

Desain Kendali Kecepatan Motor DC Pada *Mobile Robot Mecanum Wheels*

*Imam Taufiqurrahman¹, Andri Ulus Rahayu², Moch Yuagga Permana³, Ramdani R⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi
^{1,2,3,4}Jl. Siliwangi No. 24, Kota Tasikmalaya, 53212, Indonesia

E-mail: ¹imamtaufiqurrahman@unsil.ac.id, ²andriulusrahayu@unsil.ac.id,
³217002010@student.unsil.ac.id, ⁴197002041@student.unsil.ac.id

Abstrak— Dalam era perkembangan teknologi yang pesat, tantangan di bidang industri dalam aspek otomasi terus mengalami peningkatan. Robotika kini hadir sebagai salah satu solusi dan terus menjadi fokus utama dalam berbagai penelitian. *Mobile robot* dengan berbagai variasi jumlah dan jenis roda merupakan salah satu jenis yang banyak diteliti untuk memenuhi kebutuhan otomasi. Salah satu inovasi yang menarik perhatian adalah penggunaan roda mecanum yang memberikan kemampuan gerak omnidirectional, jauh lebih unggul dibandingkan roda konvensional. Dalam penelitian ini dikembangkan sebuah sistem kendali untuk motor DC yang digunakan pada *mobile robot* beroda mecanum. Desain kendali ini bertujuan untuk memberikan presisi dalam mengontrol kecepatan serta arah gerak robot. Dengan menerapkan teknik kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*), sistem ini mampu mengatur kecepatan setiap motor DC pada keempat roda secara optimal, sehingga memungkinkan robot bergerak dengan lancar dan mulus ke segala arah. Penelitian ini menghasilkan motor DC dengan kendali PID yang memiliki rise time di bawah 15 detik dan memiliki parameter PID yaitu $K_p = 10$, $K_i = 0.5$, dan $K_d = 2$. Sehingga parameter yang telah dihasilkan dapat digunakan untuk mengontrol kecepatan motor DC pada *mobile robot* dengan roda mecanum.

Kata kunci: motor DC, *mobile robot*, *mecanum wheels*, PID (*Proportional-Integral-Derivative*)

Abstract— In an era of rapid technological development, the challenges facing the industrial sector in terms of automation continue to increase. Robotics is now present as one of the solutions and continues to be the focus of various studies. *Mobile robots*, with different numbers and types of wheels, are one of the types that are being widely researched to meet automation needs. One innovation that is attracting attention is the use of *mecanum wheels*, which provide omnidirectional motion capabilities that are far superior to conventional wheels. This research develops a control system for the DC motor used in the *mecanum wheel mobile robot*. This control design aims to provide precision in controlling the speed and direction of the robot's motion. By applying the PID (*Proportional-Integral-Derivative*) control technique, the system is able to optimally regulate the speed of each DC motor on all four wheels, allowing the robot to move smoothly in all directions. This research produces a PID controlled DC motor with a rise time of less than 15 seconds and PID parameters of $K_p = 10$, $K_i = 0.5$ and $K_d = 2$. The

generated parameters can be used to control the speed of DC motors on mobile robots with mecanum wheels.

Keywords: DC motor, *mobile robot*, *mecanum wheels*, PID (*Proportional-Integral-Derivative*)

I. PENDAHULUAN

Dengan pesatnya perkembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK), serta kemajuan dalam proses industri yang kini tidak hanya mengandalkan otomasi berbasis komputer ada berbagai sistem fisik kompleks yang mulai diintegrasikan. Teknologi ini seperti *Internet of Things* (IoT), *cloud computing*, dan *cognitive computing* semakin banyak digunakan. Salah satu tantangannya kemajuan dalam bidang robotika. Sistem robotika yang canggih lahir dari perpaduan disiplin ilmu mekanika, elektronika, dan komputer. Salah satu jenis robot yang tengah berkembang adalah *mobile robot* yang dilengkapi dengan penggerak berupa roda dalam berbagai jenisnya sesuai dengan tujuan atau misi yang akan dicapai. Jenis roda ini yang digunakan dapat memengaruhi kemampuan manuver robot dalam menyelesaikan tugas-tugasnya [1].

