

Perancangan Kendali Integral State Feedback (KISF) Pada Sistem Pengaturan Kecepatan Motor DC

Muhamad Nanang Indrajaya Saputra¹, I Ketut Wiryajati², I Nyoman Wahyu Satiawan³

saputrajaya938@gmail.com¹, kjatiwirya@unram.ac.id², nwahyus@unram.ac.id³

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Indonesia^{1,2,3}

Email Korespondensi: kjatiwirya@unram.ac.id

Jl. Majapahit No. 62, Gomong, Kec. Selaparang, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat 83125

ARTICLE INFO

Article history:

Received : 24 June 2024

Received in revised : 18 November 2024

Accepted : 2 Desember 2024

Available online : 12 Desember 2024

ABSTRACT

This research aims to design and simulate a DC motor speed control system using integral state feedback (KISF) control. This control is designed to maintain DC motor speed stability with high accuracy despite disturbances or load changes. The research stages include mathematical modeling of the DC motor, PID control design, integral state feedback control design, simulation implementation and simulation results analysis. The show that although integral state feedback control has a rise time 273.501 ms, slightly slower than PID 197.604 ms, integral state feedback compensates with higher slew rate of change 6.540 V/ms compared to PID 4.344 V/ms. Integral state feedback offers greater flexibility through pole placement values with Ackerman's formula $J_3 = [-12 \ -100 \ -600]$, indicating that this system has good capability in responding to input changes, thus maintaining motor speed stably and efficiently. This indicates that integral state feedback control is superior in system adaptation and handling complex dynamics.

Keywords: Control Design, Speed Control, DC Motor, Integral State Feedback Controller, PID Controller

1. Pendahuluan

Motor arus searah (DC) merupakan perangkat elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik atau gerakan, proses konversi ini terjadi melalui interaksi antara arus yang mengalir dalam kumparan kemudian menciptakan medan magnet dan menghasilkan torsi untuk memutar rotor (Hammoodi et al., 2020). Penggunaannya meliputi berbagai bidang seperti robotika, kendaraan listrik dan mesin industri yang membutuhkan presisi tinggi (Manuel et al., 2023). Dibandingkan motor AC, motor DC lebih populer digunakan karena memiliki performa baik dan sifat yang mudah dikontrol (Maarif & Setiawan, 2021). Salah satu isu yang kerap muncul pada sistem pengaturan kecepatan motor DC adalah penurunan putaran saat menerima variasi beban. Semakin besar beban yang dikenakan, semakin signifikan pula penurunan kecepatan motor. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan sistem pengendalian yang mampu menavigasi perubahan beban dan menjaga kecepatan motor tetap stabil (Muhardian et al., 2020).

Kinerja Motor DC sangat bergantung pada sistem pengendalian yang diterapkan. Salah satu pengendalian umum yang dipakai adalah kontrol PID yang banyak diterapkan pada motor DC khususnya dalam pengaturan kecepatan (Hekimoğlu et al., 2018). Kontrol PID berfungsi dalam menjaga keluaran pada tingkat yang diinginkan sehingga tidak terjadi perbedaan antara nilai

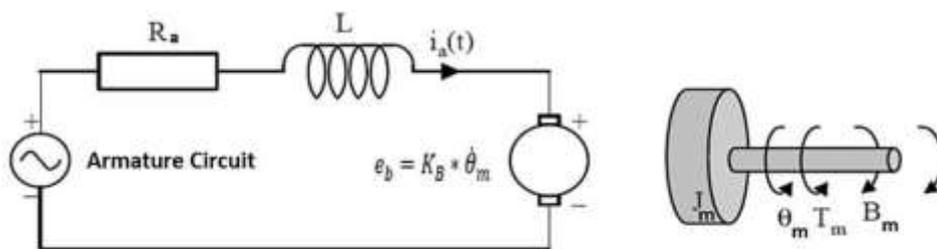
keluaran yang diukur dengan nilai acuan (Sathe et al., 2019). Meskipun efektif, kontrol PID memiliki kekurangan dalam menangani sistem yang lebih rumit. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, diterapkan teknik pengendalian menggunakan kontrol integral state feedback (Wiryajati et al., 2024). Kendali ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan kontrol PID karena kendali integral state feedback merupakan sebuah teknik kontrol yang menggabungkan konsep full state feedback dengan melibatkan semua variabel keadaan sistem melalui matriks dalam sistem loop tertutup (Haber. 2019). Kendali integral bertujuan untuk menghilangkan steady state error, sedangkan state feedback menggunakan umpan balik dari semua variabel keadaan sistem sehingga sinyal masukan mencapai respon yang diinginkan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kinerja kontrol integral state feedback dalam sistem pengaturan kecepatan motor DC pada kondisi rangkaian open loop dan close loop. Pengujian dilakukan melalui simulasi untuk menganalisis kecepatan motor DC. Simulasi ini ditujukan untuk membandingkan respon kecepatan motor yang dikendalikan menggunakan kontrol integral state feedback dan kontrol PID dengan harapan hasilnya menunjukkan kestabilan dalam pengaturan kecepatan.

