

Pengujian model kinematika robot mecanum melalui simulasi MATLAB dan analisis pergerakan robot

Akhdanul Huda¹, Novian Fajar Satria², Nofria Hanafi³

e-mail: ¹akhdanulhuda209@me.student.pens.ac.id, ²ovinmeka@pens.ac.id, ³hanafi@pens.ac.id

^{1,2,3}Jurusan Teknik Mekatronika, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 21 Maret 2025

Direvisi 7 September 2025

Diterbitkan 30 April 2026

Kata kunci:

Robot Mecanum

Simulasi MATLAB

Analisis Pergerakan Robot

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menguji dan membandingkan model kinematika robot Mecanum melalui pendekatan simulasi MATLAB dan analisis pergerakan robot secara eksperimental. Robot Mecanum dikenal dengan kemampuannya untuk bergerak *omnidirectional*, yang memungkinkan navigasi fleksibel dalam berbagai arah tanpa perlu berputar. Untuk mencapai tujuan tersebut, model kinematika robot Mecanum pertama-tama diuji melalui simulasi MATLAB, yang memberikan gambaran teoritis tentang pergerakan robot pada berbagai kecepatan dan sudut. Selanjutnya, pengujian eksperimental dilakukan untuk memverifikasi hasil simulasi dengan pergerakan robot nyata. Pengujian dilakukan menggunakan robot Mecanum yang dilengkapi dengan encoder untuk memantau pergerakan robot dalam berbagai konfigurasi jalur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat kesesuaian yang signifikan antara prediksi pergerakan dari simulasi kinematika dan hasil pergerakan robot yang sesungguhnya, dengan kesalahan yang dapat diterima pada kondisi pengujian yang bervariasi. Penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa faktor yang memengaruhi ketepatan model kinematika, seperti gangguan pada roda dan ketidakakuratan dalam kontrol. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa model kinematika yang dikembangkan dapat digunakan secara efektif untuk merancang sistem kontrol robot Mecanum dalam aplikasi nyata.

ABSTRACT

This study focuses on testing and comparing the kinematics model of the Mecanum robot through a MATLAB simulation approach and analyzing the movement of the robot experimentally. The Mecanum robot is known for its ability to move omnidirectionally, which allows flexible navigation in multiple directions without the need to rotate. To achieve the goal, the kinematics model of the Mecanum robot is first tested through MATLAB simulation, which provides a theoretical description of the robot's movement at various speeds and angles. Next, experimental testing was conducted to verify the simulation results with the real robot's movements. The tests were conducted using a Mecanum robot equipped with encoders to monitor the movement of the robot in various path configurations. The results showed that there was significant agreement between the movement predictions from the kinematics simulation and the actual robot movement results, with acceptable errors under varying test conditions. The study also identified several factors that affect the accuracy of the kinematics model, such as wheel interference and inaccuracies in control. Overall, this study proves that the developed kinematics model can be effectively used to design the control system of the Mecanum robot in real applications.

Keywords:

Mecanum Robot

MATLAB Simulation

Robot Movement Analysis

Penulis Korespondensi:

Akhdanul Huda,

Jurusan Teknik Mekatronika,

Politeknik Elektronika Negeri Surabaya,

Jl. Raya ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

Email: akhdanulhuda209@me.student.pens.ac.id

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi robotika telah memberikan kontribusi besar dalam otomatisasi industri, khususnya dalam bidang sistem transportasi dan pengiriman. Salah satu inovasi yang mendukung mobilitas robot dalam ruang terbatas adalah penggunaan roda Mecanum. Roda ini memungkinkan pergerakan *omnidirectional* tanpa mengubah orientasi tubuh robot [1], sehingga sangat sesuai untuk lingkungan kerja yang dinamis dan sempit.

Keunggulan manuver ini memerlukan dukungan model kinematika yang akurat agar kontrol pergerakan robot dapat berjalan presisi dan stabil. Berbagai penelitian telah mengembangkan model kinematika maju maupun invers untuk robot Mecanum [2], namun tantangan tetap muncul dalam implementasi fisik, terutama karena pengaruh faktor eksternal seperti gesekan, slip, serta variasi beban [3]. Simulasi menggunakan MATLAB menjadi pendekatan penting untuk menguji model secara sistematis sebelum diterapkan secara nyata [4].

