
Perancangan Sistem Kendali Kecepatan Motor DC Pitman Series GM 9000 Type GM9X33 Menggunakan Kontroler PID

Maimun Zaki¹, Ulinnuha Latifa²

Universitas Singaperbangsa Karawang; Jl HS. Ronggo Waluyo, Puseur Jaya, Teluk Jambe Timur,
Karawang, Jawa Barat 41361, Indonesia, Tel : (0267) 641177;
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik
e-mail: ulinnuha.latifa@ft.unsika.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menganalisis sistem kendali kecepatan motor DC Pitman Series GM 9000 Type GM9X33. Motor ini memiliki aplikasi luas dalam industri dan sistem instrumentasi elektronik. Langkah-langkah penelitian meliputi analisis, perancangan, simulasi, dan implementasi sistem kendali menggunakan kontroler PID. Melalui pemodelan matematis, simulasi transfer function, dan analisis karakteristik sistem tanpa kontroler, penelitian ini mengevaluasi kinerja sistem kendali dan merancang kontroler PID yang sesuai. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan kontrol PID secara manual mencapai spesifikasi yang diinginkan dengan settling time di bawah 2 detik, rise time di bawah 0.2 detik, dan overshoot di bawah 10%. Metode Ziegler-Nichols dan analisis Bode tidak memberikan hasil yang sesuai dengan spesifikasi. Penelitian ini menyoroti pentingnya penggunaan kontrol PID secara manual dalam mengendalikan sistem motor DC, meskipun metode lain memerlukan penyesuaian yang lebih besar untuk mencapai hasil yang diinginkan.

Kata kunci—Sistem kendali kecepatan, Motor DC, Kontroler PID, Analisis karakteristik

Abstract

The research aims to design, implement, and analyze the speed control system of the DC motor Pitman Series GM 9000 Type GM9X33. This motor finds wide applications in industries and electronic instrumentation systems. The research steps include analysis, design, simulation, and implementation of the control system using a PID controller. Through mathematical modeling, transfer function simulation, and analysis of system characteristics without a controller, the research evaluates the performance of the control system and designs a suitable PID controller. The results indicate that manual PID control achieves the desired specifications with settling time below 2 seconds, rise time below 0.2 seconds, and overshoot below 10%. The Ziegler-Nichols method and Bode analysis did not yield results matching the specifications. This research highlights the importance of manual PID control in regulating DC motor systems, although other methods require greater adjustments to achieve the desired results.

Keywords— Speed control system, DC motor, PID controller, Characteristic analysis

1. PENDAHULUAN

Dalam era industri dan teknologi saat ini, sistem kendali kecepatan pada motor DC menjadi bagian integral dari berbagai aplikasi industri dan sistem instrumentasi elektronik. Kecepatan motor DC seringkali sulit untuk dikendalikan secara langsung karena memerlukan perhatian khusus terhadap kestabilannya. Oleh karena itu, pengembangan sistem kendali yang efektif dan efisien menjadi krusial dalam memastikan motor beroperasi dengan kecepatan yang stabil sesuai dengan kebutuhan [1].

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menganalisis sistem kendali kecepatan motor DC Pitman Series GM 9000 Type GM9X33. Motor ini memiliki aplikasi yang luas dalam berbagai industri, dan keberhasilan dalam mengendalikan kecepatannya akan berdampak besar pada efisiensi dan performa keseluruhan sistem [2].

Langkah-langkah yang diambil dalam penelitian ini meliputi analisis, perancangan, simulasi, dan implementasi sistem kendali menggunakan kontroler PID (Proportional-Integral-Derivative). Kontroler PID telah terbukti sebagai metode yang efektif dalam mengendalikan kecepatan motor DC [3].

Dalam penelitian ini, kami akan mendiskusikan secara detail langkah-langkah yang kami ambil, termasuk pemodelan motor DC, tuning parameter PID, simulasi sistem kendali, serta hasil implementasi pada motor DC Pitman Series GM 9000 Type GM9X33. Tujuan akhirnya adalah menghasilkan sistem kendali yang mampu menjaga kecepatan motor dengan stabil, merespons perubahan set point dengan baik, dan memiliki tingkat kesalahan dan overshoot yang rendah [4], [5].

