

PERENCANAAN SISTEM MEKANIK DAN *KINEMATICS SWERVE WHEEL UNTUK AUTONOMOUS MOBILE ROBOT*

*Hermawan Putranto¹, M. Munadi², Mochammad Ariyanto²,

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, S.H., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: antok270103@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi robotika mendorong kebutuhan akan sistem mekanik roda yang fleksibel dan presisi untuk mendukung mobilitas robot otonom. Salah satu solusi yang ditawarkan adalah penggunaan mekanisme swerve wheel, yang memungkinkan roda bergerak secara independen dalam translasi dan rotasi, sehingga robot dapat bermanuver ke segala arah tanpa mengubah orientasi badan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun mekanisme swerve wheel tipe koaksial dengan konfigurasi tiga roda sebagai basis sistem mobilitas robot. Metode penelitian meliputi analisis kebutuhan torsi, perhitungan rasio gear, pemodelan kinematika, serta proses manufaktur yang mencakup pencetakan 3D untuk komponen penopang, pemesinan CNC untuk base plate, pengeboran batang hollow, hingga perakitan komponen mekanik seperti shaft, bearing, roda, dan motor BLDC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa prototipe swerve wheel yang dihasilkan memiliki konstruksi yang kokoh, ringan, serta mendukung pergerakan roda dengan presisi, sehingga memenuhi kriteria perancangan mekanisme untuk aplikasi robot otonom. Dengan demikian, rancangan ini dapat menjadi dasar pengembangan sistem mobilitas robot dengan tingkat manuverabilitas tinggi di masa depan.

Kata kunci : kinematika; manufaktur; perancangan mekanik; robot otonom; swerve wheel

Abstract

The development of robotics technology has driven the need for flexible and precise wheeled mechanical systems to support autonomous robot mobility. One proposed solution is the use of a swerve wheel mechanism, which allows the wheels to move independently in translation and rotation, allowing the robot to maneuver in any direction without changing body orientation. This research aims to design and build a coaxial swerve wheel mechanism with a three-wheel configuration as the basis for a robot mobility system. The research methods include torque requirement analysis, gear ratio calculations, kinematic modeling, and a manufacturing process that includes 3D printing of the support components, CNC machining of the base plate, drilling of hollow rods, and assembly of mechanical components such as shafts, bearings, wheels, and BLDC motors. The results show that the resulting swerve wheel prototype has a sturdy and lightweight construction and supports precise wheel movement, thus meeting the mechanism design criteria for autonomous robot applications. Therefore, this design can serve as the basis for the development of highly maneuverable robot mobility systems in the future.

Keywords: autonomous robot; kinematics; manufacturing; mechanical design; swerve wheel

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Dalam era perkembangan teknologi otonom dan robotika, *mobile* robot otonom menjadi semakin penting dalam berbagai aplikasi, seperti pengangkutan barang, eksplorasi lingkungan yang berbahaya, pemantauan, dan banyak lagi. Keberhasilan robot otonom sangat bergantung pada kemampuan navigasinya untuk bergerak dengan efisien dan akurat di berbagai jenis medan dan situasi yang kompleks. Salah satu aspek yang menjadi fokus dalam desain robot otonom adalah mekanisme roda yang digunakan. *Swerve wheel* adalah mekanisme roda yang memungkinkan setiap modul roda untuk berputar secara independen baik dalam arah translasi maupun rotasi. Hal ini memungkinkan robot untuk bergerak ke segala arah tanpa mengubah orientasi tubuhnya, termasuk gerakan diagonal dan rotasi di tempat. Keunggulan ini menjadikan *swerve drive* sangat cocok untuk aplikasi robot otonom yang memerlukan navigasi presisi dan kelincahan tinggi. Namun, kompleksitas kontrol *swerve drive* jauh lebih tinggi dibandingkan sistem roda biasa karena membutuhkan sinkronisasi gerak dan arah setiap roda secara *real-time* [1].