2. Metode penelitian

2.1 Model Matematis Motor DC

Pemodelan motor DC umumnya menggambarkan perilaku dinamis motor dalam bentuk persamaan matematis, model matematis motor DC digunakan untuk melihat hubungan antara tegangan masukan dan variabel keluaran seperti kecepatan yang memungkinkan bisa dianalisis dan dikendalikan secara sistematis (Love et al., 2024).



Gambar 1 Model Elektromekanik Motor DC (Love et al., 2024)

Motor DC merupakan perangkat elektromagnetik yang mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik, oleh sebab itu motor DC ditunjukkan pada Gambar 1 dimodelkan dengan menurunkan persamaan matematis yang menggambarkan sistem elektrik dan mekanik lalu menggabungkan kedua persamaan tersebut untuk memperoleh fungsi alih (transfer function) dari motor DC (Khin et al., 2019.). Model ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu model elektrik dan model mekanik yang dapat dinyatakan dalam persamaan diferensial. Berikut adalah langkah-langkah pemodelan motor DC:

a) Model Elektrik

Pada model elektrik, komponen utama yang diperhatikan adalah kumparan rotor atau jangkar yang menghasilkan medan elektromagnetik ketika arus mengalir. Pada bagian ini, hukum Kirchoff yang berlaku pada rangkaian listrik dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut:

$$V_a(t) = R_a \times i_a(t) + L_a \frac{di}{dt} + K_B \times \dot{\theta}_m \quad (1)$$

b) Model Mekanik

Pada model mekanik, motor DC dimodelkan dengan menggunakan hukum kedua Newton dalam bentuk rotasi yang menyatakan bahwa total momen (torsi) yang bekerja pada rotor

berbanding lurus dengan perubahan momen sudut rotor. Persamaan matematisnya dituliskan sebagai berikut:

$$T_m = J_m \frac{d\omega}{dt} + B_m \times \dot{\theta}_m = K_T \times i_a(t) \quad (2)$$

c) Model Transfer Function

Transfer function (fungsi alih) digunakan untuk menggambarkan hubungan antara input (tegangan) dan output (kecepatan) dalam domain Laplace, sehingga persamaannya dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\frac{\dot{\theta}_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{(J_s + B)(L_s + R) + K_T \times K_B} \quad (3)$$

d) State Space Motor DC

State space motor DC dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan matematis yang menggambarkan hubungan antara variabel sistem seperti vektor masukan, vektor keadaan dan vektor keluaran yang digunakan untuk memodelkan perilaku dinamis secara keseluruhan dari sistem. Persamaan state space dinyatakan sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4)$$

$$y = Cx + Du \quad (5)$$

Kedua persamaan diatas disajikan dalam bentuk matriks untuk merepresentasikan variabel keadaan sistem sehingga persamaannya dapat diuraikan lagi sebagai berikut:

- Vektor Masukan

$$u \Delta V_a \quad (6)$$

- Vektor Keluaran

$$y \Delta \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \Delta \begin{bmatrix} \omega(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

- Vektor Keadaan

$$\dot{x} \Delta \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} \Delta \begin{bmatrix} di/dt \\ d\omega/dt \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dari model fisik, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{K_B}{L_a} \omega + \frac{1}{L_a} V_a \quad (9)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{K}{J} i_a - \frac{B}{J} \omega \quad (10)$$

Dalam bentuk matriks, persamaan tersebut dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0], D = [0] \quad (11)$$

Keterangan:

V_a = Tegangan Sumber (V)

R_a = Resistansi Jangkar (ohm)

L_a = Induktansi Jangkar (H)

e_b = Gaya Gerak Listrik (V s/rad)

i_a = Arus Jangkar (A)

K_B = Konstanta GGL (V s/rad)

$\dot{\theta}_m$ = Kecepatan Sudut (rad/s)

T_m = Torsi masukan (Nm)