Melalui pembahasan yang mendalam tentang teori dasar motor DC dan kontroler PID, penelitian ini akan menunjukkan bagaimana sistem kendali yang efektif dapat dirancang dan diimplementasikan untuk meningkatkan efisiensi dan performa motor DC dalam aplikasi industri.

Diharapkan penelitian ini dapat memberikan wawasan yang berharga dalam pengembangan sistem kendali motor DC serta menjadi kontribusi yang signifikan dalam memajukan teknologi industri dan sistem instrumentasi elektronik.

2. METODE PENELITIAN

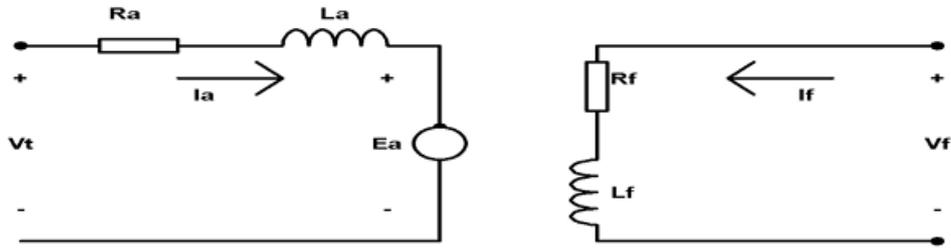
Penelitian ini cenderung menggunakan pendekatan kuantitatif dalam menganalisis data dan mengukur kinerja sistem kendali. Data yang dikumpulkan, baik itu spesifikasi motor DC maupun hasil pengujian sistem, diukur dan dianalisis secara kuantitatif untuk mendukung pengambilan keputusan.

2.1 Studi Literatur

Langkah awal dalam metodologi penelitian adalah melakukan studi literatur yang menyeluruh tentang motor DC, sistem kontrol, dan teknik pengaturan kecepatan. Studi literatur ini bertujuan untuk memahami konsep dasar motor DC, karakteristik sistem kendali, dan metode pengendalian yang tersedia [6].

2.2 Pemodelan Matematis

Berdasarkan informasi tentang motor DC yang digunakan, termasuk spesifikasi dan karakteristiknya, langkah selanjutnya adalah membangun model matematis untuk motor DC. Ini melibatkan penurunan persamaan diferensial yang menggambarkan hubungan antara tegangan masukan, arus, dan kecepatan motor. Model matematis ini kemudian akan digunakan untuk menganalisis dan merancang kontroler .



Gambar 1 Rangkaian Motor DC

Untuk analisis linier diasumsikan bahwa torsi yang dihasilkan motor sebanding dengan fluks pemisah udara dan arus jangkar. Medan konstan, fluks konstan dan toka mempunyai arah sesuai kumparan magnet, sehingga :

$$T_m(t) = K_T \cdot i_a \quad (1)$$

Tegangan keluaran loop terbuka dari persamaan, maka:

$$e_t = K_T \quad (2)$$

Tegangan pada terminal jangkar motor diberikan oleh persamaan:

$$e_a = K_b e \quad (3)$$

Sehingga dengan menggunakan hukum kirchoff tegangan diperoleh:

$$e_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_b \quad (4)$$

Ketika konduktor bergerak pada medan magnet, suatu tegangan dibangkitkan melintasi ujung-ujungnya. Tegangan ini, emf balik yang sebanding dengan kecepatan motor, berlawanan dengan aliran arus. Hubungan emf balik (e_b) volt dengan kecepatan motor (ω_m) rad/detik adalah:

$$e_b = K_b \omega_m(t) \quad (5)$$

Persamaan motor mempunyai keseimbangan torsi sebagai berikut:

$$J \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_T i_a \quad (6)$$

Dengan menggunakan rumus penguatan Masson (Masson Gain Formula):

$$T(s) = \frac{\frac{K_t}{JL_a}}{s^2 + s(L_a + JR_a) + (R_a + K_b K_T)} \quad (7)$$

Dimana e_a = tegangan masukan (Volt), K_T = konstanta torsi (Nm/A), J = momen inersia ekivalen (Kgm²), L_a = induktansi kumparan jangkar (H), T_L = torca beban (Nm), m = kecepatan motor (RPM), R_a = tahanan jangkar (), K_b = konstanta EMF balik (V/s.rad), L_a =induktansi kumparan jangkar (H), I_a = arus kumparan jangkar (A).