Walaupun berbagai pendekatan kinematika telah dikembangkan dan disimulasikan, pemahaman mengenai bagaimana model tersebut bekerja saat diterapkan langsung pada sistem robotik di dunia nyata masih belum sepenuhnya dijelaskan. Terutama, belum banyak studi yang secara sistematis membandingkan hasil simulasi kinematika dengan data pergerakan aktual dari robot fisik menggunakan roda Mecanum. Padahal, kesesuaian antara model simulasi dan perilaku nyata sangat penting untuk memastikan efektivitas sistem kendali dalam aplikasi sesungguhnya [5].

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menguji kesesuaian antara model kinematika robot Mecanum dan perilaku aktualnya. Fokus utama ditujukan pada pengujian keakuratan model melalui data pergerakan robot secara langsung, kemudian membandingkannya dengan hasil simulasi menggunakan MATLAB. Hasil evaluasi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem kendali yang lebih presisi dan adaptif dalam aplikasi robotika berbasis roda Mecanum.

2. METODE PENELITIAN

Metode pada penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi untuk memodelkan kinematika robot Mecanum dalam MATLAB, serta pendekatan eksperimental untuk menguji validitas hasil simulasi dengan data pengujian langsung. Simulasi dilakukan untuk memprediksi perilaku pergerakan robot dalam berbagai konfigurasi lintasan, sementara pengujian eksperimental bertujuan untuk memvalidasi hasil simulasi dengan data aktual.

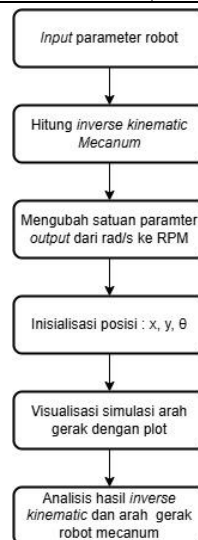
2.1 Simulasi MATLAB

Simulasi MATLAB dalam robotika digunakan untuk memodelkan kinematika, dinamika, dan kontrol robot sebelum implementasi fisik dilakukan. Dalam hal ini, salah satu keuntungan utamanya adalah kemampuan MATLAB dalam menangani perhitungan matematis yang kompleks, yang memungkinkan analisis pergerakan robot secara efisien [6]. Selain itu, MATLAB juga digunakan dalam pengujian algoritma perencanaan jalur dan kontrol untuk robot. Dengan memanfaatkan simulasi, peneliti dapat memastikan robot bergerak sesuai dengan tujuan yang diinginkan kontrol seperti PID atau kontrol adaptif [7].

Pada penelitian ini, Simulasi dilakukan untuk memvisualisasikan pergerakan robot Mecanum berdasarkan input kecepatan translasi dan rotasi, serta untuk menghitung kecepatan masing-masing roda menggunakan model *inverse kinematic*. Proses simulasi ini diawali dengan pemberian parameter geometri robot, seperti jari-jari roda, jarak antar roda depan-belakang, dan jarak antar roda kiri-kanan. Selanjutnya, kecepatan translasi dan rotasi diberikan sebagai input.

Model *inverse kinematic* digunakan untuk menghitung kecepatan sudut tiap roda dalam satuan radian per detik, kemudian dikonversi ke dalam satuan RPM. Setelah itu, posisi dan orientasi robot diperbarui secara iteratif berdasarkan input kecepatan dan waktu simulasi. Selama simulasi berlangsung, lintasan pergerakan dan arah orientasi robot divisualisasikan secara grafis menggunakan plot dua dimensi.

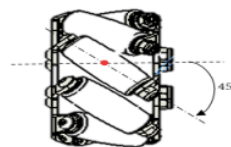
Untuk memperjelas tahapan dalam proses simulasi, Gambar 1. berikut menyajikan diagram alir simulasi pergerakan robot.



