



PLATFORM *SWERVE DRIVE* MODULAR UNTUK ROBOT *MOBILE* OTONOM MENGGUNAKAN ESP32

Bagus Aditama Alam^{1a}, Muchamad Malik¹, Aan Burhanuddin¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang

Korespondensi:

^aProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang
bagusaditamaalam@gmail.com

ABSTRAK

Keterbatasan manuver pada sistem penggerak konvensional, seperti *differential drive* dan *ackermann steering*, terutama dalam mendukung kebutuhan Industri di Indonesia. Mendorong pengembangan teknologi *swerve drive* sebagai solusi navigasi presisi untuk robot otonom, terutama dalam mendukung kebutuhan otomasi dan efisiensi di sektor industri di Indonesia. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan platform *swerve drive modular* berbasis mikrokontroler ESP32 yang ekonomis, fleksibel, dan dapat diproduksi secara lokal. Proses pengembangan dilakukan melalui tahapan studi literatur, desain sistem mekanik dan elektronik, simulasi kinematika invers, integrasi perangkat keras, serta pengujian performa pada kecepatan roda 50–100 RPM. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu mencapai kecepatan maksimum 0,314 m/s dengan rata-rata error sudut $\pm 1,2^\circ$ hingga $\pm 2,7^\circ$, menandakan performa optimal pada kecepatan rendah hingga menengah. Sistem ini tidak hanya relevan untuk aplikasi robotika otonom berskala kecil, tetapi juga memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut melalui integrasi dengan ROS dan sistem kendali cerdas guna mendukung kemandirian teknologi robotika nasional.

Kata kunci: *swerve drive*, robot otonom, ESP32, kinematika robot, kontrol motor.

ABSTRACT

The maneuverability limitations of conventional drive systems, such as differential drive and Ackermann steering, especially in supporting industrial needs in Indonesia, have driven the development of swerve drive technology as a precise navigation solution for autonomous robots. This research aims to design and implement a modular swerve drive platform based on the ESP32 microcontroller, which is economical, flexible, and locally manufacturable. The development process includes literature review, mechanical and electronic system design, inverse kinematics simulation, hardware integration, and performance testing at wheel speeds ranging from 50 to 100 RPM. The test results show that the system is capable of achieving a maximum linear speed of 0.314 m/s, with an average angular error ranging from $\pm 1.2^\circ$ to $\pm 2.7^\circ$, indicating optimal performance at low to medium speeds. This system is not only suitable for small-scale autonomous robotic applications but also holds significant potential for further development through integration with ROS and intelligent control systems to support national independence in robotic technology.

Keywords: *swerve drive*, autonomous robot, ESP32, robot kinematics, motor control

1. PENDAHULUAN

Perkembangan pesat dalam bidang robotika mobile otonom telah membawa transformasi signifikan di berbagai sektor industri, mulai dari logistik, manufaktur, hingga aplikasi eksplorasi [1-5]. Dalam konteks ini, sistem penggerak (*drive*

system) memegang peranan krusial sebagai komponen utama yang menentukan kemampuan manuver, stabilitas, dan efisiensi energi robot [6-13]. Sistem penggerak konvensional seperti *differential drive* dan *ackermann steering* [14-17], meskipun telah terbukti andal dalam berbagai aplikasi, menunjukkan keterbatasan signifikan ketika dihadapkan pada lingkungan operasi yang sempit dan dinamis. Keterbatasan inilah yang mendorong pengembangan sistem *swerve drive* sebagai solusi alternatif dengan kemampuan *omnidirectional movement* yang unggul. Namun demikian, implementasi teknologi *swerve drive* secara luas masih terkendala oleh beberapa faktor kritis, termasuk kompleksitas desain mekanis, biaya produksi yang tinggi, dan kurangnya modularitas dalam sistem yang ada.

Meskipun menawarkan fleksibilitas manuver yang tinggi, sistem *swerve drive* baru diterapkan pada sekitar 18% pada industri, menurut *IEEE International Conference on Robotics and Automation* tahun 2023, akibat kendala biaya dan tantangan teknis dalam implementasinya [18]. Temuan ini kontras dengan proyeksi pertumbuhan pasar robot otonom global yang diprediksi oleh *Grand View Research* (2025) akan mencapai CAGR (*Compound Annual Growth Rate*) sebesar 12,8% dalam periode 2023-2030, dengan valuasi pasar diperkirakan menyentuh USD 54,1 miliar pada akhir dekade ini [19].