Salah satu inovasi menarik dalam perkembangan *mobile robot* adalah penerapan roda mecanum yang memungkinkan pergerakan robot secara omnidirectional dengan berbagai arah tanpa perlu mengubah orientasi fisiknya [2]. Fleksibilitas ini sangat dibutuhkan dalam banyak aplikasi, terutama di sektor industri yang memerlukan tingkat mobilitas tinggi serta kemampuan manuver di area yang terbatas atau memiliki konfigurasi ruang yang rumit [3].

Penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem kendali untuk motor DC yang menggerakkan *mobile robot* beroda mecanum. Dengan menggunakan teknik kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*), sistem ini dirancang untuk mengatur kecepatan setiap roda secara optimal. Kendali PID memungkinkan robot bergerak dengan halus dan akurat dalam segala arah, memberikan tingkat kontrol yang tinggi atas arah dan kecepatan gerak. Penulis mendesain kendali PID ke 4 buah motor DC untuk mendapatkan set point yang akurat dan robot dapat berjalan kesegala arah dengan kecepatan pada masing-masing roda mecanum.

II. METODE

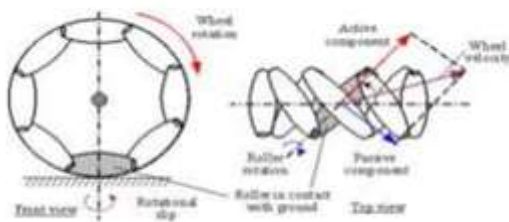
Pada bagian metode ini ada beberapa kajian teoretis yang berkaitan dengan penelitian akan dibahas pada bagian ini.

A. Mecanum Wheels

Mecanum Drive adalah salah satu sistem gerak berbasis holonomic yang memungkinkan robot bergerak bebas ke segala arah sambil tetap mempertahankan orientasi tertentu. Sistem ini menggunakan roda khusus yang dikenal sebagai *mecanum wheels* Gambar 1, yang memiliki pusat roda dikelilingi oleh roller bebas yang disusun pada sudut 45° terhadap lingkaran roda. Dengan mengatur arah dan kecepatan masing-masing roda, kombinasi gaya yang dihasilkan memungkinkan robot bergerak sesuai dengan arah yang diinginkan untuk memberikan fleksibilitas dan mobilitas penuh [4]. Roda Mecanum disebut sebagai roda Ilon atau roda Swedia yang diciptakan pada tahun 1973 oleh insinyur Swedia, Bengt Ilon. Pada gambar 2 roda ini memiliki tiga derajat kebebasan (*degree of freedom*), yakni putaran roda, rotasi roller, dan slip rotasi terhadap sumbu vertikal yang melewati titik kontak antara roda dan permukaan [5].



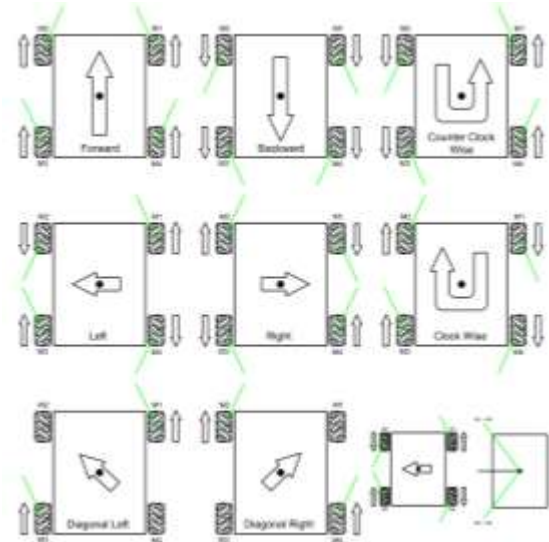
Gambar 1. Mecanum wheels 45°



Gambar 2. Derajat kebebasan *mecanum wheels*

Desain mekanik roda mecanum memang lebih kompleks dibandingkan roda biasa, namun memiliki keunggulan dalam hal kestabilan terutama pada beban berat. Umumnya pada mobile robot dengan roda mecanum berbentuk persegi atau persegi panjang dengan roda di kedua sisi yang dilengkapi roller pada sudut $+45^\circ$ dan -45° . Arah dan kecepatan tiap roda menghasilkan gaya resultan yang memungkinkan pergerakan

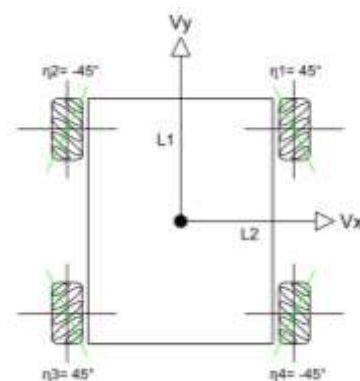
linier tanpa mengubah orientasi robot atau sudut roda, sehingga memberikan mobilitas yang tinggi tanpa perlu memutar arah hadap robot Gambar 3.



