



## Analisis Respons Transien Motor DC terhadap Perubahan Beban Menggunakan Kontrol PI

**Michael Oklando Sihotang<sup>1</sup>, Takwa Padang<sup>2</sup>, Roihan Parli Lubis<sup>3</sup>, Desman Jonto Sinaga<sup>4</sup>, Arwadi Sinuraya<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Elektro, Universitas Negeri Medan, Negara Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Elektro, Universitas Negeri Medan, Negara Indonesia

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Elektro, Universitas Negeri Medan, Negara Indonesia

<sup>4</sup>Program Studi Teknik Elektro, Universitas Negeri Medan, Negara Indonesia

<sup>5</sup>Program Studi Teknik Elektro, Universitas Negeri Medan, Negara Indonesia

Email : [michaelsihotang225@gmail.com](mailto:michaelsihotang225@gmail.com)<sup>1</sup>, [padangkujun80@gmail.com](mailto:padangkujun80@gmail.com)<sup>2</sup>, [roihan360p@gmail.com](mailto:roihan360p@gmail.com)<sup>3</sup>, [desmansinaga@unimed.com](mailto:desmansinaga@unimed.com)<sup>4</sup>, [arwadisinuraya@unimed.ac.id](mailto:arwadisinuraya@unimed.ac.id)<sup>5</sup>

Alamat: Jln. Willem Iskandar, Pasar V, Percut Sei Tuan, Deli Serdang, Sumatera Utara

\*Penulis Korespondensi: [michaelsihotang225@gmail.com](mailto:michaelsihotang225@gmail.com)

**Abstract.** This study analyzes the transient response of a DC motor to load variations using a Proportional-Integral (PI) controller implemented through MATLAB/Simulink simulation. The DC motor is modeled using a transfer function and tested under three conditions: without controller, with PI controller tuned by PID Tune ( $PI_1$  and  $PI_2$ ), and with a step load disturbance applied at  $t = 3$  seconds. Performance is evaluated based on rise time, peak time, overshoot, settling time, steady-state error, and recovery time. The results show that the system without control is highly sensitive to load changes, exhibiting a large steady-state error and a significant speed drop. The application of PI control improves system stability and accuracy;  $PI_1$  reduces the steady-state error to 1.65% (no-load) and 2.71% (with load) with minimal overshoot, while  $PI_2$  provides faster response with very low steady-state error (0.28% no-load and 0.27% with load) at the expense of slightly higher overshoot. Overall, PID Tune is effective in generating stable PI parameters, where  $PI_2$  achieves the best performance in response speed and accuracy, and  $PI_1$  is more favorable in minimizing overshoot.

**Keywords:** DC motor; PI control; transient response; load variation; PID Tune

**Abstrak.** Penelitian ini menganalisis respons transien motor arus searah (DC) terhadap perubahan beban menggunakan pengendali Proportional-Integral (PI) berbasis simulasi MATLAB/Simulink. Model motor DC direpresentasikan dalam bentuk fungsi alih dan diuji pada kondisi tanpa pengendali, dengan PI hasil penalaan PID Tune ( $PI_1$  dan  $PI_2$ ), serta dengan gangguan beban berbentuk sinyal step pada  $t = 3$  detik. Parameter kinerja yang dievaluasi meliputi rise time, peak time, overshoot, settling time, steady-state error, dan recovery time. Hasil menunjukkan bahwa sistem tanpa pengendali sangat sensitif terhadap beban dengan steady-state error yang besar dan penurunan kecepatan yang signifikan. Penerapan PI mampu meningkatkan kestabilan dan akurasi;  $PI_1$  menurunkan steady-state error hingga 1,65% (tanpa beban) dan 2,71% (dengan beban) dengan overshoot minimal, sedangkan  $PI_2$  menghasilkan respons lebih cepat dengan error yang sangat kecil (0,28% tanpa beban dan 0,27% dengan beban) pada kompromi peningkatan overshoot. Secara keseluruhan, PID Tune efektif menghasilkan parameter PI yang stabil, dan konfigurasi  $PI_2$  memberikan kinerja terbaik dari sisi kecepatan respons dan akurasi, sementara  $PI_1$  lebih unggul dalam minimisasi overshoot