ESP32 muncul sebagai platform komputasi yang menjanjikan untuk mengatasi berbagai tantangan dalam implementasi sistem *swerve drive*. Mikrokontroler ini menawarkan kombinasi unik antara performa komputasi, efisiensi daya, dan kemampuan konektivitas yang komprehensif. Data teknis dari Espressif (2023) menunjukkan bahwa ESP32 hanya membutuhkan arus operasi sebesar 100-200 mA sementara tetap mampu menjalankan kontrol loop PID pada frekuensi 1 kHz [20].

Aspek modularitas dalam desain sistem menjadi faktor kritis lainnya yang ditangani dalam penelitian ini. 65% pengembang robot lebih memilih sistem yang modular untuk kemudahan pemeliharaan dan kemampuan adaptasi. Pendekatan modular memungkinkan replikasi dan skalabilitas sistem yang lebih baik, dengan setiap modul roda (*wheel module*) yang terintegrasi dengan *encoder* resolusi tinggi seperti AS5600 yang mampu memberikan presisi pengukuran sudut hingga 0,1°. Desain ini juga memfasilitasi integrasi dengan *Robot Operating System (ROS)* yang saat ini digunakan oleh 30% robot penelitian (*ROS Industrial*, 2023), membuka kemungkinan pengembangan lebih lanjut untuk navigasi otonom berbasis *SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)* [21].

Konteks aplikasi di Indonesia menambah dimensi urgensi dari penelitian ini. Data dari Hermana Et Al. (2024) menunjukkan bahwa implementasi industri 4.0 di tanah air membutuhkan lebih dari 5.000 unit robot mobile untuk sektor manufaktur saja dalam kurun waktu hingga 2025 [22]. Ironisnya, 85% komponen robotika di Indonesia masih bergantung pada impor menciptakan ketergantungan teknologi dan beban biaya yang signifikan. Pengembangan platform *swerve drive* berbasis ESP32 yang terjangkau dan dapat diproduksi lokal ini diharapkan dapat menjadi solusi strategis untuk mengurangi ketergantungan impor sekaligus mempercepat adopsi teknologi robotika canggih di berbagai sektor industri nasional.

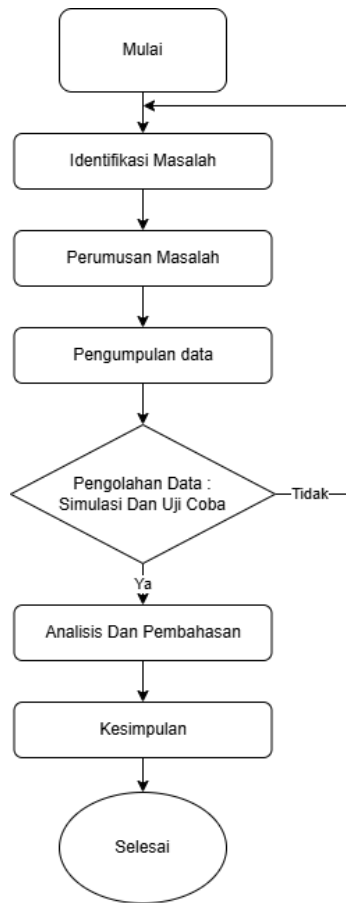
Penelitian ini memiliki nilai strategis yang tinggi dalam upaya pengembangan teknologi robotika nasional, khususnya melalui penerapan sistem *swerve drive* yang selama ini dianggap kompleks dan mahal. Platform modular berbasis ESP32 yang dikembangkan dalam penelitian ini memberikan solusi yang efisien, terjangkau, dan aplikatif bagi kebutuhan industri, seperti dalam sistem otomasi dan kendaraan otonom. Di sisi lain, platform ini juga relevan sebagai sarana pengembangan akademik, khususnya dalam riset terkait koordinasi multi robot (*swarm robotics*), navigasi berbasis pembelajaran mesin, serta pengembangan algoritma kontrol yang adaptif dan cerdas.

Keterbaruan dari penelitian ini terletak pada pendekatan holistik yang diterapkan, yaitu penggabungan antara optimasi desain mekanis, implementasi elektronik berbasis mikrokontroler ESP32 yang hemat daya, serta sistem integrasi yang bersifat modular dan fleksibel. Pendekatan ini tidak hanya menjawab tantangan teknis dan ekonomis dalam implementasi *swerve drive*, tetapi juga membuka peluang kolaborasi antara sektor industri dan akademik dalam menciptakan solusi robotika yang berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat menjadi katalis dalam mempercepat penguasaan dan kemandirian teknologi robotika strategis di Indonesia.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Flowchart Penelitian

Berikut merupakan penjelasan secara singkat mengenai penjelasan alur dari penelitian kali ini, seperti pada gambar 1 di bawah ini.