Gambar 1. Diagram Alir Slimulasi MATLAB

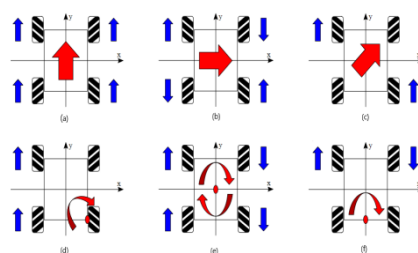
2.2 Pemodelan Kinematika Robot Mecanum

Roda Mecanum ditemukan pertama kali oleh Bengt Ilon dari Swedia. Roda Mecanum adalah jenis roda yang dapat bergerak ke segala arah tanpa perlu berbelok, sehingga memungkinkan robot untuk bermanuver dengan fleksibilitas tinggi. Desain roda Mecanum memiliki *roller* yang mengelilingi roda dengan membentuk sudut 45° [8]. Desain roda Mecanum lebih jelas ditunjukkan pada Gambar 2.



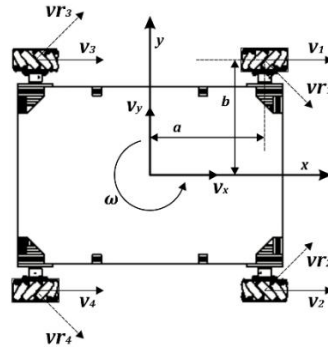
Gambar 2. Roda Mecanum

Penerapan gaya sudut 45° pada roda robot mengakibatkan perubahan pada besaran vektor resultan gaya untuk mencapai gerakan yang dicapai oleh robot. Hal ini menyebabkan setiap roda menghasilkan gaya dorong yang hampir sejajar dengan diagonal rangka. Pada roda Mecanum ini, variasi kecepatan dan arah putaran setiap roda akan mengakitatnya resultan vektor gaya dari setiap roda sehingga menghasilkan gerakan linier dan rotasi *vehicle* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Dengan konfigurasi yang dimiliki roda Mecanum ini, memungkinkan robot dapat bergerak dengan lebih fleksibel di lingkungan yang memerlukan kelincahan untuk bergerak di area yang sempit [9].



Gambar 3. Gerak Linear dan Rotasi pada Robot Roda Mecanum[9]

Pada robot Mecanum, perlu adanya sebuah persamaan *inverse kinematic* untuk menghasilkan gerakan linear dan rotasi pada *vehicle*, dimana persamaan ini mendefinisikan pergerakan robot kedalam kecepatan translasi pada sumbu x dan sumbu y serta kecepatan rotasi robot terhadap sumbu z dengan mengendalikan secara independen melalui kombinasi kecepatan sudut pada keempat roda [10]. Untuk menghasilkan resultan kecepatan translasi dan rotasi pada *vehicle*, maka diperlukan beberapa parameter yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Konfigurasi dan Vektor Pergerakan Roda Mecanum

Pada Gambar 4, dapat diketahui bahwa kecepatan translasi pada sumbu x dan sumbu y dinyatakan kedalam variabel v_x dan v_y serta kecepatan rotasi *vehicle* dinyatakan kedalam variabel ω . Persamaan kinematik pada robot Mecanum ini mendefinisikan parameter yang diubah menjadi kecepatan sudut pada masing-masing roda, dimana hal ini berkaitan dengan kecepatan translasi pada masing-masing roda yang didefinisikan pada persamaan berikut.

$$v_i = \omega_i \cdot r \quad (1)$$

Sehingga,

$$\omega_i = \frac{1}{r} \cdot v_i \quad (2)$$

Dimana,

- v_i = Kecepatan translasi roda ke-i
- ω_i = Kecepatan sudut roda ke-i
- i = Roda ke-i dimana $i = 1, 2, 3, 4$
- r = radius roda Mecanum

Melalui parameter-parameter tersebut maka dapat diketahui kecepatan sudut pada masing-masing roda melalui persamaan kinematik berikut.

