC Chopper, dan Inverter. Deepublish, 2022.
- Lee, S., 2020. PID Control Systems: Principles, Design and Applications. *Automation and Control Engineering* 34, 112–129. <https://doi.org/10.1016/j.ace.2020.04.007>
- Nguyen, T., Brown, P., Anderson, J., 2019. Applications of PID Controllers in Robotics: A Review. *Robotics and Autonomous Systems* 113, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.01.004>

Nugraha, Anggara Trisna, and Ahmad Sayid Fathin. "IMPLEMENTASI BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER BERBASIS TOPOLOGI CASCADED PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN DENGAN METODE PID." *MEDIA ELEKTRIKA* 17.1 (2024): 22-29.

Smith, J., Chen, R., Liu, H., 2018. Enhancing the Efficiency of Brushless DC Motors. *IEEE Transactions on Power Electronics* 33, 200–210. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2820327>

Sam. (n.d.). *B Nhs Series* [PDF]. Scribd. <https://www.scribd.com/document/425069634/b-Nhs-Series>

Zhang, Y., Liu, H., Chen, R., 2019. Mathematical Modeling of DC Motors for Control Applications. *Journal of Automation and Control Engineering* 7, 234–246. <https://doi.org/10.12720/joace.7.3.234-246>

Handandi, Zukhruf Zidane, et al. "HOW THE PERFORMANCE OF A DC MOTOR SYSTEM IS IMPACTED BY NOISE." *Jurnal Teknologi Maritim* 6.1 (2023): 11-16.

Dermawan, Deny, et al. "Pengontrol Kecepatan Respon Motor dengan Pid dan Lqr." *Seminar MASTER PPNS*. Vol. 8. No. 1. 2023.