Untuk mengatasi tantangan tersebut, dibutuhkan sistem kendali yang mampu memproses data secara cepat dan akurat. Salah satu platform yang ideal adalah NI myRIO, sebuah perangkat berbasis *real-time processor* dan FPGA yang dirancang khusus untuk aplikasi kontrol dan robotika. NI myRIO mendukung bahasa pemrograman grafis LabVIEW, sehingga memudahkan proses pengembangan sistem kendali secara visual dan modular [2].

Dalam penelitian ini, NI myRIO digunakan sebagai pusat kendali utama yang mengatur algoritma kinematika dan navigasi robot, sementara kontrol kecepatan dan posisi motor BLDC pada masing-masing modul roda diatur oleh mikrokontroler STM32 yang menjalankan kontrol PID. Kombinasi antara NI myRIO, STM32, dan *swerve wheel* diharapkan mampu menghasilkan sistem robot otonom yang adaptif, presisi, dan efisien dalam berbagai situasi navigasi.

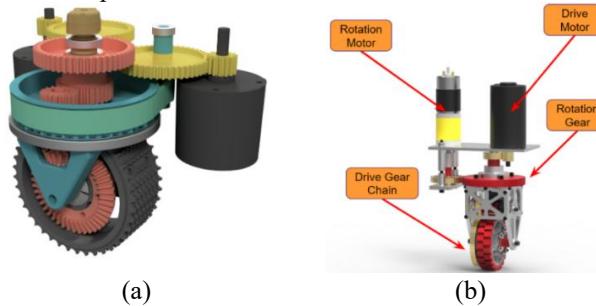
2. Dasar Teori

2.1 Coaxial Swerve Wheel

Coaxial swerve wheel merupakan mekanisme swerve drive di mana poros penggerak roda (drive shaft) dan poros pengatur arah roda (steering shaft) disusun sejajar pada satu sumbu (coaxial). Dengan desain ini, torsi dari motor penggerak dapat ditransmisikan langsung ke roda melalui poros yang searah dengan sumbu putar steering, sehingga memungkinkan roda berputar penuh hingga 360° tanpa terhalang mekanisme penggerak. Keunggulan utama dari konfigurasi ini adalah konstruksinya yang lebih ringkas, distribusi beban yang seimbang, serta minimnya offset antara sumbu steering dengan titik kontak roda terhadap lantai. Hal ini berkontribusi pada peningkatan stabilitas, presisi, dan kelincahan manuver robot [3].

Dalam penerapannya, coaxial swerve wheel memberikan kemampuan manuver tinggi pada robot otonom. Setiap roda dapat bergerak secara independen sehingga memungkinkan robot berpindah arah tanpa perlu mengubah orientasi keseluruhan. Dengan demikian, robot dapat bernavigasi secara fleksibel di berbagai arah, baik untuk pergerakan lurus, berbelok dengan radius kecil, maupun manuver presisi di ruang terbatas.

Sebuah modul swerve wheel tersusun atas beberapa komponen mekanis utama. Rotation motor berfungsi untuk mengatur arah roda dengan memutar atau memiringkannya secara independen dari gerak robot, sedangkan drive motor berperan dalam menghasilkan daya penggerak agar roda dapat bergerak maju, mundur, maupun berbelok. Kedua motor ini didukung oleh sistem transmisi berupa rotation gear yang mentransfer putaran motor rotasi ke mekanisme steering, serta drive gear chain yang menyalurkan torsi dari motor penggerak menuju roda [4]. Sinergi antara komponen-komponen tersebut memungkinkan terciptanya manuver robot yang lincah, stabil, dan presisi sesuai kebutuhan sistem otonom. Mekanisme *swerve wheel* dapat dilihat pada Gambar 1.