**Kata kunci:** motor DC; kontrol PI; respons transien; perubahan beban; PID Tune

### LATAR BELAKANG

Motor DC banyak digunakan pada berbagai aplikasi industri dan sistem kendali karena mudah dikendalikan dan memiliki respons dinamis yang cepat. Namun, perubahan beban yang terjadi secara tiba-tiba dapat mengganggu kestabilan kecepatan motor dan menurunkan performa sistem, sehingga diperlukan pengendali yang mampu menjaga kecepatan tetap sesuai referensi(Esario and Yuhendri 2020; Ushofa and Anifah 2022; View of Pengendali Kecepatan

Sudut Motor DC Menggunakan Kontrol PID dan Tuning Ziegler Nichols n.d.). Kontrol Proportional-Integral (PI) menjadi pilihan umum karena strukturnya sederhana dan mampu menghilangkan error keadaan tunak, meskipun efektivitasnya sangat bergantung pada ketepatan penentuan parameter  $K_p$  dan  $K_i$ . Dalam penelitian ini, penalaan parameter PI dilakukan menggunakan fitur PID Tune pada MATLAB untuk memperoleh parameter secara otomatis dan stabil tanpa proses trial-and-error(Athoillah et al. 2021; Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan Pengendali PID dengan Encoder sebagai Feedback \_ Nurkholis Putera \_ STRING (Satuan Tulisan Riset dan Inovasi Teknologi) n.d.). Analisis difokuskan pada respons transien motor DC terhadap perubahan beban melalui simulasi MATLAB, mencakup rise time, peak time, overshoot, settling time, dan steady-state error, guna mengevaluasi kemampuan kontrol PI dalam mempertahankan kestabilan kecepatan motor saat terjadi gangguan beban(Rahmadi and Yuhendri 2020; Wibowo 2020).

## **KAJIAN TEORITIS**

### **Dasar motor DC dan kebutuhan kendali**

Motor Arus Searah (DC) adalah jenis mesin listrik yang populer digunakan di sektor industri dan transportasi, seperti dalam aplikasi *Unmanned Ground Vehicle* (UGV) di bidang pertanian. Keunggulan utama motor DC terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan torsi awal yang besar dan kemudahan untuk mengatur kecepatan putaran dalam rentang yang luas. Meskipun motor DC bergerak dengan kecepatan konstan saat diberi tegangan, pengendalian kecepatan yang akurat sangat krusial untuk memastikan kinerja motor sesuai dengan kebutuhan *plant* dan memaksimalkan efektivitas operasional, terutama saat berhadapan dengan variasi beban(Hamoodi, Flayyih, and Hamad 2020). Terdapat juga Motor DC Tanpa Sikat (*Brushless DC/BLDC*), yang sangat diminati karena efisiensi tinggi, karakteristik torsi yang superior, dan beroperasi pada rentang kecepatan yang sangat lebar tanpa kelemahan sikat. Dalam perancangan kontroler BLDC, beberapa indikator performa yang menjadi fokus adalah arus awal, torsi awal, dan waktu.

### **Pengendali PID: konsep dan fungsi**

Pengendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*) adalah algoritma kontrol yang paling banyak diadopsi dalam berbagai aplikasi teknik karena fungsionalitasnya yang sederhana, jelas, dan mudah diimplementasikan(Ibrahim, Hamoodi, and Salih 2020; Manuel, İnanç, and Lüy 2023). Fungsi utamanya adalah mengatur dan menstabilkan kecepatan sudut motor DC sehingga selalu mencapai nilai referensi (*set-point*) yang telah ditetapkan, terutama dalam sistem kendali lingkaran tertutup (*closed-loop*). Kontroler PID dibentuk dari kombinasi tiga aksi kontrol yang bekerja secara paralel untuk saling menutupi kelebihan dan kekurangan satu sama lain. Sinyal

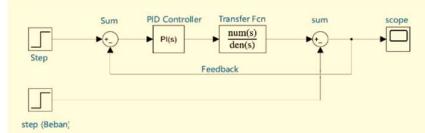
keluaran kontroler  $u(t)$  yang diterapkan pada aktuator dihitung berdasarkan sinyal kesalahan  $e(t)$  dalam domain waktu melalui persamaan:

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

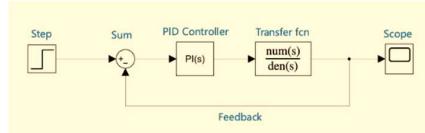
Di mana  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  adalah koefisien konstanta Proportional, Integral, dan Derivative, sementara  $e(t)$  merupakan perbedaan antara nilai acuan dan nilai sebenarnya. Pengaturan kecepatan motor DC yang optimal bergantung pada penentuan nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  yang tepat. Salah satu metode tuning yang umum digunakan adalah Tuning Ziegler-Nichols. Metode ini terbukti menghasilkan nilai koefisien parameter PID yang spesifik untuk tujuan perbaikan respons sistem. Secara umum, setiap parameter memiliki karakteristik yang unik terhadap respons sistem(Almawla, Hussein, and Abdullah 2024; Hafizh n.d.; Ibrahim et al. 2020).