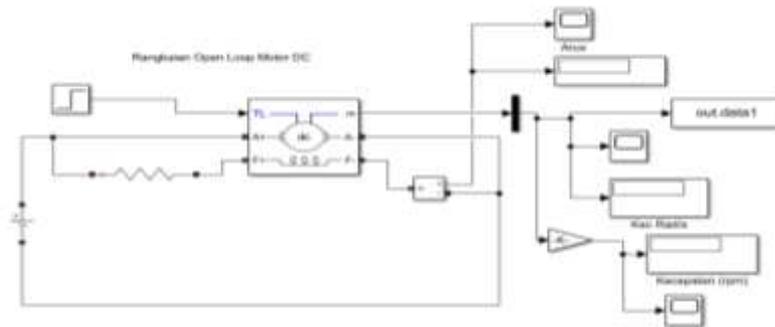
B_m = Koefisien Redaman (Nm^s / rad)

J_m = Inersia Rotor (kgm^2)

K_T = Konstanta Torsi (Nm/A)

2.2 Desain Sistem Motor DC

Sistem motor DC dalam penelitian ini akan dirancang dengan konfigurasi sistem open loop. Desain open loop pada sistem pengaturan kecepatan motor DC merupakan proses rancangan awal dimana sinyal input diberikan ke motor tanpa adanya umpan balik (feedback) dari kecepatan yang dihasilkan oleh motor (Iswanto et al., 2021). Tujuan utama dari desain open loop ini untuk melihat karakteristik dasar dari motor dengan melihat bagaimana motor merespons terhadap perubahan input tanpa adanya pengaruh dari faktor lain. Berikut adalah sistem motor DC dalam bentuk rangkaian open loop:



Gambar 2 Rangkaian Open Loop Motor DC

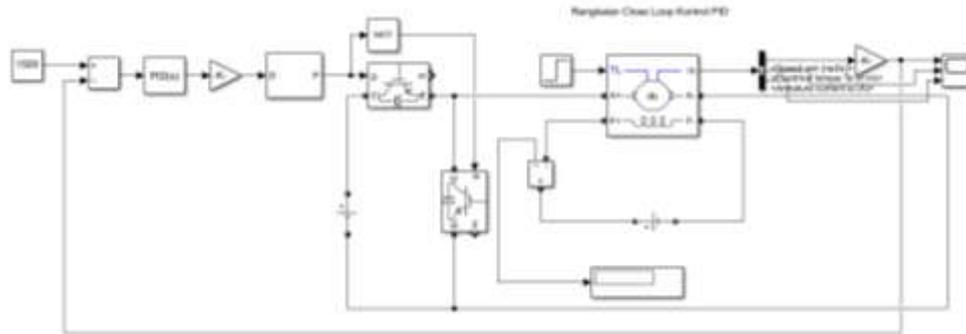
Pada Gambar 2 menunjukkan sistem motor DC dengan konfigurasi sistem open loop pada motor DC. Dengan menganalisis rangkaian pada kondisi open loop, parameter motor seperti resistansi, induktansi, inersia, redaman dan konstanta torsi ditentukan sebagai langkah dasar sebelum merancang kontrol dengan menggunakan integral state feedback. Nilai parameter motor dapat dilihat pada tabel 1 dibawah:

Tabel 1 Nilai Parameter Motor DC

Parameter	Nilai
Tegangan Sumber	220 V
Resistansi Jangkar (R_a)	1 ohm
Induktansi Jangkar (L_a)	0.01 H
Resistansi Medan (R_f)	50 ohm
Induktansi Medan (L_f)	0.5 H
Arus Jangkar (I_a)	31.504 A
Arus Medan (I_f)	4.4 A
Inersia Rotor (J)	0.01 kgm^2
Torsi (N_m)	8.2 N_m
Torsi Gesekan (N_m)	0.5 N_m
Konstanta Torsi (K_T)	0.3 V_s/rad
Koefisien Redaman Viskos (B)	0.001 Nm^s/rad
Belitan Induktansi Medan dan Jangkar	0.0707 H
Kecepatan	1500 rpm

2.3 Desain Kontrol PID untuk Sistem Pengaturan Kecepatan Motor DC

Pengontrol PID menentukan kesalahan dalam kuantitas yang dikontrol dan berupaya mengurangi kesalahan dengan menyesuaikan input kontrol. Fungsi dominan pengontrol adalah menjaga keluaran pada tingkat yang diinginkan sehingga tidak terjadi perbedaan antara nilai keluaran yang diukur dengan nilai acuan (Irhas et al., 2020). Penelitian ini akan mendesain sistem kontrol kecepatan motor DC dengan menerapkan metode kontrol PID seperti pada Gambar 3.