2.3 Simulasi Transfer Function

Setelah membangun model matematis, langkah berikutnya adalah melakukan simulasi komputer menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan menggunakan Simulink. Simulasi ini dilakukan untuk memverifikasi kebenaran model matematis, mengevaluasi kinerja sistem kendali yang diusulkan, dan melakukan tuning parameter kontroler untuk mencapai spesifikasi yang diinginkan. Dari model matematis yang telah dibangun, transfer function dari sistem motor DC akan dieksplorasi. Ini melibatkan transformasi Laplace dari persamaan diferensial yang diperoleh dari model matematis untuk mendapatkan fungsi alih sistem. Transfer function ini akan digunakan dalam analisis lebih lanjut dan desain kontroler.

Pada rancangan ini motor DC yang digunakan adalah type PITMAN Series GM 9000 type GM9X33, dimana spesifikasi motor yang digunakan (Pittman, 2013) [2].

Tabel 1 Spesifikasi PITMAN Series GM 9000 type GM9X33

Model	PITMAN Series GM 9000 type GM9X33
No-Load Speed	5993 rpm
No-Load Current	0,20 A
Konstanta Aplifier (K_A)	10 N-m/A
Konstanta torsi Motor (K_T)	4,20 Nm/A
Back-EMF Kosntan (K_b)	3,10 (V/krpm)
Momen Inersia (J)	$4,46 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2$
Induktansi jangkar (L_a)	2,08 mH
Resistansi (R_a)	2,53 ohm

Dari data tersebut, nilai *Transformasi Laplace* dapat dicari dengan menggunakan persamaan seperti dibawah ini [7]:

$$\begin{aligned}
 T(s) &= \frac{\frac{K_T}{JL_a}}{s^2 + s(L_a + JR_a) + (R_a + K_b K_T)} \\
 &= \frac{4.20}{4.46 \times 10^{-6} \times 2,08} \\
 &= \frac{4.20}{s^2 + s(2.08 + (4.46 \times 10^{-6} \times 2.53)) + (2.53 + 3.10 \times 4.20)} \\
 &= \frac{4.20}{s^2 + s(2.08 + 0.000112838) + 15.55} \\
 &= \frac{4.20 \times 10^{-6}}{9.2768} \\
 &= \frac{45274}{s^2 + 2.080s + 15.55}
 \end{aligned}$$

Dari hasil pemodelan matematis tadi, maka didapatkanlah fungsi alih dari motor dc yang kita gunakan yaitu:

$$T(s) = \frac{45274}{s^2 + 2.080s + 15.55}$$

2.4 Analisis Karakteristik Sistem Tanpa Kontroler

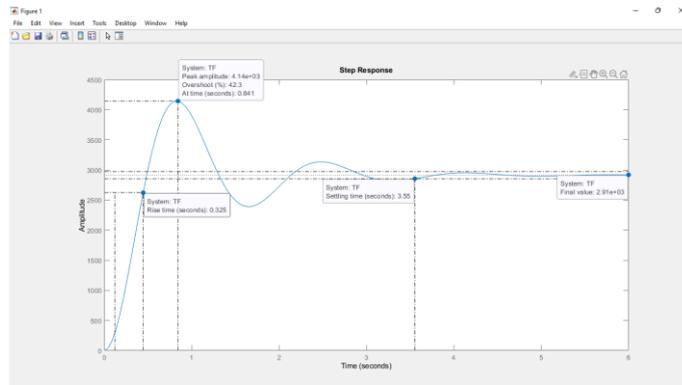
Tahap ini melibatkan simulasi sistem tanpa kontroler untuk menganalisis respons terhadap perubahan set point, beban, dan gangguan eksternal, serta evaluasi karakteristik sistem seperti rise time, settling time, overshoot, dan stabilitas [6].