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan simulasi berbasis pemodelan matematis, di mana motor DC direpresentasikan dalam bentuk fungsi alih dan dianalisis secara komprehensif menggunakan MATLAB/Simulink. Seluruh eksperimen dilakukan secara kuantitatif melalui skenario berbasis simulasi, sehingga karakteristik kinerja sistem diperoleh dari data numerik tanpa memerlukan perangkat keras nyata. Metode ini dipilih karena memungkinkan pengamatan respons sistem secara rinci dan fleksibel dalam berbagai kondisi operasi. Perangkat lunak yang digunakan meliputi MATLAB R2021 beserta Simulink, Control System Toolbox, dan Simulink Control Design yang menyediakan fitur PID Tuner untuk proses penalaan. Pemodelan motor DC dikembangkan dari persamaan dinamis yang mencakup aspek kelistrikan dan mekanika, dimulai dari persamaan armatur, torsi elektromagnetik, hingga dinamika poros, yang kemudian menghasilkan fungsi alih sistem sebagai dasar analisis dan perancangan kontrol(Biiragbara Peace Barididum & Ekeriance Dominic Evanson 2025; Le Roux and Ngwenyama 2022).



*Gambar 3.1 Rangkaian simulasi kontrol PI pada motor DC dengan perubahan beban*



*Gambar 3.2 Rangkaian simulasi kontrol PI pada motor DC tanpa perubahan beban*

Parameter pengendali diperoleh menggunakan fitur PID Tune pada MATLAB, yang secara otomatis menentukan nilai  $K_p$  dan  $K_i$  berdasarkan karakteristik model sehingga proses penalaan menjadi lebih cepat dan tidak memerlukan penyesuaian manual berulang. Simulasi disusun menggunakan rangkaian blok yang terdiri dari input referensi Step, blok Sum, pengendali PI, model motor DC, sinyal gangguan beban, dan Scope untuk observasi. Dua skenario pengujian dilakukan, yaitu tanpa pengendali PI dan dengan pengendali PI, masing-masing diuji pada kondisi tanpa beban dan dengan gangguan. Gangguan berupa sinyal step diberikan pada  $t = 3$  detik dengan amplitudo 50 satuan untuk menilai kemampuan sistem dalam menolak gangguan(Hammoodi et al. 2020; Okoro and Enwerem 2020; Rikwan and Ma’arif 2023).

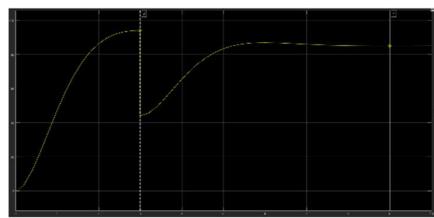
## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Respon sistem tanpa pengendali PI**

Pada simulasi ini, penentuan parameter kontrol dilakukan menggunakan fitur PID Tune sebagai metode praktis dibandingkan metode trial and error yang memerlukan banyak percobaan. Model motor DC yang digunakan memiliki parameter  $R_a = 1\Omega$ ,  $L_a = 0,5\text{H}$ ,  $J = 0,01\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $B = 0,001\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ , dan  $K = 0,01$ . Berdasarkan parameter tersebut, diperoleh fungsi alih kecepatan motor DC terhadap tegangan armatur sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{0,01}{0,005s^2 + 0,0105s + 0,0011}$$

Model tersebut diimplementasikan pada blok *Transfer Function* di Simulink sebagai plant. Simulasi dilakukan pada kondisi tanpa pengendali PI dengan gangguan beban sebesar 50 satuan pada  $t = 3$  detik untuk mengamati respon alami motor DC terhadap perubahan beban



*Gambar 4. 1 Grafik Simulasi Kontrol Kecepatan sudut Motor DC Tanpa PI dengan beban 50 satuan pada  $t = 3s$*

Sebelum gangguan diberikan, kecepatan motor mencapai keadaan tunak pada 94,6 rad/s, sehingga diperoleh error keadaan tunak sebesar sekitar 5,4% terhadap referensi 100 rad/s. Selain itu, sistem menunjukkan overshoot sekitar 9,87% terhadap nilai steady-state, yang mengindikasikan karakteristik sistem yang bersifat *underdamped*.