Gambar 3 Rangkaian Close Loop PID pada Motor DC

Pada Gambar 3 memperlihatkan desain sistem pengaturan kecepatan motor DC dengan kontrol PID. Kontrol PID terdiri dari tiga macam kendali yang dikombinasikan diantaranya yaitu Proporsional, Integral dan Derivatif yang menghasilkan sinyal dalam menentukan kualitas respon pada suatu kontrol dinyatakan dalam bentuk persamaan matematis sebagai berikut:

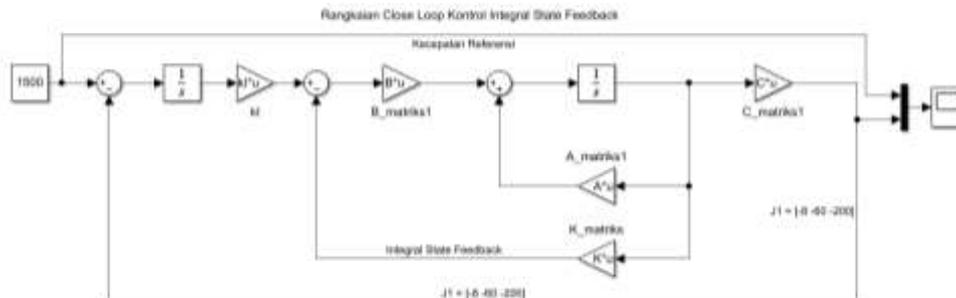
$$u(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} e(t)$$

Keterangan:

K_p = Konstanta Proporsional , K_i = Konstanta Integral , K_d = Konstanta Derivatif

2.4 Desain Kontrol Integral State Feedback untuk Sistem Pengaturan Kecepatan Motor DC

Kontrol integral state feedback (KISF) adalah teknik kontrol umpan balik keadaan yang menggabungkan konsep umpan balik keadaan penuh (Setiawan et al., 2023). Pendekatan ini melibatkan penggunaan matriks umpan balik untuk mengalirkan kondisi sistem ke dalam inputnya. Melalui metode ini, posisi yang diinginkan dari nilai eigen sistem akan memindahkan semua kutub loop terbuka ke loop tertutup. Teknik pengendalian ini dikenal dengan sebagai kontrol dengan penempatan kutub (pole placement). Dalam penelitian ini, metode penempatan kutub akan diterapkan menggunakan formula Ackerman seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Rangkaian Close Loop Kendali Integral State Feedback pada Motor DC

Perancangan Kendali Integral State Feedback (KISF) Pada Sistem Pengaturan Kecepatan Motor DC (Muhamad Nanang Indrajaya Saputra)

Pada Gambar 4 menunjukkan desain sistem pengaturan kecepatan motor DC menggunakan kendali integral state feedback dengan formula Ackerman. Dalam desain tersebut matriks A,B,C dan D dapat merepresentasikan rancangan sistem kontrolnya, sementara matriks K berfungsi sebagai komponen umpan balik. Dalam metode integral state feedback, sistem akan memanfaatkan setiap variabel yang diukur sebagai input untuk proses umpan balik. Untuk mencapai output yang sesuai dengan nilai acuan, penyesuaian dapat dilakukan melalui pengaturan nilai dalam matriks. Persamaan matematisnya dituliskan sebagai berikut:

$$y(t) = x(t) \quad (12)$$

$$u(t) = -Kx(t) + K_i x_i(t) \quad (13)$$

$$\dot{x} = (A - BK)x(t) + BK_i x_i(t) \quad (14)$$

Keterangan:

$y(t)$ = Keluaran Sistem

$x(t)$ = Keadaan Sistem

$u(t)$ = Sinyal Input

K = Matriks Penguat

K_i = Matriks Penguat Integral

$x_i(t)$ = Integral dari Kesalahan

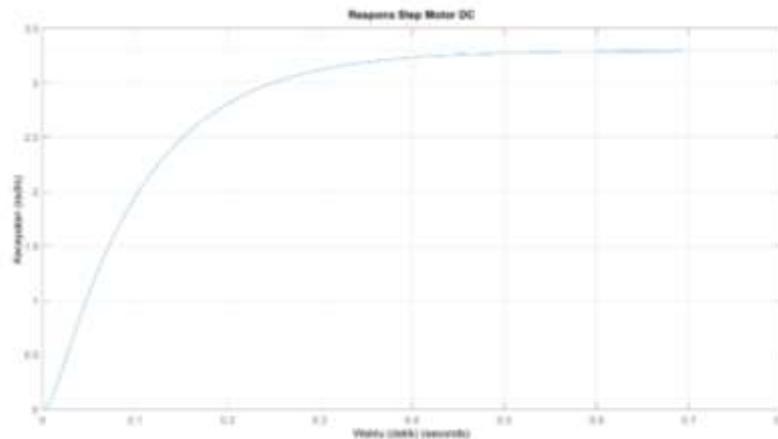
\dot{x} = Turunan Keadaan

A = Matriks Sistem

B = Matriks Sistem

3. Hasil dan Pembahasan

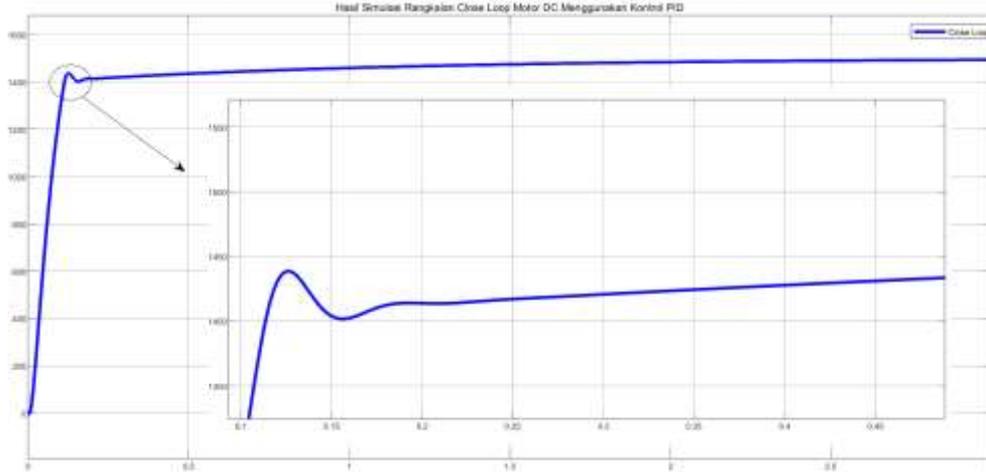
3.1. Hasil Simulasi Rangkaian Open Loop pada Motor DC



Gambar 3.1 Respons Step Motor DC

Berdasarkan hasil simulasi rangkaian open loop pada motor DC dapat dianalisa bahwa sistem menunjukkan karakteristik yang baik dalam kestabilan dan akurasi. Hal ini memperlihatkan bagaimana respons waktu dari motor DC diukur melalui beberapa parameter seperti waktu naik (T_r) dengan nilai sebesar 0.15 s, waktu penetapan (T_s) sebesar 0.4 s dan waktu tunda (T_d) sebesar 0.05 s. Sistem dari motor DC mencapai nilai keadaan tunak pada amplitudo sebesar 3.2 dengan jangkauan nilai yang sangat minimal, ini menunjukkan bahwa galat keadaan tunak yang dihasilkan sangat kecil. Karakteristik dari sistem motor DC menunjukkan nilai rasio redaman sebesar 0.7-1.0 dengan frekuensi alami sebesar 10-12 rad/s serta konstanta waktu dengan nilai sebesar 0.1 s. Respons sistem dari motor DC cenderung menghasilkan nilai yang teredam lebih yang berarti pergerakan dari motor DC dikatakan stabil tanpa adanya osilasi yang signifikan. Ini membuktikan bahwa sistem dari motor DC memiliki karakteristik yang baik sehingga sistem berhasil mencapai kecepatan yang diinginkan yaitu sebesar 1500RPM dan mempertahankan kestabilan dengan akurat.