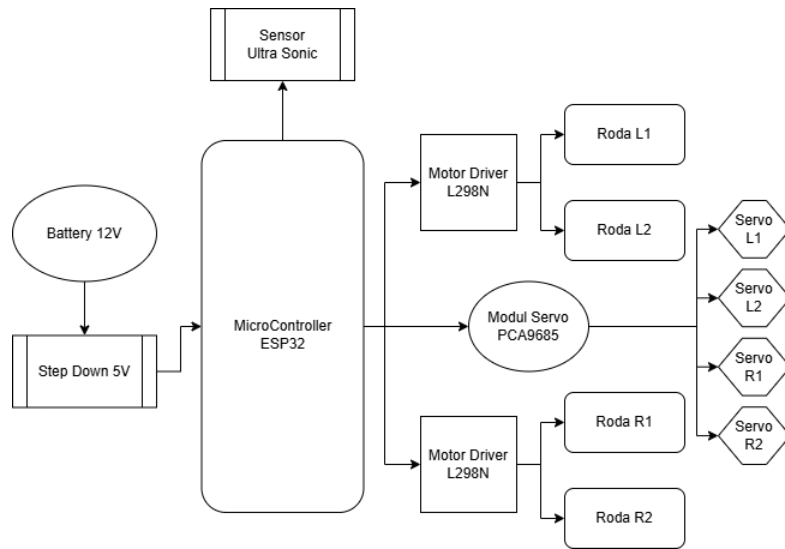
Gambar 1. Flowchart Penelitian

Tahapan penelitian ini digambarkan dalam bentuk *flowchart* untuk memperjelas alur proses yang dilakukan selama perancangan dan implementasi sistem *swerve drive* pada robot otonom berbasis ESP32. Penelitian diawali dengan proses identifikasi masalah, yaitu mengenali kendala yang dihadapi pada sistem navigasi robot konvensional, khususnya dalam hal kemampuan manuver yang terbatas. Permasalahan tersebut kemudian dirumuskan ke dalam fokus penelitian, yaitu merancang sistem penggerak *swerve drive* yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 untuk meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi navigasi robot.

Langkah selanjutnya adalah melakukan pengumpulan data yang mencakup studi literatur terkait sistem kinematika *swerve drive*, spesifikasi ESP32, aktuator yang digunakan, serta sensor ultrasonik sebagai komponen pendukung navigasi. Data yang diperoleh digunakan sebagai dasar dalam perancangan sistem, baik dari sisi perangkat keras maupun perangkat lunak [23]. Setelah rancangan sistem dibuat, dilakukan proses pengolahan data melalui simulasi dan uji coba langsung. Simulasi bertujuan untuk menguji konsep pergerakan *swerve drive* secara matematis, sedangkan uji coba dilakukan untuk mengamati kinerja sistem secara nyata. Setelah sistem berjalan sesuai ekspektasi, maka selanjutnya dilakukan analisis dan pembahasan terhadap hasil implementasi.

Analisis ini mencakup performa gerakan robot, keakuratan arah dan kecepatan, serta efektivitas pengolahan data sensor oleh mikrokontroler. Tahapan akhir adalah penarikan kesimpulan dari hasil penelitian, yang merangkum pencapaian dan menyarankan pengembangan robot otonom berbasis *swerve drive* lebih lanjut [24].

2.1.1 Skematik Swerve Drive



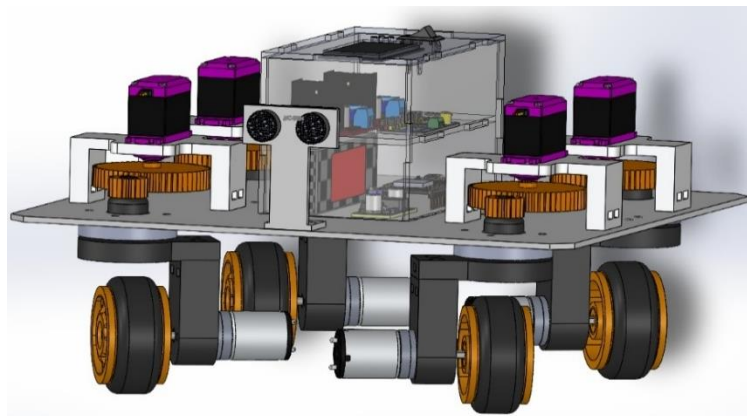
Gambar 2. Skematik Swerve Drive

Skematik sistem menunjukkan empat roda independen (L1, R1, L2, R2), masing-masing dilengkapi motor DC untuk gerak linear dan motor servo untuk arah rotasi. Motor DC dikendalikan oleh dua driver L298N [25], sedangkan servo dikendalikan modul PCA9685 dengan kendali utama dari ESP32. Sensor ultrasonik di bagian depan digunakan untuk deteksi hambatan [26]. Sumber daya sistem berasal dari baterai 12V, yang kemudian diturunkan menjadi 5V melalui modul *step-down* guna menyuplai daya ke mikrokontroler dan modul sensor.