Gambar 3. Mecanum drive

B. Inverse Kinematics

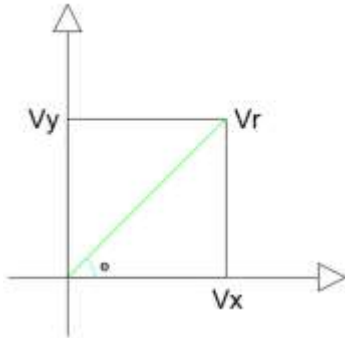
Dalam penelitian ini, dibutuhkan persamaan kinematika terbalik (*inverse kinematics/IK*) untuk mengatur pergerakan robot ke berbagai arah. Persamaan IK digunakan untuk menentukan kecepatan putaran motor yang sesuai dengan arah gerak yang diinginkan. Persamaan kinematik mendefinisikan beberapa bagian dari pergerakan robot, diantaranya kecepatan V_x , V_y dan ω menjadi persamaan kecepatan sudut masing-masing roda [6].



Gambar 4. Vektor pergerakan robot

Pada Gambar 4 dijelaskan bahwa a) merupakan jarak antara roda depan dan titik pusat robot. b) merupakan jarak roda samping dengan titik pusat robot. v_i merepresentasikan

kecepatan roda nomor i , v_i merepresentasikan kecepatan dari roler, V_x , V_y dan ω merepresentasikan kecepatan robot dan kecepatan sudut dalam sumbu x [7].



Gambar 5. Konfigurasi dan resultan gaya robot

Dengan merujuk pada konfigurasi desain robot mecanum pada Gambar 9. Di mana R adalah jari-jari roda; ω_i adalah kecepatan sudut roda ke- i ($i = 1 \dots 4$); l_1, l_2 adalah jarak antara sumbu roda dan pusat badan robot mecanum dan $L=l_1+l_2$.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ l_1 + l_2 & -l_1 + l_2 & -l_1 + l_2 & l_1 + l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{M1} \\ \omega_{M2} \\ \omega_{M3} \\ \omega_{M4} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R\omega_1 \\ R\omega_2 \\ R\omega_3 \\ R\omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -(l_1 + l_2) \\ 1 & -1 & (l_1 + l_2) \\ 1 & -1 & -(l_1 + l_2) \\ 1 & 1 & (l_1 + l_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Gambar 5 menunjukkan persamaan vektor roda mecanum. Persamaan 3 menjadi acuan dalam menurunkan Persamaan IK. Hasil dari persamaan IK yang diturunkan akan diimplementasikan pada setiap roda mecanum. Dengan memahami resultan kecepatan (V_r) dan arah (θ), diperoleh kecepatan pada sumbu y (V_y) dan sumbu x (V_x), nilai-nilai ini akan digunakan dalam solusi persamaan IK pada robot mecanum. Langkah-langkah menurunkan persamaan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$V_r = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x} \quad (4)$$

$$V_r^2 = V_x^2 + V_y^2 \quad (5)$$

$$V_y = \sqrt{V_r^2 - V_x^2} \quad (6)$$

Dengan menyubstitusi (6) ke (4), diperoleh:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x} \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_y^2}{V_x^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_r^2 - V_x^2}{V_x^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$(\tan \theta)^2 = \frac{V_r^2 - V_x^2}{V_x^2} \quad (10)$$

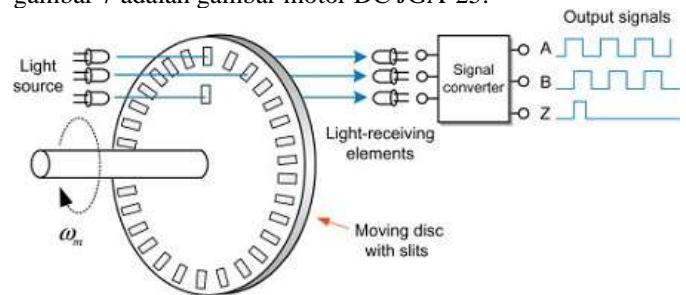
$$V_x^2 = \frac{V_r^2}{(\tan^2 \theta) + 1} \quad (11)$$

$$V_x = \sqrt{\frac{V_r^2}{(\tan^2 \theta) + 1}} \quad (12)$$

Dengan menggunakan (6) dan (7), nilai V_y dan V_x akan digunakan dalam solusi persamaan IK pada robot mecanum.