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(a+b) \\ 1 & 1 & (a+b) \\ 1 & 1 & -(a+b) \\ 1 & -1 & (a+b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dimana,

- v_x = Kecepatan translasi sumbu x
- v_y = Kecepatan translasi sumbu y
- ω = Kecepatan rotasi sudut
- a = Jarak roda kiri ke titik pusat robot
- b = Jarak roda depan ke titik pusat robot

Pada penyelesaian persamaan *inverse kinematic* diatas, hasil dari kecepatan rotasi sudut roda ke-1 sampai ke-4 memiliki satuan rad/s. Jika hasil satuan yang diinginkan dalam satuan rpm, maka perlu adanya konversi dengan menggunakan rumusan sebagai berikut:

$$1 \text{ rad/s} = \frac{60}{\pi} \text{ rpm} \quad (4)$$

$$1 \text{ rad/s} = 9.54929659 \text{ rpm} \quad (5)$$

$$1 \text{ rad/s} = 9.55 \text{ rpm} \quad (6)$$

2.3 Perancangan Gerak Robot Mecanum

Pada perancangan gerak robot Mecanum, perlu ditentukan mengenai distribusi kecepatan sudut pada setiap roda untuk mengontrol pergerakan robot dalam berbagai arah. Untuk mengetahui distribusi kecepatan

tersebut, maka digunakan pemodelan *inverse kinematic* Mecanum dengan parameter-parameter robot yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Robot Mecanum

Jari-jari roda (r)	0.05 m
Jarak antara roda depan dan belakang (a)	0.521 m
Jarak antara roda kiri dan kanan (b)	0.474 m
Kecepatan translasi (v_x dan v_y)	0.3 m/s
Kecepatan rotasi (ω)	0.3 rad/s

Parameter yang digunakan dalam perancangan ini, sebagaimana tercantum pada Tabel 1, ditentukan berdasarkan dimensi dan spesifikasi fisik dari robot Mecanum yang telah dibangun. Nilai-nilai seperti jari-jari roda serta jarak antar roda diperoleh melalui pengukuran langsung terhadap struktur mekanik robot untuk memastikan kesesuaian antara simulasi dan kondisi aktual.

Pemilihan kecepatan translasi sebesar 0,3 m/s didasarkan pada hasil pengujian awal yang menunjukkan bahwa nilai tersebut memberikan pergerakan yang cukup stabil dan aman bagi robot dalam lingkungan operasionalnya. Nilai kecepatan ini juga dianggap mewakili skenario pergerakan normal tanpa membebani komponen mekanik secara berlebihan. Selain itu, kecepatan translasi sebesar 0,424 m/s pada lintasan diagonal diperoleh melalui hasil perhitungan berdasarkan teorema *pythagoras*, dengan menggabungkan komponen kecepatan pada sumbu x (v_x) dan sumbu y (v_y).

Dari parameter-parameter robot Mecanum yang sudah dijelaskan diatas, selanjutnya dilakukan perhitungan dengan persamaan *inverse kinematic* yang menghasilkan nilai akhir berupa kecepatan sudut pada masing- masing roda yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut Tiap Roda

Arah Gerak	Kecepatan Translasi (m/s)	Kecepatan Sudut (RPM) dan Arah Putar Roda			
		ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
Maju	0.3	57.3 (Putar Maju)	57.3 (Putar Maju)	57.3 (Putar Maju)	57.3 (Putar Maju)
Geser Kiri	0.3	57.3 (Putar Mundur)	57.3 (Putar Maju)	57.3 (Putar Maju)	57.3 (Putar Mundur)
Diagonal Depan Kiri	0.424	0	114.6 (Putar Maju)	114.6 (Putar Maju)	0

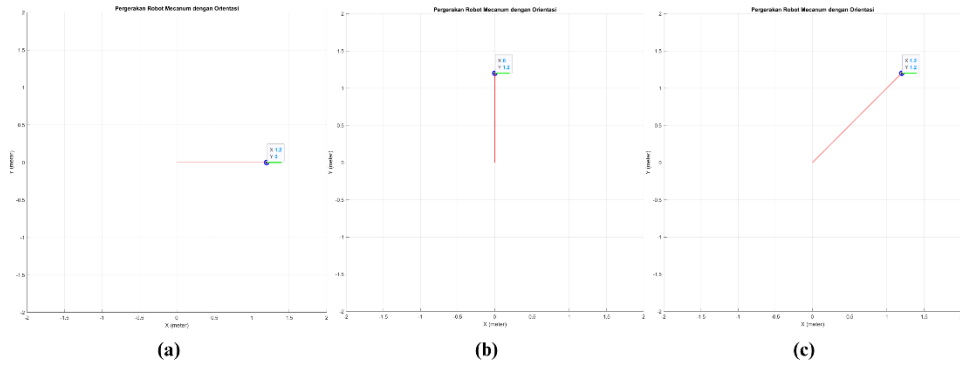
Dari hasil perhitungan tersebut, kecepatan sudut dan arah putar roda digunakan sebagai *setpoint* atau acuan pada masing-masing roda pada robot Mecanum untuk melakukan pergerakan sesuai dengan arah gerak yang sudah ditentukan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini mencakup perbandingan antara pergerakan robot yang diperoleh dari simulasi MATLAB dengan data pengujian langsung robot Mecanum dalam kondisi nyata. Dengan membandingkan kedua hasil tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi validitas model kinematika yang digunakan serta memastikan kesesuaian antara prediksi simulasi dan pergerakan aktual robot.