Setelah gangguan beban diberikan, kecepatan motor turun hingga 44,8 rad/s, yang menunjukkan penurunan kecepatan sebesar sekitar 52,8% dari kondisi awal. Selanjutnya sistem

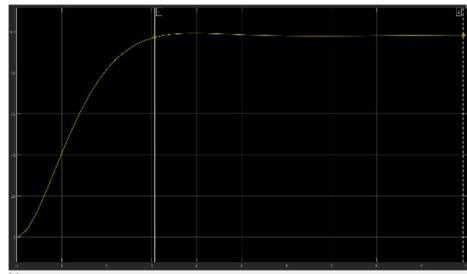
kembali stabil pada kecepatan 85,6 rad/s dengan waktu pemulihan sekitar 6 detik. Error keadaan tunak setelah gangguan meningkat menjadi sekitar 14,4%, yang menunjukkan bahwa perubahan beban berdampak signifikan terhadap penurunan kinerja sistem.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem tanpa pengendali PI memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap gangguan beban dan tidak mampu mempertahankan kecepatan motor pada nilai referensi, sehingga memerlukan sistem pengendali untuk meningkatkan kestabilan dan akurasi keluaran.

#### **Respon sistem dengan kontrol PI ( $K_p=0.81182818754454, K_i = 0.0680578329334836$ )**

Setelah dilakukan pengujian sistem tanpa pengendali, selanjutnya sistem motor DC diuji menggunakan kontrol PI dengan parameter hasil penalaan PID Tune, yaitu  $K_p = 0,8118$  dan  $K_i = 0,0681$ . Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi peningkatan kinerja sistem dalam hal kestabilan dan ketahanan terhadap perubahan beban dibandingkan dengan kondisi tanpa pengendali.

##### **a. Tanpa Beban**



Gambar 4. 2 Grafik Simulasi Kontrol Kecepatan sudut Motor DC Dengan PI Tanpa Beban

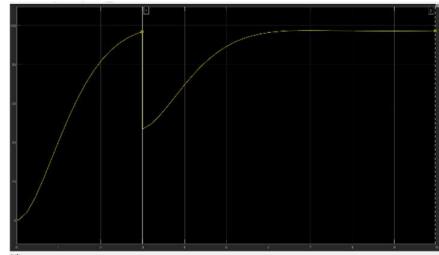
Pada kondisi tanpa beban, sistem menunjukkan respon yang stabil dan mendekati nilai referensi. Kecepatan steady-state yang dicapai sebesar 98,35 rad/s dengan error keadaan tunak sebesar 1,65% terhadap setpoint 100 rad/s. Nilai ini jauh lebih kecil dibandingkan sistem tanpa pengendali, yang menunjukkan bahwa aksi integral pada kontrol PI efektif dalam mengurangi error steady-state.

Karakteristik respon transien yang diperoleh adalah:

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| 1) Rise time: 1,9875 s       | 4) Overshoot terhadap steady-state: 0,90% |
| 2) Peak time: 4,012 s        | 5) Settling time: 2,9                     |
| 3) Nilai puncak: 99,23 rad/s |   |

Overshoot yang sangat kecil (<1%) menunjukkan bahwa sistem memiliki kestabilan yang baik tanpa osilasi signifikan. Selain itu, nilai settling time yang relatif singkat menandakan bahwa sistem mampu mencapai keadaan tunak dengan cepat, sehingga konfigurasi PI yang digunakan menghasilkan keseimbangan yang baik antara kecepatan respon dan kestabilan sistem.