2.5 Perancangan Sistem Kendali

Berdasarkan transfer function sistem motor DC, langkah selanjutnya adalah merancang kontroler yang sesuai untuk mengatur kecepatan motor. Kontroler yang umum digunakan adalah kontroler PID (Proporsional-Integral-Derivative). Proses ini mencakup penyesuaian parameter kontroler untuk memastikan kinerja sistem yang stabil dan responsif [8].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Sistem

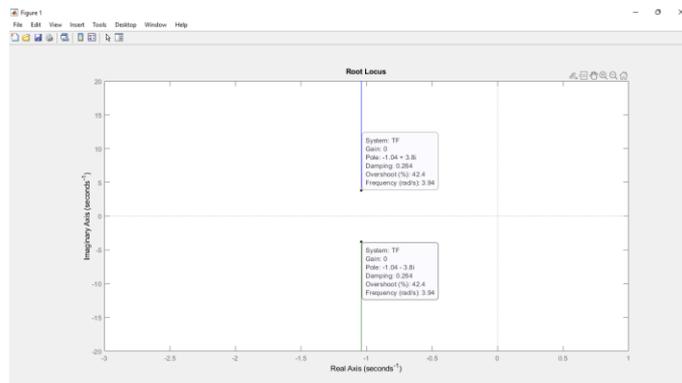


Gambar 2 Step Respons karakteristik Sistem

Tabel 2 Karakteristik Sistem

Karakteristik Sistem	Karakteristik Sistem Awal	Karakteristik Sistem yang Diinginkan
Settling Time	3.55 s	> 2 s
Rise Time	0.325 s	> 0.2 s
Peak Time	0.841	-
Overshoot %	42.3%	> 10%

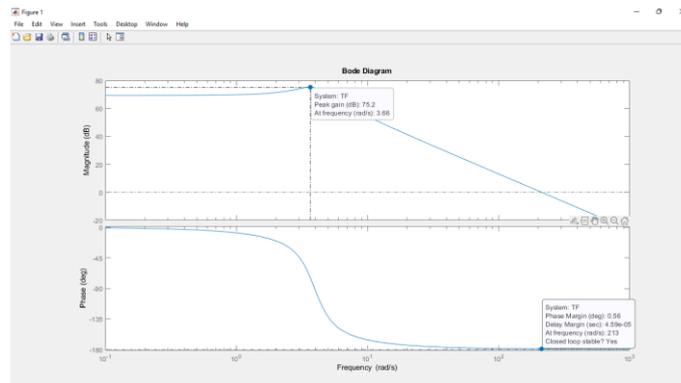
Dari karakteristik sistem yang ada dan yang diinginkan, dapat dilihat bahwa sistem yang ada memiliki beberapa parameter yang memenuhi atau bahkan melebihi spesifikasi yang diinginkan. Namun, ada beberapa aspek yang perlu diperbaiki untuk mencapai kinerja yang diinginkan.



Gambar 3 Diagram Root Locus Sistem

Pada grafik root locus motor DC Pitman Series GM 9000 tipe GM9X33, perlu diperhatikan bahwa nilai pole $(-1.04+j3.8)$ dan $(-1.04-j3.8)$ merupakan nilai kompleks konjugat yang berkaitan dengan karakteristik sistem.

Root locus adalah representasi grafis dari pergerakan nilai pole sistem sebagai respons terhadap perubahan posisi titik kontrol [9]. Dalam kasus ini, nilai pole yang diperoleh adalah $(-1.04+j3.8)$ dan $(-1.04-j3.8)$. pole $(-1.04+j3.8)$ dan $(-1.04-j3.8)$ menunjukkan adanya osilasi dalam sistem, tetapi dengan bagian real (-1.04) yang negatif. Sebagai hasilnya, meskipun ada osilasi yang terjadi, sistem cenderung stabil karena osilasi tidak berlanjut secara tak terbatas. Oleh karena itu, kestabilan sistem dalam hal ini dipertahankan meskipun terdapat osilasi.