3.1 Pemodelan dan Hasil Simulasi MATLAB

Simulasi MATLAB dilakukan dengan memasukkan parameter-parameter yang relevan, seperti kecepatan translasi dan rotasi, serta dimensi fisik robot, termasuk jari-jari roda, jarak antar roda, dan konfigurasi sistem Mecanum. Pada simulasi ini, program memvisualisasikan pergerakan robot dengan memperbaharui posisi robot dan orientasinya setiap interval waktu tertentu. Selama simulasi, jejak pergerakan robot ditampilkan dalam bentuk garis merah, sementara arah orientasi robot ditunjukkan dengan garis hijau. Visualisasi ini membantu dalam memahami dinamika pergerakan robot Mecanum secara lebih mendalam, serta memungkinkan untuk memvalidasi model kinematika yang telah dibuat dengan hasil simulasi yang dihasilkan. Hasil simulasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 5. Hasil Simulasi MATLAB Gerak (a)Maju (b)Geser (c) Diagonal

Hasil simulasi diatas menunjukkan gerak robot dengan koordinta x dan y pada gerak maju sejauh (1.2 m, 0 m), geser samping sejauh (0 m, 1.2 m), dan diagonal sejauh (1.2 m, 1.2 m). Dalam mencapai koordinat tersebut, waktu yang dibutuhkan dalam simulasi adalah selama 4 detik. Hal ini sesuai dengan penyelesaian matematis dibawah.

$$v = \frac{s}{t} \tag{7}$$

$$t = \frac{s}{v} \tag{8}$$

Dimana,

v = Kecepatan translasi robot = 30 cm/s = 0.3 m/s

s = Panjang Lintasan = 1.2 m

t = Waktu tempuh (s)

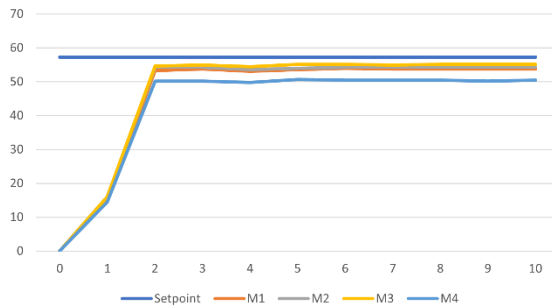
Sehingga,

$$t = \frac{1.2}{0.3} \tag{9}$$

$$t = 4 \text{ s} \tag{10}$$

3.2 Pengujian Pada Robot Mecanum

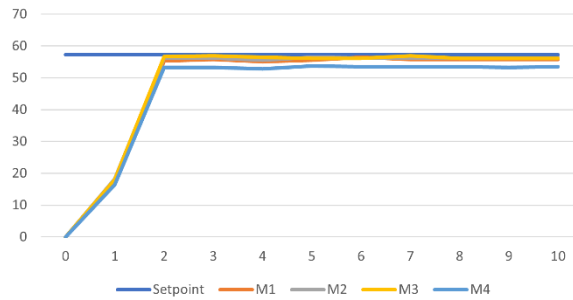
Pengujian langsung robot Mecanum dilakukan untuk memverifikasi hasil simulasi dan mengevaluasi performa robot dalam kondisi nyata. Pada pengujian ini, data kecepatan setiap roda diukur menggunakan sensor encoder yang terpasang pada roda. Pengukuran dilakukan ketika robot bergerak mengikuti jalur yang telah disimulasikan sebelumnya di MATLAB yaitu gerak maju, geser samping, dan diagonal yang menghasilkan data kecepatan pada masing-masing roda dengan penomoran M1–M4 yang ditunjukkan pada grafik dibawah ini.