Dengan konfigurasi ini, sistem *swerve drive* mampu menghasilkan gerakan yang memungkinkan robot bergerak ke segala arah tanpa mengubah orientasi tubuhnya. Pengaturan

kecepatan dan arah setiap roda dihitung menggunakan metode kinematika invers [27], sehingga sistem dapat menyesuaikan manuver sesuai perintah yang diberikan secara dinamis dan responsif.

2.1.2 Desain Mekanik



Gambar 3. Desain Mekanik Swerve Drive Solidworks

Gambar 3 menampilkan desain mekanik sistem *swerve drive* yang dirancang menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*. Desain ini terdiri dari empat modul roda independen, di mana setiap modul memiliki satu motor DC sebagai penggerak utama dan satu motor servo sebagai aktuator kemudi. Motor DC dipasang secara *horizontal* dan langsung terhubung ke poros roda, sementara motor servo mengatur arah roda melalui sistem *gear* terintegrasi.

Keempat roda disusun dalam konfigurasi *swerve* dan diletakkan di keempat sudut memungkinkan robot untuk bergerak secara omnidireksional [28]. Roda yang digunakan memiliki diameter 60 mm, dengan jarak antar sumbu roda

(*wheelbase*) sebesar 270 mm, struktur robot menggunakan material PLA (3D *print*) dan akrilik, yang ringan dan kuat, Seluruh komponen disusun secara modular, mengintegrasikan sistem mekanik dan elektronik secara efisien, serta menjadi dasar pembuatan prototipe fisik robot *swerve drive*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 4. Prototipe Robot Swerve Drive

Penelitian ini menghasilkan prototipe *robot mobile* dengan sistem penggerak *swerve drive* yang memiliki kemampuan manuver tinggi dalam berbagai arah. Robot dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali, serta dilengkapi dengan empat modul roda independen yang masing-masing digerakkan oleh motor DC dan dikendalikan arah beloknya oleh motor servo. Sistem ini memungkinkan robot untuk bergerak maju, mundur, berputar, dan menyamping tanpa harus memutar seluruh bodi [29]. Struktur mekanik robot dirakit menggunakan material PLA hasil cetak 3D dan akrilik sebagai bahan utama, dengan ukuran diameter roda 60 mm dan jarak sumbu roda 270 mm. Komponen elektronika utama seperti motor *driver* L298N, modul servo PCA9685, dan sensor ultrasonik diletakkan pada bagian atas sasis dan diatur secara modular untuk kemudahan integrasi.

3.1 Validasi Data

Validasi dilakukan dengan mengamati respon sistem terhadap perintah gerakan serta kemampuan sensor dalam mendeteksi objek di sekitarnya. Pengujian dilakukan pada skenario gerakan dasar seperti maju, mundur, belok kiri/kanan, berputar di tempat, dan menyamping. Sistem robot *swerve drive* dilakukan dengan pendekatan kinematika *invers*, yaitu menghitung kecepatan dan arah sudut masing-masing roda [30], berdasarkan kecepatan translasi dan rotasi yang diinginkan oleh robot secara keseluruhan. Kinematika *invers* memungkinkan perhitungan kebutuhan gerak tiap roda agar robot dapat melakukan manuver tertentu seperti bergerak lurus, menyamping, berputar, atau kombinasi dari ketiganya.

Untuk memvalidasi performa robot, dilakukan pengujian dengan parameter, diantaranya adalah kecepatan roda maksimum: 100 RPM, diameter roda: 60 mm (0.06 m) dan jarak antar sumbu roda (*wheelbase*): 270 mm (0.27 m). Kecepatan linier maksimum dari roda dihitung dengan rumus $v = w \cdot r$ dengan:

$$w = \frac{100 \text{ RPM} \times 2\pi}{60} = 10.47 \text{ rad/s} \quad (1)$$

$$r = \frac{60 \text{ mm}}{2} = 30 \text{ mm} = 0.03 \text{ m} \quad (2)$$

$$v = 10.47 \times 0.03 = 0.314 \text{ m/s} \quad (3)$$

Maka kecepatan maksimum linier robot saat roda berputar penuh adalah $\pm 0.314 \text{ m/s}$.