Gambar 4 Diagram Bode Sistem

Gambar diatas merupakan plot diagram Bode untuk motor DC Pitman Series GM 9000 tipe GM9X33. Terlihat nilai phase margin sebesar 0.56 derajat, namun nilai gain margin tidak diketahui. Diagram Bode digunakan untuk menganalisis respons frekuensi sistem terhadap variasi frekuensi input. Dalam hal ini, phase margin yang diberikan menunjukkan sejauh mana sistem motor DC GM9X33 dapat mempertahankan stabilitasnya saat terjadi perubahan fase sebesar 0.56 derajat.

Namun, untuk melakukan analisis yang lebih lengkap dan akurat, diperlukan nilai gain margin. Gain margin merupakan ukuran seberapa jauh sistem berada dari batas kestabilan saat fase mencapai -180 derajat pada frekuensi tertentu. Tanpa nilai gain margin, analisis yang lebih rinci mengenai stabilitas sistem motor DC tidak dapat dilakukan.

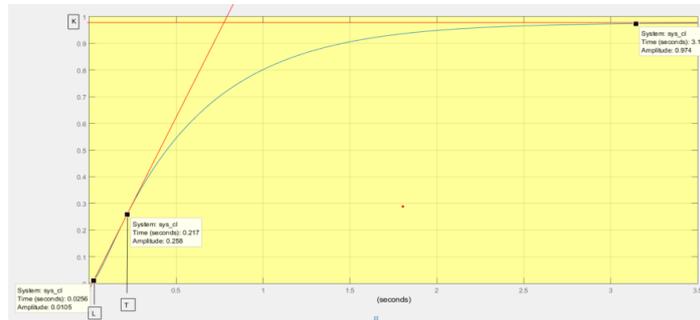
3.2 Perancangan Sistem kendali

3. 2.1 PID Ziegeler-Nicholse

Parameter P, PI, dan PID dapat di peroleh table persamaan Ziegler-Nichols dimana sebagai berikut ini [10]:

Tabel 3 Tabel Ziegler-Nichols

Type Alat Kontrol	Kp	Ti	Td
P	T/L	~	0
PI	0.9 T/L	L/0.3	0
PD	1.2 T/L	2L	0.5L



Gambar 5 Grafik Sistem Ziegler-Nichols (Penalaran)

Dari penalaran Ziegler-Nichols ditemukan nilai $L=0.256$ dan $T=0.217$

Tipe Alat Kontrol	Kp	Ti	Td
P	0.217/0.256	~	0
PI	0.9 (0.217/0.256)	0.256/0.3	0
PD	1.2 (0.217/0.256)	2(0.256)	0.5(0.256)

Dari Nilai tersebut diperoleh nilai Kp, Ti, dan Td sebagai berikut:

Tipe Alat Kontrol	Kp	Ti	Td
P	0.84765625	~	0
PI	0.76289025	0.853	0
PD	1.0171875	0.512	0.065536

Konversi Ti dan Td

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

$$K_d = K_p \times T_d$$

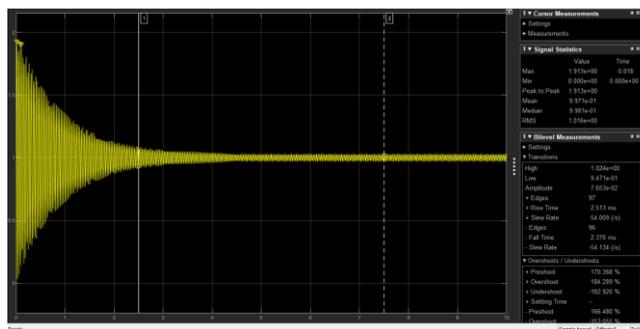
PI

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{0.76289025}{0.853} = 0.894361$$

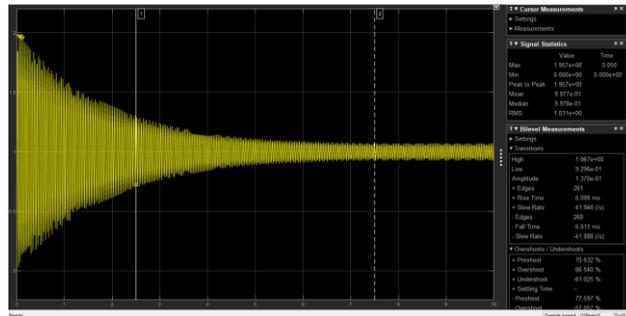
PID

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{1.0171875}{0.512} = 1.9866943359375$$