C. Motor DC Encoder

B Joshie, dkk dalam penelitiannya, penggunaan motor DC encoder sebagai umpan balik (feedback). Dikombinasikan dengan pengendalian PID. Struktur dasar motor DC encoder terdiri dari tiga bagian utama yaitu, cakram berlubang, sumber cahaya, dan detektor cahaya ganda [8]. motor DC encoder memiliki fungsi untuk membaca nilai kecepatan motor, lalu hasil pembacaan tersebut dibandingkan dengan nilai referensi (set point) sehingga menghasilkan nilai error [9]. Gambar 6 menunjukkan diagram skematik dari motor DC encoder, dan gambar 7 adalah gambar motor DC JGA-25.



Gambar 6. Diagram skematik motor DC encoder



Gambar 7. Motor DC JGA-25

Nilai error akan digunakan sebagai masukan pengendali PID agar dapat mengontrol kecepatan motor DC sehingga dapat mencapai nilai referensi. nilai yang dihasilkan dari pengendalian PID adalah sinyal Pulse Width Modulation (PWM). untuk menghitung kecepatan putaran motor dapat ditentukan dengan persamaan berikut [3]. Motor DC JGA-25 100 RPM ini memiliki spesifikasi nilai pulsa per rotasi sebesar 11 PPR, dan gear ratio sebesar 1:75.

$$\omega = \frac{r}{t} \quad (13)$$

Dengan:

ω = kecepatan motor

r = jumlah putaran

t = waktu sampel

untuk menghitung jumlah putaran (r) yang diperoleh dihitung dengan persamaan berikut:

$$r = \frac{p}{P_R} \quad (14)$$

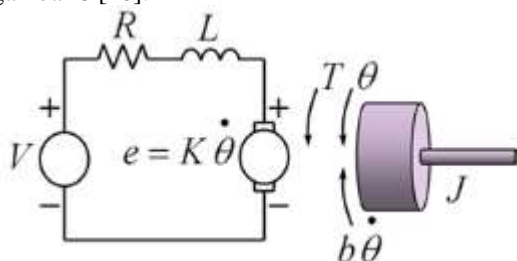
dengan:

p = jumlah pulsa

P_R = jumlah pulsa saat motor diputar 360

D. Low Level PID Speed Control

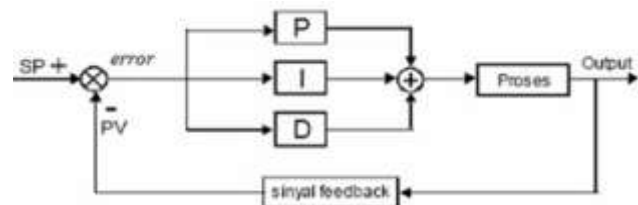
Ada beberapa pengontrol konvensional dan jenis pengontrol numerik yang dimaksudkan untuk mengendalikan. Kecepatan motor DC. Baru-baru ini, banyak kontrol modern metodologi seperti kontrol nonlinier, optimal kontrol, kontrol struktur variabel, dan adaptif. Namun, pendekatan pendekatan ini rumit secara teori atau sulit untuk diimplementasikan. Pengontrol PID algoritma melibatkan tiga parameter yang dilambangkan P, I dan D yang diinterpretasikan dalam hal waktu. P bergantung pada kesalahan saat ini, I pada akumulasi kesalahan masa lalu, dan D adalah prediksi kesalahan di masa depan. Kontrol PID dengan tiga istilahnya fungsionalitas yang mencakup kondisi transien dan mantap respons, menawarkan yang paling sederhana namun paling efisien solusi untuk banyak masalah kontrol dunia nyata. Terlepas dari struktur sederhana dan kekokohan metode ini, keuntungan penyetulan optimal dari pengontrol PID sudah cukup sulit. Rangkaian ekivalen listrik dari kumparan dan diagram rotor ditunjukkan pada gambar 8 [10].