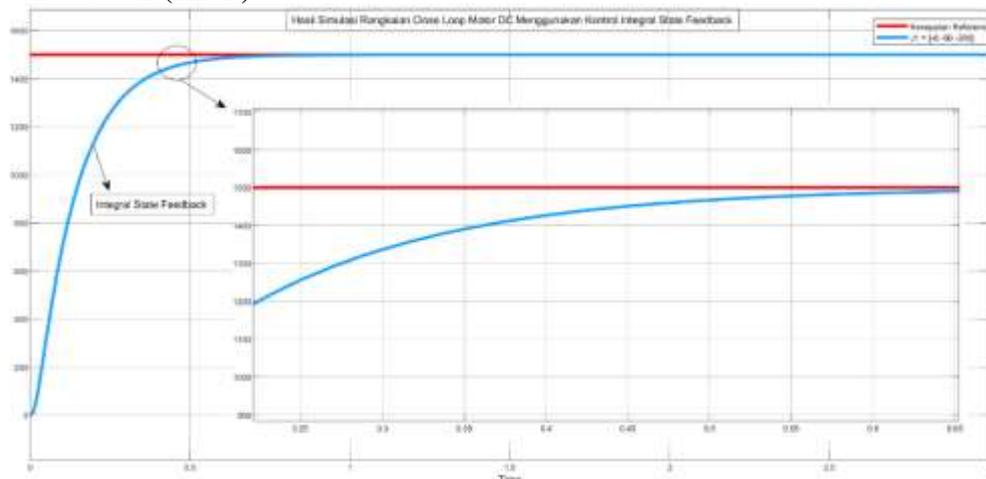
3.2. Hasil Simulasi Rangkaian Close Loop pada Motor DC Menggunakan Kontrol PID



Gambar 3.2 Hasil Simulasi Rangkaian Close Loop Menggunakan Kontrol PID

Berdasarkan hasil simulasi rangkaian close loop pada motor DC dengan kontrol PID dapat dianalisa bahwa sistem menunjukkan kinerja yang baik dengan parameter respons yang optimal. Hal ini ditunjukkan oleh waktu penetapan yang cepat yaitu sebesar 0.022 ms waktu naik sebesar 197.604 ms, dimana motor hanya membutuhkan waktu 0,2 detik untuk mencapai kecepatan yang diinginkan. Sistem juga menunjukkan stabilitas yang tinggi dengan jangkauan yang minimal yaitu sebesar 0.502 % dan laju perubahan sebesar 4.344 V/ms. Hal ini mengindikasikan bahwa kemampuan sistem yang baik dalam merespons perubahan input. Namun, dari hasil simulasi terlihat bahwa kecepatan motor DC hanya mencapai pada 1445 RPM dari kecepatan yang diinginkan yaitu sebesar 1500 RPM. Ketidakmampuan ini disebabkan oleh adanya beban tambahan atau gesekan pada motor yang dapat mempengaruhi kemampuan sistem dalam mencapai kecepatan yang diinginkan meskipun kontrol PID telah bekerja dengan optimal.

3.3. Hasil Simulasi Rangkaian Close Loop pada Motor DC Menggunakan Kontrol Integral State Feedback (KISF)



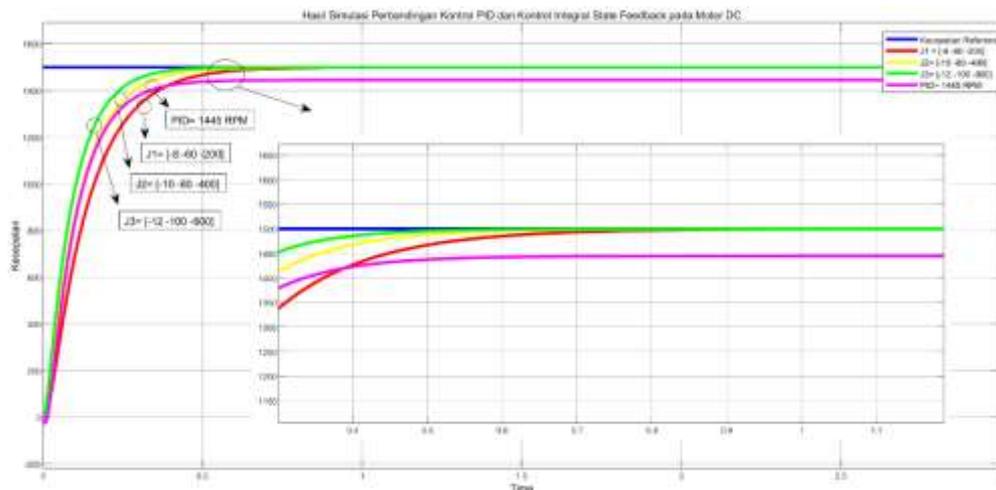
Gambar 7 Hasil Simulasi Menggunakan Kontrol Integral State Feedback