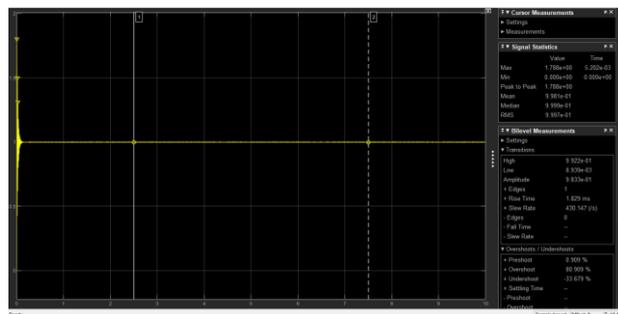
$$K_d = K_p \times T_d = 1.0171875 \times 0.065536 = 0.0666624$$



Gambar 6 Hasil Kontrol P dengan Metode Z-N



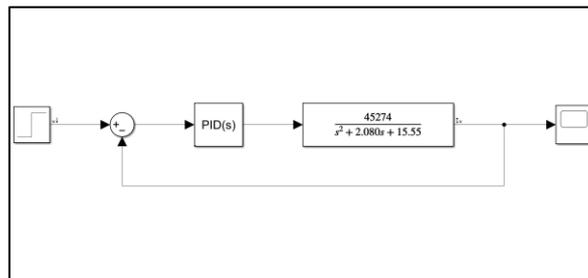
Gambar 7 Hasil Kontrol PI dengan Metode Z-N



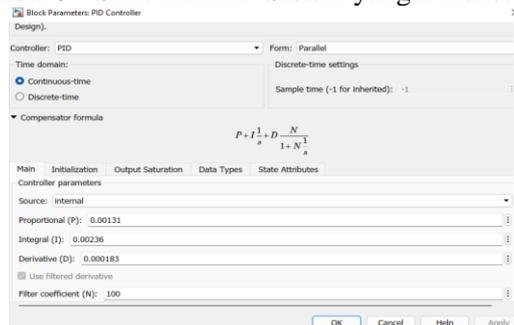
Gambar 8 Hasil Kontrol PID dengan Metode Z-N

Setelah dilakukan kontrol PID dengan metode Ziegler Nichols, bisa dikatan bahwa sistem tidak cocok menggunakan metode ini. Hal ini karena meskipun sistem bisa mencapai keadaan stabil, namun osilasi pada awal sistem bekerja sangat besar hal ini dapat merusak komponen pada sistem motor DC ini.