Gambar 6. Grafik Kecepatan Gerak Maju

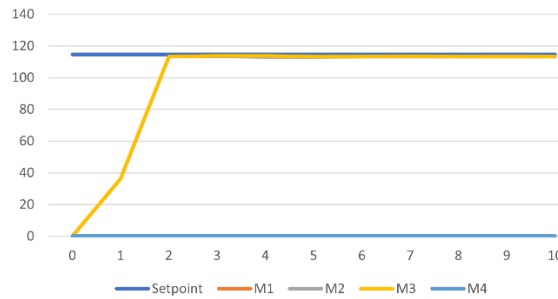
Grafik kecepatan putaran roda pada gerak maju menunjukkan adanya penyimpangan pada roda M4. Hal ini tercermin pada hasil pengujian, di mana pola gerak maju lurus sedikit menyimpang dari lintasan ideal.

Penyimpangan ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain slip antara roda dan permukaan lantai, serta variasi karakteristik dinamis pada setiap motor.



Gambar 7. Grafik Kecepatan Gerak Geser Sampung

Selain itu, pada grafik kecepatan putaran roda saat gerak menyamping menunjukkan adanya sedikit penyimpangan pada roda M4. Akibatnya, pergerakan robot mengalami sedikit deviasi dari lintasan lurus. Meskipun demikian, gerakan tersebut masih merepresentasikan gerak geser ke samping secara keseluruhan.



Gambar 8. Grafik Kecepatan Gerak Diagonal

Pada grafik kecepatan diatas, menyatakan bahwa roda M1 dan M4 tidak berputar (kecepatannya nol). Kondisi ini sesuai dengan rancangan dan prinsip kinematika roda Mecanum. Ketika roda M2 dan M3 berputar maju, seperti yang ditunjukkan oleh adanya kecepatan pada grafik, robot akan bergerak secara diagonal menuju arah depan kiri.

3.3 Analisis perbandingan pengujian dengan simulasi

Analisis perbandingan bertujuan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara hasil simulasi model kinematika robot Mecanum dengan hasil pengujian langsung di lapangan. Evaluasi ini dilakukan dengan membandingkan parameter posisi (sumbu x dan y) serta orientasi sudut (θ) dari pergerakan robot pada berbagai skenario arah gerak, seperti gerakan maju, geser ke kiri, dan diagonal ke arah depan kiri.

Selisih antara hasil simulasi dan pengujian aktual dianalisis dalam bentuk nilai error untuk mengukur akurasi model. Hasil dari perbandingan ditampilkan pada Tabel 3. dimana nilai pengujian langsung diambil dari rata-rata terhadap sejumlah sampel yang diambil saat pengujian

Tabel 3. Data Perbandingan Simulasi dengan Pengujian

Arah Gerak	Pos x Simulasi	Pos x Pengujian	Error Pos x	Pos y Simulasi	Pos y Pengujian	Error Pos y	θ Simulasi	θ Pengujian	θ Error
Maju	1.2	1.22	0.02	0	0.01	0.01	0	0.51	0.51
Kiri	0	0.02	0.02	1.2	1.21	0.01	0	5.1	5.1
Diagonal	1.2	1.21	0.01	1.2	1.21	0.01	0	1.31	1.31