Kinematika *invers* pada sistem *swerve drive* digunakan untuk menentukan kecepatan dan arah setiap roda berdasarkan kecepatan translasi robot (v_x , v_y) dan rotasi sudut (ω). Setiap roda memiliki dua parameter yang perlu dihitung: kecepatan linier dan sudut arah gerak roda.

Rumus Kinematika Invers *Swerve Drive*

Misal:

- v_x = kecepatan translasi sumbu X (m/s)
- v_y = kecepatan translasi sumbu Y (m/s)
- ω = kecepatan rotasi sudut robot (rad/s)
- L = panjang *wheelbase* (jarak roda depan ke belakang)
- W = lebar *wheelbase* (jarak roda kiri ke kanan)

Parameter yang digunakan:

- $L = 0.27$ m
- $W = 0.27$ m
- $v_x = 0.2$ m/s
- $v_y = 0.1$ m/s
- $\omega = 0.5$ rad/s

Langkah-langkah:

1. Hitung R , jarak roda ke pusat robot:

$$R = \sqrt{+W^2} = \sqrt{0,27^2 + 0,27^2} = 0,381 \text{ m} \quad (4)$$

2. Hitung vektor kecepatan untuk setiap roda ($L1$, $L2$, $R1$, $R2$):

$$V_{L1} = \sqrt{(v_x - \omega \cdot \frac{L}{R})^2 + (v_y + \omega \cdot \frac{W}{R})^2} \quad (5)$$

$$V_{L2} = \sqrt{(v_x - \omega \cdot \frac{L}{R})^2 + (v_y + \omega \cdot \frac{W}{R})^2} \quad (6)$$

$$V_{R1} = \sqrt{(v_x - \omega \cdot \frac{L}{R})^2 + (v_y + \omega \cdot \frac{W}{R})^2} \quad (7)$$

$$V_{R2} = \sqrt{(v_x - \omega \cdot \frac{L}{R})^2 + (v_y + \omega \cdot \frac{W}{R})^2} \quad (8)$$

3. Hitung arah roda (sudut servo):

$$\theta = \arctan \left(\frac{v_y \pm \omega \cdot \frac{W}{R}}{v_x \pm \omega \cdot \frac{L}{R}} \right) \quad (9)$$

Tabel 1. Hasil Pengukuran Kinerja Kendali Arah Roda.

<i>RPM</i> <i>Roda</i>	<i>Roda</i>	<i>Kecepatan (m/s)</i>	<i>Sudut Target</i> (°)	<i>Sudut Aktual</i> (°)	<i>Error Sudut</i> (°)
50	L1	0.157	76.2	74.8	-1.4
	R1	0.162	59.8	61	1.2
	L2	0.143	66.1	64.7	-1.4
	R2	0.15	44.5	45.9	1.4
60	L1	0.188	76.7	75.1	-1.6
	R1	0.194	58.9	60.5	1.6
	L2	0.171	65.4	63.6	-1.8

70	R2	0.18	43.9	45.4	1.5
	L1	0.22	77.1	75.3	-1.8
	R1	0.226	58.4	60	1.6
	L2	0.2	65	63.2	-1.8
80	R2	0.21	43.2	45	1.8
	L1	0.251	77.3	75	-2.3
	R1	0.258	58	60.2	2.2
	L2	0.229	64.6	62.4	-2.2
90	R2	0.239	42.7	45.2	2.5
	L1	0.283	77.4	74.7	-2.7
	R1	0.29	58.2	60.4	2.2
	L2	0.257	65.1	62.6	-2.5
100	R2	0.269	43.1	45.6	2.5
	L1	0.314	77.5	75	-2.5
	R1	0.322	58.3	60.1	1.8
	L2	0.284	65.3	63.5	-1.8
	R2	0.309	43.6	46	2.4