3. 2.2 PID Menggunakan Root Locus dan Diagram Bode

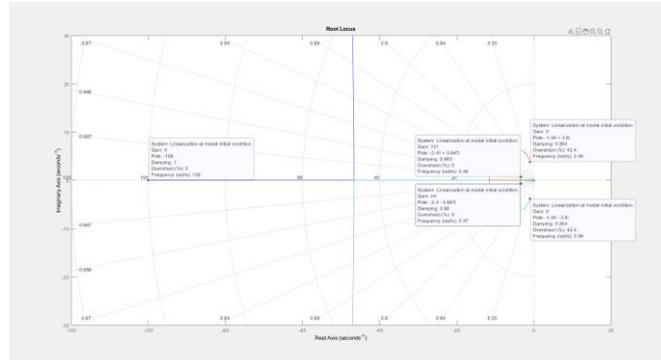


Gambar 9. Simulink PID Sistem yang Dikendalikan



Gambar 10 Nilai Konstanta Yang Digunakan

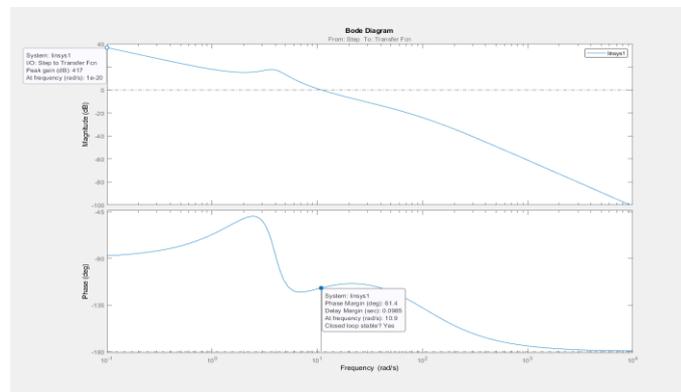
Plot Root Locus dan Bode yang akan ditampilkan merupakan hasil setelah ditambah kontrol PID manual:



Gambar 11 Grafik Root Locus Setelah Ditambah Kendali

Setelah ditambahkan kontrol PID pada sistem, munculnya titik zero pada $(-3.41+j0.647)$ dan $(-3.41-j0.647)$ menunjukkan adanya kontribusi kontrol dalam menghilangkan atau mengurangi respon terhadap frekuensi tertentu. Titik zero ini dapat membantu dalam memperbaiki respons sistem terhadap osilasi yang mungkin muncul sebelumnya.

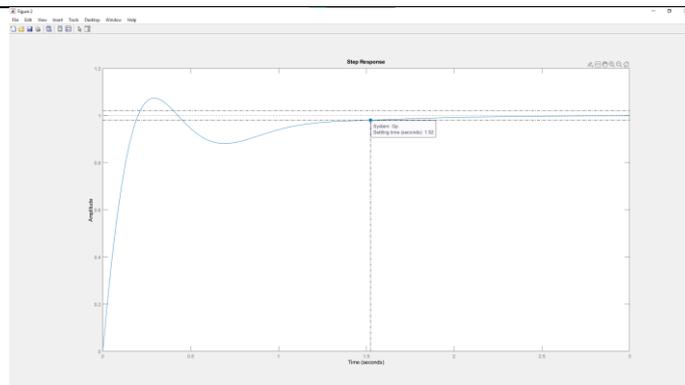
Selain itu, adanya titik pole baru pada -100 menunjukkan adanya penambahan karakteristik respons sistem yang baru. Posisi pole ini menentukan bagaimana sistem akan merespons perubahan input atau gangguan. Posisi pole yang sangat jauh di kiri (-100) menunjukkan bahwa sistem akan memiliki respons yang sangat cepat terhadap perubahan dan cenderung stabil.



Gambar 12 Diagram Bode Setelah Ditambah Kendali

Pada Hasil diagram bode masih tidak ditemukan nilai gain margin sehingga tidak dapat menganalisis kestabilan sistem berdasarkan diagram bode. Jika dalam hasil diagram Bode tidak ditemukan nilai gain margin, maka hal itu menunjukkan bahwa sistem tersebut tidak memiliki kestabilan yang jelas berdasarkan analisis menggunakan diagram Bode saja. Gain margin merupakan ukuran jarak antara gain sistem dan garis kestabilan pada diagram Bode. Jika tidak ada nilai gain margin yang terlihat, maka sulit untuk membuat kesimpulan yang pasti tentang kestabilan sistem hanya berdasarkan diagram Bode tersebut.

Namun jika dilihat dari keterangan pada plot diagram Bode pada MatLab terlihat ada keterangan yang mengatakan dalam keadaan close loop sistem stabil.



Gambar 13 Step Respons Setelah Digunakan Kendali PID

Dari Step Respon keseluruhan sistem, dapat disimpulkan bahwa penggunaan kontrol PID secara manual pada sistem motor DC ini berhasil mencapai spesifikasi yang diinginkan. Respons sistem mengalami perubahan yang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan, dengan nilai settling time di bawah 2 detik, nilai rise time di bawah 0.2 detik, dan overshoot di bawah 10%.

Di sisi lain, penggunaan metode Ziegler-Nichols untuk mengatur kontrol PID tidak menghasilkan respons yang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Hal ini menunjukkan bahwa metode tersebut tidak efektif dalam mencapai tujuan spesifikasi sistem yang telah ditetapkan.