**b. Dengan Beban**



*Gambar 4. 3 Grafik Simulasi Kontrol Kecepatan sudut Motor DC Dengan PI T dengan Beban*

Untuk mengevaluasi ketahanan sistem terhadap gangguan, diberikan beban sebesar 50 satuan pada  $t = 3$  s. Sebelum gangguan terjadi, kecepatan keadaan tunak sistem berada pada 96,82 rad/s. Ketika beban diterapkan, kecepatan motor turun hingga 46,93 rad/s, yang menunjukkan penurunan kecepatan sekitar 51,6%. Meskipun terjadi penurunan kecepatan yang cukup besar, sistem mampu memulihkan kondisi dengan baik. Kecepatan kembali stabil pada nilai 97,29 rad/s dengan karakteristik sebagai berikut:

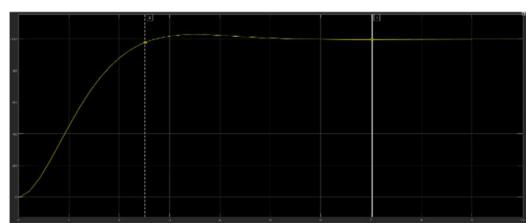
- |                                  |                              |
|----------------------------------|------------------------------|
| 1) Waktu pemulihan: $\pm 7$ s    | 3) Settling time: 5,72 s     |
| 2) Error setelah gangguan: 2,71% | 4) Overshoot maksimum: 0,22% |

Nilai error setelah gangguan yang relatif kecil menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan kecepatan mendekati nilai referensi. Selain itu, tidak dijumpai osilasi yang signifikan setelah gangguan, yang menandakan bahwa konfigurasi kontrol PI mampu memberikan kestabilan yang baik terhadap perubahan beban.

**Respon sistem dengan kontrol PI ( $K_p = 0.897949305857577$ ,  $K_I = 0.0965838123773684$ )**

Pengujian ini merupakan percobaan kedua yang dilakukan dengan menggunakan parameter kontrol PI yang diperoleh dari PID Tune, yaitu  $K_p = 0,8979$  dan  $K_i = 0,0966$ . Konfigurasi ini dibandingkan dengan parameter PI sebelumnya untuk mengamati pengaruh perubahan nilai pengendali terhadap karakteristik respon sistem.

**a. Tanpa Beban**



*Gambar 4. 4 Grafik Simulasi Kontrol Kecepatan sudut Motor DC Dengan PI Terbaru Tanpa Beban*

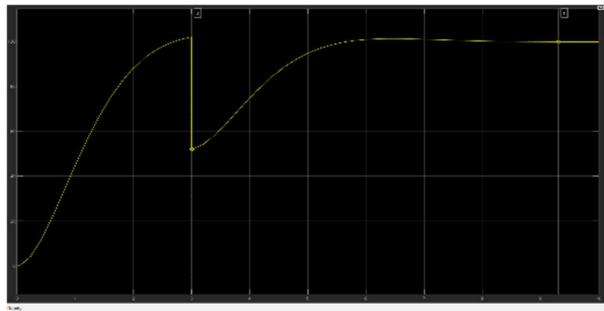
Pada kondisi tanpa beban, sistem menunjukkan peningkatan kecepatan respon dibandingkan konfigurasi sebelumnya. Kecepatan steady-state tercapai pada 99,72 rad/s, dengan error keadaan tunak

sebesar 0,28%, yang menunjukkan peningkatan akurasi terhadap nilai referensi. Parameter respon transien yang diperoleh adalah sebagai berikut:

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| 1) Rise time: 1,7 s          | 4) Overshoot terhadap steady-state: 3,08% |
| 2) Peak time: 3,4 s          | 5) Settling time: 2,5 s                   |
| 3) Nilai puncak: 102,8 rad/s |   |

Penurunan rise time dan settling time menunjukkan bahwa sistem mencapai kondisi stabil lebih cepat. Namun, peningkatan overshoot menunjukkan bahwa sistem menjadi lebih agresif sebagai dampak kenaikan nilai K<sub>p</sub> dan K<sub>i</sub>. Secara umum, konfigurasi ini menghasilkan sistem yang lebih cepat dan lebih akurat, tetapi dengan konsekuensi berupa peningkatan overshoot dibandingkan konfigurasi sebelumnya.