Dari data yang ditampilkan pada Tabel 3, terdapat error posisi yang relatif kecil, yaitu kurang dari 0,03 m pada sumbu x dan sumbu y. Namun, terjadi deviasi yang cukup besar pada sudut orientasi robot, dengan nilai error mencapai 5,1°. Besarnya error ini diduga disebabkan oleh perbedaan kecepatan rotasi pada masing-masing motor, yang memberikan dampak akumulatif terhadap orientasi robot selama pergerakan. Selain itu, terjadinya slip antara roda dengan permukaan lantai, turut menyebabkan penyimpangan arah dan posisi robot dibandingkan hasil simulasi, yang umumnya mengasumsikan kondisi gerak ideal tanpa adanya gaya gesek.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil memvalidasi model kinematika robot Mecanum melalui pendekatan simulasi menggunakan MATLAB dan pengujian langsung pada robot. Hasil simulasi lintasan menunjukkan kesesuaian yang baik dengan data pengujian aktual, meskipun terdapat beberapa selisih pada posisi dan orientasi akhir robot akibat faktor-faktor seperti slip roda, gesekan permukaan lantai, variasi respon motor, dan ketidaktepatan pembacaan encoder. Hal ini menunjukkan bahwa model kinematika yang digunakan mampu merepresentasikan karakteristik dasar pergerakan robot Mecanum secara akurat.

Perbedaan antara simulasi dan pengujian secara umum disebabkan oleh dinamika sistem nyata, termasuk ketidaksempurnaan perangkat keras serta kondisi lingkungan yang tidak sepenuhnya ideal. Untuk meningkatkan akurasi sistem secara keseluruhan, diperlukan penyempurnaan melalui penerapan sistem kontrol adaptif, seperti penggunaan pengendali PID pada masing-masing motor. Penggunaan kontrol PID akan membantu menstabilkan kecepatan dan memperkecil error dalam pergerakan, terutama dalam menghadapi variasi beban dan kondisi permukaan. Dengan demikian, model kinematika yang telah divalidasi ini dapat dijadikan landasan kuat untuk pengembangan sistem navigasi dan kontrol robot Mecanum yang lebih presisi di masa mendatang.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. M. Alwan, V. A. Nikolaevic, S. F. Hasan, dan K. O. Vladmerovna, "Kinematic and Dynamic Modeling Based on Trajectory Tracking Control of Mobile Robot with Mecanum Wheels," *International Journal of Technology*, vol. 15, no. 5, hlm. 1473–1486, 2024, doi: 10.14716/ijtech.v15i5.6908.
- [2] D. S. Alhanov dan V. I. Rubtsov, "Development of the Laboratory Work: 'Modeling of a Mobile Robot on Mecanum Wheels Kinematics,'" *ITM Web of Conferences*, vol. 35, hlm. 04001, 2020, doi: 10.1051/itmconf/20203504001.
- [3] J. C. O. Hernández dan D. I. R. Almeida, "Kinematic control in a four-wheeled Mecanum mobile robot for trajectory tracking," *The Journal of Engineering*, vol. 2024, no. 9, Sep 2024, doi: 10.1049/tje2.70006.
- [4] N. Guedelha, V. Pasandi, G. L'Erario, S. Traversaro, dan D. Pucci, "A Flexible MATLAB/Simulink Simulator for Robotic Floating-base Systems in Contact with the Ground," Nov 2022, [Daring]. Tersedia pada: <http://arxiv.org/abs/2211.09716>
- [5] Y. Li dkk., "Kinematic modeling of a combined system of multiple mecanum-wheeled robots with velocity compensation," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 1, Jan 2020, doi: 10.3390/s20010075.
- [6] H. M. Alwan, A. N. Volkov, dan A. Shbani, "Solution of Inverse and Forward Kinematics Problems for Mobile Robot with Six Mecanum Wheels," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1094, no. 1, hlm. 012071, Feb 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1094/1/012071.
- [7] L. Panta, "Comparative Analysis of NMPC and Fuzzy PID Controllers for Trajectory Tracking in Omni-Drive Robots: Design, Simulation, and Performance Evaluation," Mar 2024, doi: 10.1007/s40815-024-01866-1.
- [8] Fahmizal, A. Priyatmoko, dan A. Mayub, "74760-263640-1-PB," *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan (JuLIET)*, vol. 3, no. 1, hlm. 25–30, 2022.
- [9] P. S. Yadav, V. Agrawal, J. C. Mohanta, dan M. D. F. Ahmed, "A Theoretical Review of Mobile Robot Locomotion based on Mecanum Wheels," 1 Juni 2022, *Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences and Green Asia Strategy*. doi: 10.5109/4794163.
- [10] M. Szeremeta dan M. Szuster, "Neural Tracking Control of a Four-Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 11, Jun 2022, doi: 10.3390/app12115322.