Gambar 8. Model Motor DC

E. Kendali PID

Salah satu metode untuk mengendalikan kecepatan motor adalah menggunakan metode kendali PID (*Proportional-Integrative-Derivative*). Sistem kendali PID merupakan sebuah sistem kendali tertutup (*closed-loop*) dimana digunakan suatu umpan balik (*feedback*) berupa tingkat kesalahan suatu variabel proses dimana tingkat kesalahan ini kemudian dikalikan dengan gain-gain proporsional, integral, dan derivatif untuk menghasilkan output yang sesuai dengan nilai variabel proses yang kita inginkan. Sistem kendali PID telah diterapkan dalam beberapa aplikasi pada industri termasuk juga pada aplikasi robotika. Sistem kendali PID dapat diaplikasikan pada pengendalian robot *line follower*, dimana PID digunakan untuk mengoreksi dan mengendalikan posisi robot agar tidak keluar dari jalur yang ditentukan dan tetap mengikuti jalur tersebut [11]. Gambar 6 menunjukkan diagram blok dari sebuah sistem closed loop dengan menggunakan kontrol PID.



Gambar 9. Diagram blok closed loop system dengan kontrol PID

Secara matematis, sinyal kontrol PID dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut.

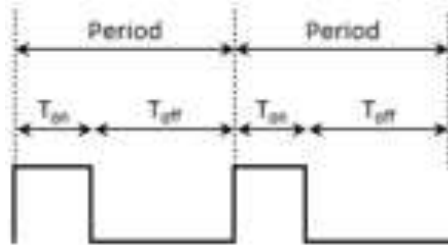
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

Pada persamaan 15 $e(t)$ adalah eror antara set poin dengan hasil pengukuran. $u(t)$ adalah sinyal PWM yang dihasilkan dari perhitungan kontrol PID untuk motor DC. K_p , K_i , dan K_d adalah nilai dari konstanta penguatan berturut-turut untuk proporsional, integral, dan derivatif. K_p berkontribusi secara langsung mengurangi steady state error. K_i memiliki karakteristik yang sama dengan K_p namun meningkatkan nilai rise time sinyal keluaran. K_d bertujuan untuk mengurangi nilai overshoot yang terjadi pada sinyal keluaran [1].

F. Pulse Width Modulation (PWM)

PWM (pulse width modulation) adalah teknik yang digunakan untuk mengatur nilai rata-rata tegangan pada suatu perangkat elektronik. dengan menghidupkan dan mematikan daya dengan kecepatan yang tinggi. tegangan rata-rata yang diberikan tergantung pada duty cycle. duty cycle adalah perbandingan antara periode sinyal ON terhadap total sinyal

dalam satu siklus. Gambar 7 merupakan diagram duty cycle dari sebuah potongan sinyal PWM [12].



Gambar 10. Duty cycle

Berdasarkan uraian sebelumnya, duty cycle secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$\text{Periode} = 1/f$$

$$\text{Periode} = T_{on} + T_{off}$$

$$\text{duty cycle} = \frac{T_{on}}{(T_{on}+T_{off})} \times 100\%$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada hasil dan pembahasan akan dijelaskan dari sistem yang telah dibuat agar diperoleh data untuk mengetahui alat yang telah dirancang.

A. Pengujian Pembacaan Sensor Encoder

Pengujian dilakukan untuk mengetahui perbandingan hasil pembacaan kecepatan motor DC oleh encoder yang dibandingkan dengan pembacaan hasil pengukuran kecepatan dengan tachometer. Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran kecepatan motor DC.