**b. Dengan beban**



Gambar 4. 5 Grafik Simulasi Kontrol Kecepatan sudut Motor DC Dengan PI Terbaru dengan Beban

Evaluasi ketahanan sistem dilakukan dengan memberikan gangguan beban sebesar 50 satuan pada t = 3 s. Sebelum gangguan diterapkan, sistem mencapai kondisi tunak pada kecepatan 101,8 rad/s. Saat gangguan diberikan, kecepatan turun menjadi 51,96 rad/s, yang mengindikasikan penurunan kecepatan sekitar 49,11%. Setelah gangguan tersebut, sistem menunjukkan proses pemulihan yang efektif, dengan kondisi akhir sebagai berikut:

- |  |   |
|--|---|
| 1) Kecepatan steady-state akhir: 99,73 rad/s | 4) Settling time: 2,51 s                |
| 2) Waktu pemulihan: 6 s                      | 5) Overshoot terhadap steady-state: 2,0 |
| 3) Error setelah gangguan: 0,27%             |   |

Nilai error yang sangat kecil setelah gangguan menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan kinerja kecepatan mendekati setpoint meskipun terjadi perubahan beban. Dibandingkan dengan konfigurasi sebelumnya, sistem ini memiliki waktu pemulihan yang lebih singkat dan tingkat kesalahan akhir yang lebih kecil, yang menandakan peningkatan efektivitas pengendali. Namun demikian, peningkatan nilai K<sub>p</sub> dan K<sub>i</sub> menyebabkan sistem menjadi lebih sensitif, yang tercermin dari kenaikan overshoot selama periode transien.

## Perbandingan kinerja sistem

Setelah Melakukan Pengujian melalui Berbagai Kondisi, berikut adalah Tabel perbandingan Kinerja dari Keseluruhan sistem, yang menggambarkan Performa keseluruhan sistem.

*Tabel 4.1 Tabel Perbandingan Keseluruhan Kinerja Sistem.*

Kondisi	tr	ts	Mp	ess	Recovery time
<b>Tanpa PI dengan Beban</b>	1,325 s	5 s	9,87 %	14,4%	6 s
<b>PI<sub>1</sub> Tanpa Beban</b>	1,9875 s	2,9 s	0,9%	1,65%	NaN
<b>PI<sub>1</sub> + Beban</b>	1,864 s	5,72 s	0,22%	2,71%	7 s
<b>PI<sub>2</sub> Tanpa Beban</b>	1,7 s	2.5 s	3,08%	0,28%	NaN
<b>PI<sub>2</sub> + Beban</b>	1,72 s	2,51	2,07%	0,27%	6 s

Hasil simulasi menunjukkan bahwa tanpa kontrol PI, motor DC sangat sensitif terhadap gangguan dan tidak mampu mempertahankan kecepatan referensi, dengan penurunan kecepatan hingga 52,8% dan error keadaan tunak 14,4%. Penerapan kontrol PI secara signifikan memperbaiki performa sistem. PI<sub>1</sub> menghasilkan error kecil, overshoot sangat rendah, dan waktu pemulihan sekitar 7 detik. Sementara itu, PI<sub>2</sub> memberikan performa terbaik dengan error akhir sangat kecil dan settling time lebih cepat, meskipun overshoot meningkat menjadi sekitar 3,08% karena responnya lebih agresif. Temuan ini menunjukkan adanya trade-off antara kecepatan respon dan kestabilan. Selain itu, penggunaan PID Tune terbukti efektif dalam menetapkan parameter PI secara efisien. Secara keseluruhan, kontrol PI meningkatkan stabilitas, akurasi, dan ketahanan motor DC terhadap perubahan beban, dengan PI<sub>2</sub> sebagai konfigurasi paling optimal.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem motor DC tanpa pengendali PI memiliki sensitivitas tinggi terhadap gangguan beban sehingga gagal mempertahankan kecepatan referensi, yang ditunjukkan oleh penurunan kecepatan hingga 52,8% serta error keadaan tunak sebesar 14,4%. Implementasi kontrol PI terbukti meningkatkan respons dinamik sistem secara signifikan, di mana konfigurasi PI<sub>1</sub> menghasilkan overshoot yang sangat kecil, error steady-state yang rendah, serta waktu pemulihan sekitar 7 detik setelah terjadinya gangguan. Sementara itu, konfigurasi PI<sub>2</sub> menunjukkan kinerja paling optimal dengan error akhir yang sangat kecil dan settling time yang lebih singkat, meskipun menghasilkan overshoot sekitar 3,08% akibat karakteristik respon yang lebih agresif, sehingga mengindikasikan adanya trade-off antara kecepatan respon dan kestabilan sistem. Selain itu, metode PID Tune terbukti efektif dalam proses penalaan parameter PI berbasis simulasi karena mampu menghasilkan parameter yang stabil tanpa melalui proses trial and error yang panjang. Oleh karena itu, sebagai pengembangan lanjutan, disarankan dilakukan implementasi kontrol PI secara langsung pada sistem motor DC berbasis perangkat keras (hardware implementation) untuk memvalidasi hasil simulasi, serta dilakukan studi perbandingan dengan strategi kendali lain seperti PID, Fuzzy Logic Control, atau Adaptive Control guna memperoleh evaluasi performa sistem yang lebih komprehensif.