Berdasarkan hasil simulasi rangkaian close loop pada motor DC menggunakan kontrol integral state feedback menunjukkan performa yang sangat baik dengan parameter responsnya. Waktu naik sebesar 273.501 ms menunjukkan sistem mencapai kecepatan yang diinginkan yaitu sebesar 1500 RPM dengan stabil, sedangkan waktu penetapan yang cepat sebesar 0.396 ms mengindikasikan bahwa sistem mampu mencapai kondisi stabil dengan cepat setelah diberi input. Sistem juga memperlihatkan kestabilan yang tinggi dengan jangkauan yang minimal sebesar 0.502 % membuktikan bahwa efektivitas kontrol dalam mencegah osilasi yang signifikan. Keunggulan kontrol integral state feedback terlihat dari laju perubahan yang tinggi sebesar 6.540 V/ms lebih besar dibandingkan kontrol PID. Hal ini menandakan bahwa sistem memiliki kemampuan yang lebih baik dalam merespons perubahan input.

Tabel 2 Hasil Pengujian Kontrol PID dan Kontrol Integral State Feedback (KISF) pada Motor DC

No	Perfoma	Kontrol	
		PID	Integral State Feedback
1	Waktu Naik (s)	197.604 ms	273.501 ms
2	Waktu Penetapan (s)	0.022 ms	0.396 ms
3	Jangkauan (%)	0.502 %	0.502 %
4	Laju Perubahan (V/s)	4.344 V/ms	6.540 Vm/s

3.4. Hasil Perbandingan Simulasi Kontrol PID dan Kontrol Integral State Feedback (KISF)



Gambar 3.4 Hasil Perbandingan Simulasi Menggunakan Kontrol PID dan Kontrol Integral State Feedback (KISF) dengan Nilai Pole Placement Divariasikan

Berdasarkan hasil perbandingan kontrol PID dan kontrol integral state feedback pada motor DC terlihat bahwa kontrol integral state feedback menunjukkan keunggulan dalam beberapa aspek penting. Meskipun memiliki waktu naik sebesar 273.501 ms yang sedikit lebih lambat dibandingkan kontrol PID sebesar 197.604 ms, kontrol integral state feedback mengkompensasinya dengan laju perubahan yang signifikan lebih tinggi sebesar 6.540 V/ms dibandingkan dengan kontrol PID yang hanya 4.344 V/ms, hal ini menunjukkan bahwa superior dalam menangani perubahan input yang cepat. Kedua metode kontrol ini memiliki jangkauan nilai yang sama besar yaitu 0.502 %, namun kontrol integral state feedback menawarkan fleksibilitas yang lebih besar melalui variasi nilai pole placement (penempatan kutu) yang memungkinkan penyesuaian karakteristik respon sistem sesuai kebutuhan. Dari Gambar 3.4 dapat diamati bahwa kontrol PID

yang diterapkan pada motor DC hanya mampu menghasilkan kecepatan 1445 RPM, tidak mencapai kecepatan target yang ditetapkan sebesar 1500 RPM. Hal ini terjadi karena adanya hambatan berupa beban dan friksi pada motor yang menyebabkan sistem tidak dapat mencapai kecepatan yang diinginkan walaupun pengontrol sudah berfungsi dengan optimal. Hasil ini mengindikasikan bahwa kontrol integral state feedback lebih unggul dalam hal kemampuan adaptasi sistem dan penanganan dinamika yang kompleks.

Tabel 3 Hasil Pengujian Motor DC Menggunakan Kontrol PID dan Kontrol Integral State Feedback (KISF) dengan Nilai Pole Placement yang Divariasikan

Performa	Nilai Pole			Kontrol PID
	J1 = [-8 -60 -200]	J2 = [-10 -80 -400]	J3 =[-12 -100 -600]	
Waktu Penetapan	0.396 ms	0.316 ms	0.264 ms	0.022 ms
Jangkauan	0.502 %	0.501 %	0.501 %	0.502 %
Undershoot	1.998 %	1.999 %	1.997 %	1.997 %
Lonjakan Awal	0.505 %	0.505 %	0.505 %	0.505 %
Waktu Naik	273.501 ms	218.239 ms	181.641 ms	197.604 ms
Laju Perubahan	6.540 V/ms	5.907 V/ms	5.444 V/ms	4.344 V/ms
Puncak	1.500×10^3	1.500×10^3	1.500×10^3	1.474×10^3
Nilai Tengah	1.426×10^3	1.442×10^3	1.452×10^3	1.390×10^3
Akar Kuadrat	1.446×10^3	1.458×10^3	1.465×10^3	1.406×10^3
Maksimum	1.500×10^3	1.500×10^3	1.500×10^3	1.445×10^3