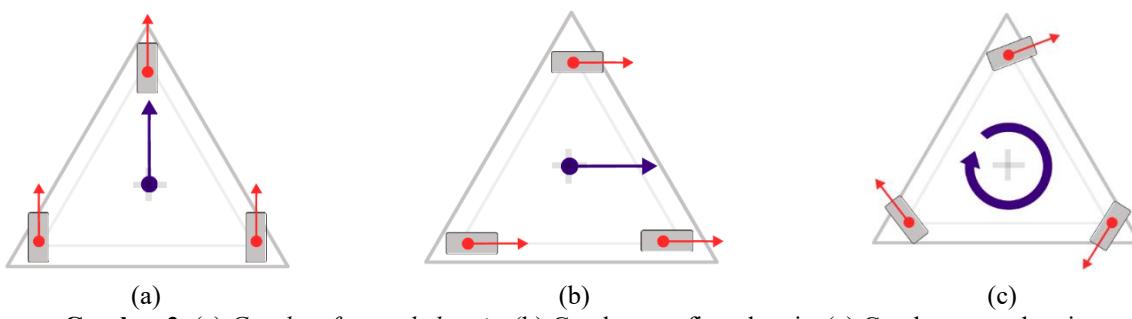
Gambar 1. (a) Desain konsep swerve wheel; (b) Komponen mekanis pada swerve wheel

2.2 Swerve Drive Motion

Swerve drive motion merupakan gerakan yang dihasilkan dari sistem swerve drive, yaitu mekanisme penggerak yang memungkinkan robot bergerak dengan fleksibilitas dan manuverabilitas tinggi ke berbagai arah. Setiap roda pada sistem ini dapat berputar secara independen, sehingga robot tidak hanya mampu bergerak lurus, tetapi juga diagonal maupun menyamping tanpa harus mengubah orientasi tubuh utamanya. Hal ini memberikan keuntungan signifikan dalam aplikasi robot otonom yang menuntut navigasi presisi di ruang terbatas [5].

Salah satu bentuk dasar dari swerve drive motion adalah forward-backward motion, yakni gerakan maju dan mundur sepanjang sumbu longitudinal robot. Gerakan ini terjadi ketika seluruh roda berputar searah untuk maju, atau berlawanan arah untuk mundur. Selain itu, sistem ini juga memungkinkan strafing motion, yaitu pergerakan lateral atau menyamping sepanjang sumbu lateral robot. Pada mode ini, semua roda diatur agar berputar ke arah kanan atau kiri dengan orientasi sudut yang sama, sehingga robot dapat bergerak secara lateral tanpa perlu berputar di sumbu vertikalnya.

Jenis gerakan lain yang tak kalah penting adalah yaw motion, yaitu rotasi robot di sekitar sumbu vertikal. Gerakan ini dicapai dengan mengatur sudut roda secara berlawanan arah antara sisi kiri dan kanan, sehingga tercipta torsi yang membuat robot berputar. Kombinasi dari ketiga jenis gerakan ini—maju-mundur, lateral, dan rotasi—menjadikan swerve drive sebagai salah satu sistem penggerak paling lincah dan presisi untuk robot modern. Gambar 2 menunjukkan jenis-jenis gerakan swerve drive motion [6].



Gambar 2. (a) Gerakan forward chassis; (b) Gerakan starling chassis; (c) Gerakan yaw chassis

2.3 Kebutuhan Torsi Motor Steering

Perhitungan kebutuhan torsi motor *steering* dapat dilakukan dengan mengasumsikan *main plate* merupakan cakram padat untuk memudahkan perhitungan [7] seperti pada Persamaan 1.

$$I = \frac{1}{2} mr^2 \quad (1)$$

Untuk menentukan percepatan sudut yang terjadi kecepatan sudut awal diasumsikan memiliki nilai nol karena *main plate* berputar dari kondisi diam. Sehingga percepatan sudut yang dihasilkan dapat dilihat pada Persamaan 2 dan 3.

$$\theta = \omega_o t + \frac{1}{2}\alpha t^2 \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{2\theta}{t^2} \quad (3)$$