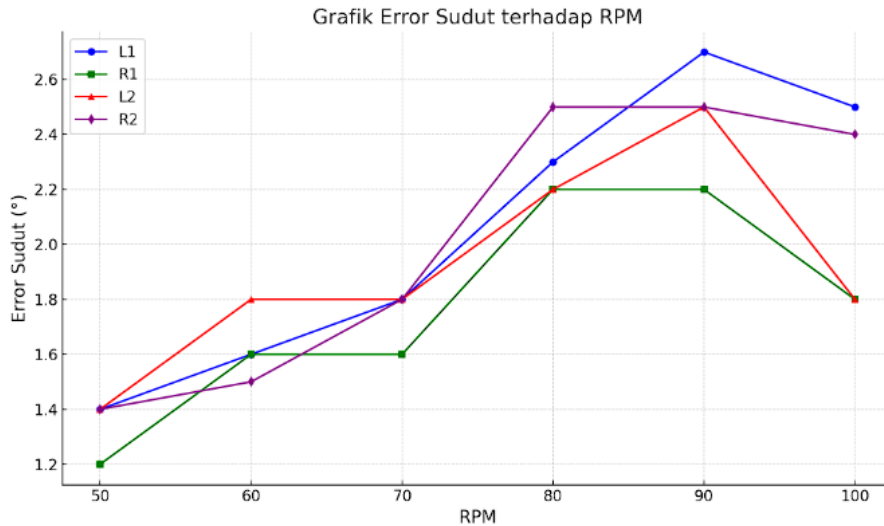
Analisis performa sistem *swerve drive* modular untuk robot *mobile* otonom menggunakan ESP32 dilakukan dengan memvalidasi kinerja aktuasi arah roda dan kecepatan linier terhadap berbagai nilai putaran roda, yakni 50, 60, 70, 80, 90, dan 100 RPM. Parameter yang diuji mencakup kecepatan linier roda, sudut target yang dihitung menggunakan model kinematika *invers*, sudut aktual yang diperoleh dari sistem kontrol servo berbasis umpan balik, serta deviasi atau *error* sudut sebagai indikator akurasi sistem kendali.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa terdapat kecenderungan *linear* antara nilai RPM dan kecepatan *linier* roda, sebagaimana dirumuskan melalui hubungan $v = \omega \cdot r$ dengan r sebagai jari-jari roda dan ω sebagai kecepatan sudut roda dalam rad/s. Pada 50 RPM, kecepatan *linier* terendah tercatat sebesar 0,143–0,162 m/s, sementara pada 100 RPM kecepatan mencapai 0,284–0,322 m/s. Kenaikan ini konsisten dengan ekspektasi teoritis serta membuktikan keakuratan implementasi konversi RPM menjadi kecepatan translasi aktual pada sistem robot.

Namun demikian, analisis terhadap kolom *error* sudut menunjukkan adanya peningkatan deviasi sudut aktual terhadap sudut target seiring dengan bertambahnya kecepatan putaran roda. Pada 50 RPM, rata-rata error sudut berkisar $\pm 1,4^\circ$, sedangkan pada 100 RPM error meningkat hingga $\pm 2,4^\circ$. Fenomena ini dapat diatribusikan pada keterbatasan dinamis aktuator servo dalam mengikuti perubahan orientasi yang cepat, serta kemungkinan adanya latensi dalam proses pembacaan posisi servo dan pemrosesan kontrol umpan balik oleh mikrokontroler ESP32. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun sistem kontrol dapat menjaga akurasi arah roda dalam batas toleransi, performanya cenderung menurun pada kecepatan tinggi akibat keterbatasan mekanikal dan elektronik yang terintegrasi.

Pola distribusi *error* juga memperlihatkan bahwa roda bagian kiri (L1 dan L2) cenderung mengalami deviasi negatif, sedangkan roda kanan (R1 dan R2) menunjukkan deviasi positif, meskipun tidak signifikan secara statistik. Asimetri ini bisa diakibatkan oleh perbedaan kecil dalam beban mekanis atau kalibrasi servo yang belum seragam antar roda. Faktor-faktor seperti torsi internal, hambatan mekanis, serta friksi pada sistem penggerak roda juga perlu diperhitungkan dalam interpretasi data.

Kinerja terbaik tercapai pada rentang 60–80 RPM, di mana kecepatan translasi cukup stabil dan *error* sudut masih dalam ambang $\pm 2^\circ$. Pada rentang ini, aktuator servo memiliki respons yang cukup cepat untuk mengkompensasi perubahan orientasi roda, sementara sistem ESP32 dapat melakukan pemrosesan data sensor dan kendali servo secara simultan tanpa mengalami *bottleneck*. Ini menegaskan bahwa untuk aplikasi robot *mobile* otonom dengan kebutuhan manuver presisi sedang, pengoperasian pada RPM menengah lebih disarankan daripada batas maksimum motor.



Gambar 5. Grafik Sudut terhadap Kecepatan

Grafik yang disajikan menunjukkan hubungan antara kecepatan putaran roda (RPM) dan besarnya *error* sudut pada masing-masing roda sistem *swerve drive* modular, yaitu roda kiri depan (L1), kanan depan (R1), kiri belakang (L2), dan kanan belakang (R2). Dari grafik tersebut, terlihat bahwa terdapat tren peningkatan nilai *error* sudut seiring dengan bertambahnya RPM, khususnya pada kisaran 70 hingga 90 RPM. *Error* sudut merupakan selisih antara sudut target yang dihitung dari model kinematika invers dan sudut aktual yang dicapai oleh aktuator servo, yang dalam hal ini menjadi indikator presisi sistem kendali arah roda.