Tabel 1. Pengujian Pembacaan Sensor encoder

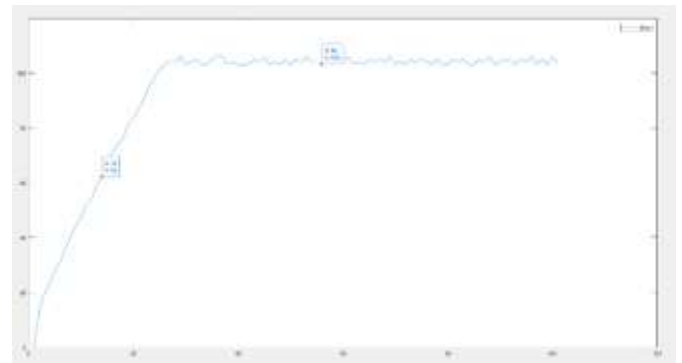
PWM	Hasil Pembacaan Encoder (rpm)	Hasil Pembacaan Tachometer (rpm)	Persen Error (%)
30	0	0	0%
60	19,33	18,6	3,8%
90	39,27	41,5	5%
120	53,84	55,6	3%
150	64,4	66,9	3,9%
180	69,22	72,1	4%
210	75,44	77,6	3%

250	64,40	66,90	3,9%
Rata-Rata Error			3%

Berdasarkan hasil pengujian didapatkan nilai rata-rata error dari pembacaan sensor encoder sebesar 3%.

B. Model Motor DC JGA-25

Pemodelan motor DC bertujuan untuk menganalisis kinerja dari motor DC serta mengetahui karakteristik kerja motor DC. Bentuk model dari motor DC JGA-25 adalah sebuah transfer function. Model motor DC yang dihasilkan adalah open loop transfer function. Gambar 9 menunjukkan hasil pengujian model motor DC JGA-25 dengan menggunakan pemrograman di MATLAB.

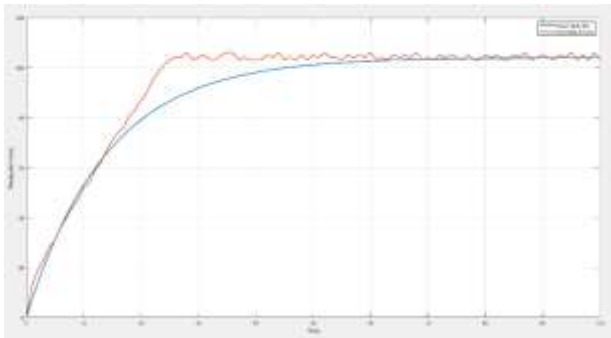


Gambar 11. Grafik Hasil Uji Model

Transfer yang dihasilkan dapat dipanggil di MATLAB. *Transfer function* dari model motor ditunjukkan dalam persamaan 16 berikut. Spesifikasi dari model ini menghasilkan nilai rise time sebesar 200 ms dan overshoot sebesar 6% serta error steady state sebesar 3%.

$$\frac{0.4}{14s + 1} \quad (16)$$

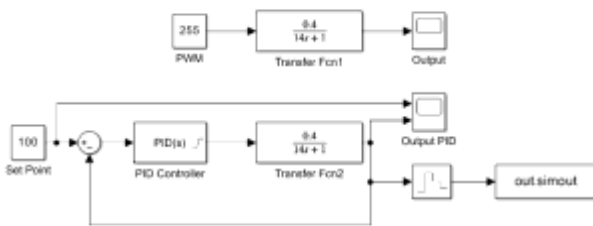
Selanjutnya adalah melakukan verifikasi kurva antara model dengan data pengujian motor DC JGA-25 sebelum diberikan kontrol PID. Gambar 10 menunjukkan hasil verifikasi antara model motor dengan hasil pengujian motor DC JGA-25.



Gambar 12. Hasil verifikasi antara model motor dengan pengujian sebelum diberikan kontrol PID

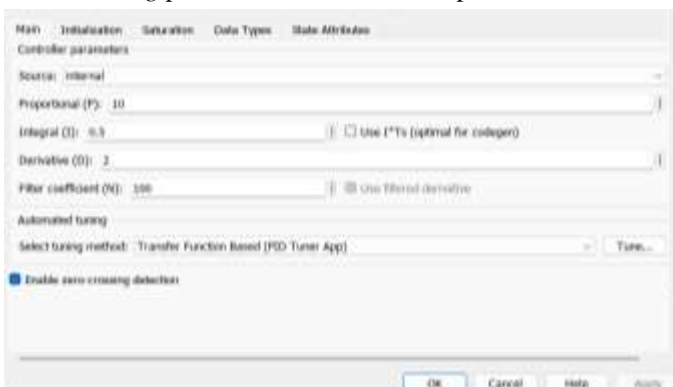
C. Perancangan Pengendali PID

Pada tahap ini dilakukan perancangan pengendali PID. Perancangan ini dilakukan untuk menentukan parameter penguatan yang akan diaplikasikan pada sistem. Analisis yang dilakukan adalah tuning PID secara manual di Simulink MATLAB. Gambar 12 menunjukkan blok sistem perancangan PID di Simulink dengan spesifikasi rise time < 150 ms, max overshoot 5% dan error steadystate max 5%.