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian perancangan kendali integral state feedback (KISF) pada sistem pengaturan kecepatan motor DC yang telah dilakukan, dapat disimpulkan pengujian pada rangkaian open loop dan close loop dengan kontrol PID dan kontrol integral state feedback menunjukkan hasil bahwa kontrol integral state feedback yang diterapkan pada motor DC memberikan kinerja yang baik dengan stabilitas yang cepat ditunjukkan oleh waktu penetapan yang rendah, jangkauan yang minimal dan laju perubahan yang tinggi. Meskipun waktu naik sedikit lebih lambat dibandingkan dengan kontrol PID, laju perubahan yang ditawarkan lebih tinggi sehingga memberikan respons yang cepat terhadap perubahan input secara akurat. Sistem kontrol pada motor DC ini menawarkan keseimbangan yang baik antara stabilitas dan respons cepat sehingga mampu mempertahankan kecepatan motor yang diinginkan yaitu sebesar 1500 RPM dengan efisien.

Daftar Pustaka

- Haber, A. 2019. "Control System Lecture: DC Motor State Space Modeling and MATLAB's Control System Toolbox Simulations." Diakses dari <https://aleksandarhaber.com/modeling-a-dc-motor-and-matlab-simulation/> Pada Tanggal 20 Agustus 2024.
- Hammoodi, S. J., Flayyih, K. S., & Hamad, A. R. (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*, 11(1), 127–134. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i1.pp127-134>
- Hekimoğlu, B., Üniversitesi, B., Demiray, V., Doguruci, R., & Üniversitesi, B. E. (2018). *Salp Sürüsü Algoritması ile Ayarlanan PID Kontrolör Kullanarak DC Motorun Hız Kontrolü (Speed Control of DC Motor Using PID Controller Tuned By Salp Swarm Algorithm)*. <https://www.researchgate.net/publication/330579621>

Perancangan Kendali Integral State Feedback (KISF) Pada Sistem Pengaturan Kecepatan Motor DC (Muhamad Nanang Indrajaya Saputra)

- Irhas, M., Asyiqah, S., Ilham, A., & Artikel, I. (2020). *PENGGUNAAN KONTROL PID DENGAN BERBAGAI METODE UNTUK ANALISIS PENGATURAN KECEPATAN MOTOR DC*. 7(1), 78–86. <http://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/jft>
- Iswanto, Raharja, N. M., Ma'arif, A., Ramadhan, Y., & Rosyady, P. A. (2021). Pole Placement Based State Feedback for DC Motor Position Control. *Journal of Physics: Conference Series*, 1783(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1783/1/012057>
- Khin, M., Khine, E. E., Mote, W., Htwe, M., Yin, M., & Mon, Y. (2019). *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD) Simulation DC Motor Speed Control System by using PID Controller the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0)*. <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>
- Love, K., Kriger, C., & Nomzamo, T. (2024). *Design and Simulation of Full State Feedback Controller for DC Motor* (Vol. 7, Issue 1).
- 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>
- Manuel, N. L., İnanç, N., & Lüy, M. (2023). Control and performance analyses of a DC motor using optimized PIDs and fuzzy logic controller. *Results in Control and Optimization*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2023.100306>
- Muhardian, R., Krismadinata. (2020). *JTEV (JURNAL TEKNIK ELEKTRO DAN VOKASIONAL) Kendali Kecepatan Motor DC Dengan Kontroller PID dan Antarmuka Visual Basic*. <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/jtev/index>
- Sathe, P., Tetambe, S., Jadhav, S., Khedekar, T., Joshi, M., & Sathe Professor, P. (2019). Speed Control of DC Motor using PID Controller-A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net
- Setiawan, N. R., Ma'arif, A., & Widodo, N. S. (2023). DC Motor Controller Using Full State Feedback. *Control Systems and Optimization Letters*, 1(1), 7–11. <https://doi.org/10.59247/csol.v1i1.3>
- Wiryajati, I. K., Satiawan, I. N. W., Citarsa, I. B. F., Budi, I. M., Suksmadana & Supriono. (2024). Simulasi Dan Analisis Model Matematika Three State Buck-Boost Converter (TBBC) Dengan Kendali State Feedback. *Prosiding SAINTEK*, 6(Novemer 2023). (2023), 83-91. <https://doi.org/10.29303/saintek.v6i1.922>