Pada RPM rendah (50–60 RPM), nilai *error* masih relatif kecil, berkisar antara $\pm 1,2^\circ$ hingga $\pm 1,8^\circ$, menunjukkan bahwa sistem kontrol berbasis ESP32 dan aktuator servo mampu merespons perintah arah secara akurat pada kecepatan rendah. Ini mengindikasikan bahwa waktu respon aktuator masih berada dalam kisaran yang memadai untuk mengimbangi dinamika sistem gerak. Akan tetapi, seiring peningkatan RPM ke kisaran menengah (70–80 RPM), terjadi kenaikan signifikan pada *error* sudut terutama pada roda L1 dan R2, yang masing-masing menunjukkan deviasi hingga $2,3^\circ$ dan $2,5^\circ$. Peningkatan ini menandakan bahwa servo mulai mengalami keterlambatan dalam menyesuaikan arah saat roda berputar lebih cepat, yang dapat disebabkan oleh keterbatasan torsi servo, latensi komunikasi antar modul, atau resolusi sensor arah yang digunakan.

Puncak *error* terjadi pada RPM 90, di mana roda L1 mencatat nilai *error* sebesar $2,7^\circ$, nilai tertinggi pada pengujian ini. Hal ini menunjukkan batas dinamika efektif dari sistem servo yang digunakan. Meskipun *error* sedikit menurun kembali pada 100 RPM, hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh adaptasi parsial dari kontrol atau limitasi sistem yang menghambat peningkatan lebih lanjut. Penurunan ini tidak serta-merta menunjukkan peningkatan performa, melainkan mencerminkan kondisi batas atas yang telah dicapai oleh sistem kendali, di mana akurasi tidak membaik meskipun RPM meningkat.

Ketidaksimetrian nilai *error* antar roda juga patut dicermati. Roda kiri (L1 dan L2) cenderung menunjukkan *error* negatif (terlambat terhadap target), sedangkan roda kanan (R1 dan R2) menunjukkan *error* positif (melewati target), yang dapat menunjukkan adanya perbedaan mekanis atau distribusi beban yang tidak merata di antara sisi kiri dan kanan robot. Ketidakseimbangan ini mungkin disebabkan oleh ketidaksimetrian massa, panjang kabel servo yang berbeda, atau parameter tuning kontrol servo yang tidak identik. Selain itu, resolusi input sinyal PWM dan perbedaan kecil pada feedback sensor juga dapat memperbesar perbedaan ini pada kecepatan tinggi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem *swerve drive* modular berbasis ESP32 yang mampu menghasilkan gerakan omnidireksional dengan presisi tinggi. Sistem menunjukkan performa optimal pada kecepatan rendah hingga menengah, dengan rata-rata *error* sudut antara $\pm 1,2^\circ$ hingga $\pm 1,8^\circ$, serta kecepatan linier maksimum mencapai 0,314 m/s pada 100 RPM. Kinerja mulai menurun pada kecepatan tinggi karena keterbatasan respon servo dan mikrokontroler.

Secara strategis, platform ini menawarkan solusi teknologi robotika lokal yang hemat biaya, fleksibel, dan dapat diproduksi secara mandiri. Hal ini menjadi sangat relevan bagi kebutuhan industri manufaktur dan otomasi di Indonesia,