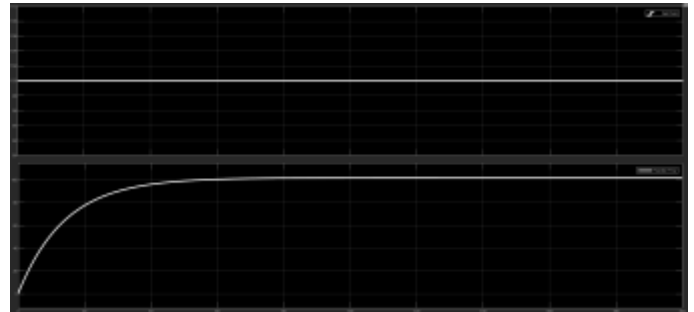
Gambar 13. Blok sistem perancangan pengendali PID

Selanjutnya dilakukan tuning parameter PID, yang dilakukan secara manual. Gambar 12 menunjukkan hasil *manual tuning* parameter PID untuk diterapkan ke sistem.



Gambar 14. Manual tuning parameter PID

Dari hasil manual tuning, didapatkan nilai parameter kontrol PID yakni Kp, Ki, dan Kd berturut-turut adalah 10, 0.5, dan 2. Hasil simulasi menghasilkan grafik keluaran PID, yang ditunjukkan pada gambar 14.



Gambar 15. Step respond model motor

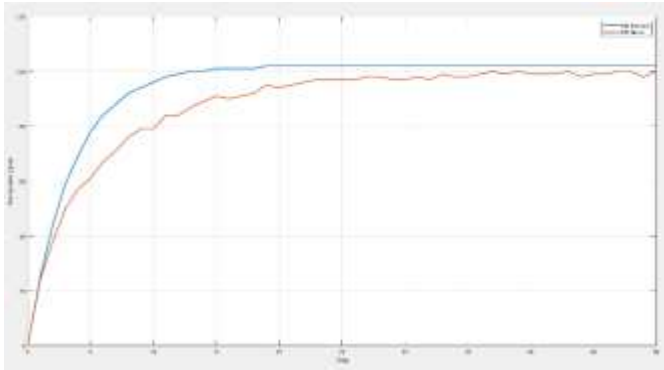
Pada bagian atas dari gambar 14 menunjukkan set point yang diharapkan yaitu nilai rpm sebesar 100 rpm. Bagian bawah dari gambar 14 menunjukkan grafik *step response* dari model motor DC setelah dilakukan tuning parameter PID. Didapatkan spesifikasi dari *step respond* yaitu *rise time* sebesar 7,1329 detik, *settling time* 120 ms, dan *overshoot* sebesar 1,999% serta *error steady state* 3%.

D. Pengujian Pengendali kecepatan dengan PID

Pada bagian ini dilakukan pengujian kendali kecepatan motor DC JGA-25. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian motor DC JGA-25 setelah diberikan kontrol PID dengan model motor DC hasil tuning PID pada MATLAB dengan Simulink. Gambar 15 menunjukkan perbandingan antara hasil pengujian motor DC dengan hasil simulasi.



Gambar 16. Pengujian motor DC JGA-25



Gambar 17. Grafik hasil pengujian PID motor DC terhadap PID Simulink

Pada gambar 16 grafik berwarna jingga menunjukkan *step respond* dari pengujian motor DC yang dibandingkan terhadap *step respond* dari hasil simulasi tuning PID Simulink MATLAB yang ditunjukkan dengan grafik berwarna biru. Dari hasil pengujian PID motor DC JGA-25 didapatkan spesifikasi dari *step respond* dengan *rise time* 140 ms, *settling time* sebesar 330 ms, dan *overshoot* sebesar 0% dan error steady state sebesar 3%. Hal ini menunjukkan bahwa perbandingan antara implementasi motor DC JGA-25 dengan Simulink MATLAB dapat dikatakan mendekati dengan parameter yang telah dilakukan tuning PID pada Simulink MATLAB.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini didapatkan bahwa model motor DC dengan pendekatan orde 1 dapat dijadikan acuan tuning PID pada simulasi. Baik response tuning pada simulasi maupun implementasi dapat memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan. Sehingga parameter yang didapatkan bisa digunakan pada mobile robot dengan roda mecanum.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada ucapan terima kasih berisi ucapan terima kasih terhadap pendonor dana, atau kepada pihak – pihak yang secara penting berperan dalam penelitian ini. Judul untuk ucapan terima kasih dan referensi tidak diberi nomor.