Dalam hal ini, penggunaan kontrol PID secara manual telah mencapai spesifikasi yang diinginkan dengan baik. Oleh karena itu, metode ini bisa menjadi pilihan yang lebih cocok untuk mengendalikan sistem motor DC dalam kasus ini, daripada mencoba metode lain yang tidak menghasilkan hasil sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.

4. KESIMPULAN

Penggunaan kontrol PID secara manual pada sistem motor DC berhasil mencapai spesifikasi yang diinginkan dengan nilai settling time di bawah 2 detik, nilai rise time di bawah 0.2 detik, dan overshoot di bawah 10%. Metode Ziegler-Nichols, lead-lag root locus, dan lead-lag Bode tidak memberikan hasil yang sesuai dengan spesifikasi sistem tersebut.

Penting untuk mencatat bahwa penggunaan kontrol PID secara manual dapat memberikan keberhasilan dalam mengendalikan sistem motor DC, tetapi metode lain seperti Ziegler-Nichols memerlukan lebih banyak penyesuaian untuk mencapai hasil yang diinginkan. Dalam kasus ini, kompleksitas koefisien fungsi transfer sistem motor DC mungkin menjadi hambatan dalam menerapkan metode tersebut.

5. SARAN

Untuk penelitian lebih lanjut, disarankan untuk mengeksplorasi metode kontrol lainnya yang mungkin lebih cocok untuk mengatasi kompleksitas koefisien fungsi transfer sistem motor DC, serta melakukan analisis lebih lanjut terhadap faktor-faktor yang memengaruhi kinerja kontroler PID secara manual untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem kendali.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. R. Wibowo, "RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR DC SEBAGAI MEDIA PEMBELAJARAN PRAKTIKUM SISTEM KENDALI MENGGUNAKAN LABVIEW," *JST (Jurnal Sains Ter.*, vol. 6, no. 2, Sep. 2020.
 - [2] S. W. SYAHRIAL WALUYO; FITRIANSYAH, ADITYA, "Analisis Penalaan Kontroller PID pada Simulasi Kendali Kecepatan Putaran Motor DC," *Reka Elkomika*, vol. 1, no. Vol 1, No 4 (2013), pp. 360–372, 2013.
 - [3] D. Pramanda and A. Aswardi, "Sistem Kendali Kecepatan Motor DC Berbasis Arduino dengan Metode Open Loop," *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 6, no. 1, p. 187, 2020.
 - [4] H. Supriyanto, F. Suryatini, A. R. H. Martawireja, and H. Rudiansyah, "IMPLEMENTASI KONTROLER PID DENGAN METODE TUNING ZIEGLER-NICHOLS DAN COHEN-COON PADA SISTEM SCADA KENDALI LEVEL AIR," *JTT (Jurnal Teknol. Ter.*, vol. 8, no. 2, p. 149, Oct. 2022.
 - [5] T. Pujiati and R. Risfendra, "Penerapan Kontroler PID Pada Sistem Kendali Level cairan Dengan Metode Ziegler-Nichols Berbasis Arduino," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 2, no. 1, pp. 55–60, Feb. 2021.
 - [6] R. S. Zulkifli, "Pengaruh Kendali Kecepatan Motor DC Pada Chopper Drive," *J. Tek. Elektro dan Komput. TRIAC*, vol. 8, no. 2, pp. 39–43, 2021.
 - [7] M. Ali, "Pembelajaran Perancangan Sistem Kontrol PID Dengan Software Matlab," *J. Edukasi Elektro*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2004.
 - [8] M. A. Taut, G. Chindris, and D. Pitica, "Real-Time System with Integrated PID Algorithm Used for DC Motor Control," in *2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 2019, pp. 1–6.
 - [9] R. Muhardian and K. Krismadinata, "Kendali Kecepatan Motor DC Dengan Kontroller PID dan Antarmuka Visual Basic," *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 6, no. 1, p. 328, 2020.
 - [10] V. V. Angelli, "Analisa Perancangan Pengendali PID dengan Metode Ziegler Nichols pada Motor DC," *Pros. Sains Nas. dan Teknol.*, vol. 12, no. 1, p. 639, Dec. 2022.
-