## **DAFTAR REFERENSI**

- Almawla, Ahmed M., Marwan J. Hussein, and Afrah T. Abdullah. 2024. "A Comparative Study of DC Motor Speed Control Techniques Using Fuzzy, SMC and PID." *Journal Européen Des Systèmes Automatisés* 57(2):397–406. doi:10.18280/jesa.570209.
- Athoillah, Muhammad Nasir, Muhammad Syariffudien Zuhrie, Puput Wanarti Rusimamto, and Nur Kholis. 2021. "RANCANG BANGUN PID CONTROLLER DENGAN TUNING ZIEGLER NICHOLS UNTUK PENGENDALIAN POSISI SUDUT MOTOR DC." *Jurnal Teknik Elektro* 10.
- Biiragbara Peace Barididum & Ekeriance Dominic Evanson. 2025. "Dynamic Analysis and Simulation of Transient Response in a Separately Excited DC Motor Using MATLAB/Simulink." doi:10.5281/ZENODO.16757435.
- Esario, Muhamad Ilham, and Muldi Yuhendri. 2020. "Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan DC Chopper Satu Kuadran Berbasis Kontroller PI." *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)* 6(1):296. doi:10.24036/jtev.v6i1.108005.
- Hafizh, Muhammad Diza Al. n.d. "IMPLEMENTASI KONTROL PI PADA MOTOR DC SEBAGAI PENGERAK BELT KONVEYOR DALAM PROSES PEMILAHAN BENDA LOGAM DAN NON LOGAM."
- Hammoodi, Salman Jasim, Kareem Sayegh Flayyih, and Ahmed Refaat Hamad. 2020. "Design and Implementation Speed Control System of DC Motor Based on PID Control and Matlab Simulink." *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)* 11(1):127. doi:10.11591/ijpeds.v11.i1.pp127-134.
- Ibrahim, Mohammed A., Ali N. Hamoodi, and Bashar M. Salih. 2020. "PI Controller for DC Motor Speed Realized with Simulink and Practical Measurements." *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)* 11(1):119. doi:10.11591/ijpeds.v11.i1.pp119-126.
- Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan Pengendali PID dengan Encoder sebagai Feedback \_ Nurkholis Putera \_ STRING (Satuan Tulisan Riset dan Inovasi Teknologi). n.d.
- Le Roux, P. F., and M. K. Ngwenyama. 2022. "Static and Dynamic Simulation of an Induction Motor Using Matlab/Simulink." *Energies* 15(10):3564. doi:10.3390/en15103564.
- Manuel, Nelson Luis, Nihat İnanç, and Murat Lüy. 2023. "Control and Performance Analyses of a DC Motor Using Optimized PIDs and Fuzzy Logic Controller." *Results in Control and Optimization* 13:100306. doi:10.1016/j.rico.2023.100306.
- Okoro, Ihechiluru Samuel, and Clinton O. Enwerem. 2020. "Robust Control of a DC Motor." *Heliyon* 6(12):e05777. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e05777.
- Rahmadi, Febri, and Muldi Yuhendri. 2020. "Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan Chopper DC Dua Kuadran Berbasis Kontroller PI." *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia* 1(2):241–45. doi:10.24036/jtein.v1i2.71.
- Rikwan, Rikwan, and Alfian Ma'arif. 2023. "DC Motor Rotary Speed Control with Arduino UNO Based PID Control." *Control Systems and Optimization Letters* 1(1):17–31. doi:10.59247/csol.v1i1.6.
- Ushofa, Baroroh Dhiya', and Lilik Anifah. 2022. "Sistem Kendali Kecepatan Putaran Motor DC pada Conveyor dengan Metode Kontrol PID." 11.
- View of Pengendali Kecepatan Sudut Motor DC Menggunakan Kontrol PID dan Tuning Ziegler Nichols. n.d.
- Wibowo, Nanang Roni. 2020. "RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR DC SEBAGAI MEDIA PEMBELAJARAN PRAKTIKUM SISTEM KENDALI MENGGUNAKAN LABVIEW." *JST (Jurnal Sains Terapan)* 6(2). doi:10.32487/jst.v6i2.775.