REFERENSI

- [1] R. A. Maulana, B. Herawan, M. E. Hidayat, and Fauziah, "Robot Entertainment Berbasis Mecanum Wheel," pp. 7–13, 2023.
- [2] B. Chu, "Performance evaluation of Mecanum wheeled omni-directional mobile robot," *31st Int. Symp. Autom. Robot. Constr. Mining, ISARC 2014 - Proc.*, no. Isarc, pp. 784–789, 2014, doi: 10.22260/isarc2014/0106.
- [3] J. Qian, B. Zi, D. Wang, Y. Ma, and D. Zhang, "The design and development of an Omni-Directional mobile robot oriented to an intelligent manufacturing system," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 9, 2017, doi: 10.3390/s17092073.

- [4] A. R. Hakim, Sumardi, and M. A. Riyadi, "Kontrol Posisi Pada Sistem Pergerakan Mobile Robot Roda Mecanum Menggunakan Kontrol Pid Berbasis Invers Kinematic," *Transient*, vol. 4, no. 3, pp. 463–470, 2015.
- [5] Muliady and G. Arisandy, "IMPLEMENTASI SISTEM GERAK HOLONOMIC PADA ROBOT KRSBI BERODA 2017 IMPLEMENTATION OF HOLONOMIC MOTION IN INDOONESIAN SOCCER WHEELED ROBOT CONTEST 2017 Pada Kontes Robot Indonesia 2017 divisi Kontes Robot Sepak Bola Indonesia," *J. Tek. dan Ilmu Komput.*, vol. 7, no. 25, pp. 9–25, 2017.
- [6] F. Fahmizal, A. Priyatmoko, and A. Mayub, "Implementasi Kinematika Trajectory Lingkaran pada Robot Roda Mecanum," *J. List. Instrumentasi dan Elektron. Terap.*, vol. 3, no. 1, pp. 25–30, 2022, doi: 10.22146/juliet.v3i1.74760.
- [7] T. H. Prasetyo, I. Siradjuddin, and S. Sungkono, "Sistem Kendali Wall Following Pada Mobile Robot Dengan Penggerak Mecanum Menggunakan Metode Fuzzy," *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 8, no. 3, p. 214, 2021, doi: 10.33795/elk.v8i3.268.
- [8] B. Joshi, R. Shrestha, and R. Chaudhary, "Modeling , Simulation and Implementation of Brushed DC Motor Speed Control Using Optical Incremental Encoder Feedback DC Motor Model Simulink Modeling , Simulation and Parameter estimation," *Proceeding IOE Grad. Conf.*, no. November, pp. 497–505, 2014.
- [9] M. R. A. Nurkholis Putera and R. Hidayat, "Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan Pengendali PID dengan Encoder sebagai Feedback," *STRING (Satuan Tulisan Ris. dan Inov. Teknol.)*, vol. 7, no. 1, p. 50, 2022, doi: 10.30998/string.v7i1.13026.
- [10] B. Sandeep Kumar Malu, J. Majumdar, S. Kumar Malu α , and J. Majumdar σ , "Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot Global Journal of Researches in Engineering: H Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot," *Type Double Blind Peer Rev. Int. Res. J. Publ. Glob. Journals Inc.*, vol. 14, no. 1, 2014.
- [11] R. A. Ardiansyah, "Perancangan dan Pengujian Sistem Pengendali Sudut untuk Motor DC Brushless Menggunakan Kendali Algoritma P-D," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 13, no. 2, p. 82, 2017, doi: 10.17529/jre.v13i2.7149.
- [12] M. M. Maung, M. M. Latt, and C. M. Nwe, "DC Motor Angular Position Control using PID Controller with Friction Compensation," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 8, no. 11, 2018, doi: 10.29322/ijsrp.8.11.2018.p8321.