yang saat ini masih sangat bergantung pada komponen impor. Dengan desain modular dan berbasis mikrokontroler terbuka, sistem ini juga mendukung pengembangan teknologi lanjutan seperti navigasi cerdas, *swarm robotics*, serta integrasi dengan ROS.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menjawab tantangan teknis implementasi *swerve drive*, tetapi juga berperan sebagai langkah awal menuju kemandirian teknologi robotika nasional dan percepatan transformasi industri di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Cheng, L. et al., 2023. "A mobile sensing system for future gas mapping in confined space using an olfactory quadruped robot. *Measurement*, 213.112654.
- [2] Ullah, L. et al., 2024. "Mobile robot localization: Current challenges and future prospective". *Comput Sci Rev*, 53.100651.
- [3] Kabir, H. et al., 2023. "Internet of robotic things for mobile robots: Concepts, technologies, challenges, applications, and future directions." *Digital Communications and Networks*, 9.6, 1265–90.
- [4] Ishihara, Y. dan Takahashi, M. 2023. "Empirical study of future image prediction for image-based mobile robot navigation". *Rob Auton Syst*, 150.104018.
- [5] Chand, R. et al., 2025. "Systematic review of mobile robots applications in smart cities with future directions". *J Ind Inf Integr*, 45.100821.
- [6] Nwachiona, C dan Pérez-Cruz. 2021. "Analysis of a new chaotic system, electronic realization and use in navigation of differential drive mobile robot". *Chaos Solitons Fractals*, 144.110684.
- [7] Xing, J. Et al., 2024. "Analysis of bifurcation and chaotic behavior of the micro piezoelectric pipe-line robot drive system with stick - slip mechanism". *Commun Nonlinear Sci Numer Simul*, 2024. 134.107998.
- [8] Kabir, H. et al., 2023. "Internet of robotic things for mobile robots: Concepts, technologies, challenges, applications, and future directions". *Digital Communications and Networks*, 9.6, 1265–90.
- [9] Lee, H. et al., 2025. "Programmable hybrid-drive actuator for compact and bimodal continuum robot modules". *Int J Mech Sci*, 297.298, 110380.
- [10] Hansen, S. Et al., 2025. "Machining of large CFRP-components with industrial robots with hybrid drives". *Procedia CIRP*, 131, 62–7.
- [11] Treesatayapun, C. 2020. "Robotic architecture as unknown discrete-time system based on variable-frequency drive and adaptive controller". *Robot Comput Integr Manuf*, 64.101951.
- [12] Correa-Hernando, E. et al., 2011. "Development of model based sensors for the supervision of a solar dryer". *Comput Electron Agric*, 8.2, 167–75.
- [13] Cheng, L. et al., 2023. "A mobile sensing system for future gas mapping in confined space using an olfactory quadruped robot". *Measurement*, 213.112654.
- [14] Gao, Z. Et al., 2020. "Distributed active disturbance rejection control for Ackermann steering of a four-in-wheel motor drive vehicle with deception attacks on controller area networks. *InfSci (N Y)*, 540, 370–89.
- [15] Bascetta, L. et al., 2016. "Kinematic trajectory tracking controller for an all-terrain Ackermann steering vehicle". *IFAC-PapersOnLine*, 49.15, 13–8.
- [16] Lei, C. Et al., 2025. "Improved RRT* path planning method for Ackermann steering vehicles". *Expert Syst Appl*, 279.127349.
- [17] Zhang, H. et al., 2023. "Energy efficient path planning for autonomous ground vehicles with ackermann steering". *Rob Auton Syst*, 162.104366.
- [18] Hu, J. Et al., 2023. "Trajectory Planning Method for Autonomous Vehicle in Narrow Passages. In: 2023 6th International Conference on Mechatronics". *Robotics and Automation (ICMRA)*, 114–9.
- [19] Grand View Research. 2025. "Autonomous Mobile Robots Market Trends". market. 2025.
- [20] IEEE. 2022. "IEEE Embedded Systems Letters Publication Information". *IEEE Embed Syst Lett*, 14.1, C2–C2.
- [21] Mukhtar, A. Et al., (2023). "SENSOR DAN AKTUATOR: KONSEP DASAR DAN APLIKASI". *Widina Media Utama*.
- [22] Hermana, R., et al. (2023). "DASAR DAN APLIKASI ROBOTIKA INDUSTRIAL MANUFAKTUR 4.0". *Bandung: Penerbit Widina Media Utama*.

- [23] Rohmansyah, A. 2024. “Pemodelan kinematika four wheel swerve drive menggunakan pendekatan geometri dan trigonometri”. *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, 11.2, 456–63.
- [24] Shi, Y. et al., 2023. “Path Tracking Control of Self-Reconfigurable Robot hTetro with Four Differential Drive Units”. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5.3, 3998–4005.
- [25] Adinugraha et al., 2023. “Desain dan Kontrol Modular Independent Drive Independent Steering Mobile Robot Aktuator”. *Metrotech (Journal of Mechanical and Electrical Technology)*, 2.3, 144–50.
- [26] Name, P. et al., 2023. “Overall Similarity The combined total of all matches, including overlapping sources , for each database”. *Crossref Posted Content database*.
- [27] Julyus, M. et al., 2020. “Robot Beroda Otonom dengan Invers Kinematics Autonomous Wheeled Robot Control with Inverse Kinematics”. *Jurnal Ilmu Komputer Agri-Informatika*, 7.1, 62–73.
- [28] Studi, P. et al., 2024. “Pengembangan Sistem Kendali Mekanis Mobile Robot Menggunakan Roda Caster”. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 1–7.
- [29] Auzan, M. et al., 2021. “Path Tracking and Position Control of Nonholonomic Differential Drive Wheeled Mobile Robot”. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika*, 7.3, 368.
- [30] Stephen et al., 2021. “Perancangan Kontrol Pelacakan Lintasan untuk Robot Otonom Bergerak Beroda dengan Penggerak Diferensial”. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 10.3, 272–81.