Melalui percepatan sudut yang didapatkan dari persamaan kebutuhan torsi motor dapat dihitung dengan melakukan perkalian antara momen inersia *main plate* dengan percepatan sudut. Besar torsi motor juga dipengaruhi konfigurasi rasio *gear* yang digunakan sehingga kebutuhan torsi motor dapat dihitung menggunakan Persamaan 4 dan 5.

$$\tau_{plate} = I * \alpha \quad (4)$$

$$\tau_{steering} = \frac{\tau_{plate}}{GR} \quad (5)$$

2.4 Kebutuhan Torsi Motor Drive

Kebutuhan torsi motor *drive* dihitung dengan mempertimbangkan inersia dari roda *swerve wheel* dan juga gaya yang diperlukan untuk mengatasin inersia dari keseluruhan struktur *swerve wheel* [8]. Roda *swerve wheel* diasumsikan sebagai cakram padat untuk memudahkan perhitungan momen inersia seperti pada Persamaan 6.

$$I_{wheel} = \frac{1}{2} mr^2 \quad (6)$$

Untuk menghitung torsi yang dibutuhkan roda untuk berakselerasi dibutuhkan percepatan angular dari roda *swerve wheel* percepatan angular dapat dicari melalui selisih kecepatan angular roda dari kondisi diam sampai berputar sesuai kecepatan yang diinginkan seperti pada Persamaan 7 hingga 9.

$$\omega = \frac{2\pi * RPM}{60} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\Delta\omega_{target} - \Delta\omega_o}{dt} \quad (8)$$

$$\tau_{wheel} = I_{wheel} * \alpha \quad (9)$$

Untuk menghitung torsi yang dibutuhkan struktur *swerve wheel* untuk berakselerasi bersama roda *swerve wheel* dibutuhkan massa dan radius inersia struktur *swerve wheel* dari titik pusat rotasi. Untuk memudahkan perhitungan radius inersia struktur *swerve wheel* diasumsikan sama dengan radius dari roda *swerve wheel* seperti tertulis pada Persamaan 10 hingga 12.

$$a = \alpha * r \quad (10)$$

$$F_{structure} = m_{structure} * a \quad (11)$$

$$\tau_{structure} = F * r \quad (12)$$

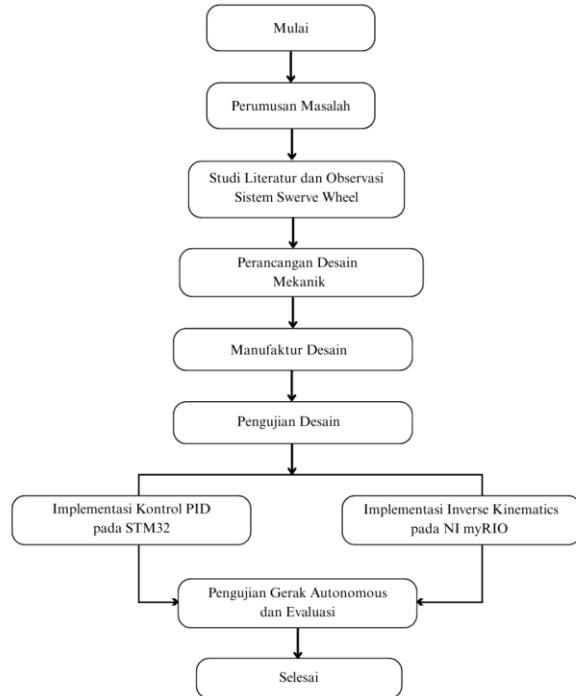
Sehingga didapatkan persamaan total untuk menghitung torsi motor *drive* melalui penjumlahan kedua buah komponen torsi dengan mempertimbangkan pengaruh rasio *gear* yang digunakan dalam sistem seperti pada Persamaan 13.

$$\tau_{drive} = \frac{\tau_{wheel} + \tau_{structure}}{GR} \quad (13)$$

3. Metodologi Penelitian

3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian yang dilakukan, terdapat langkah-langkah alur kerja penelitian yang dijelaskan pada diagram alir pada Gambar 3 yang menjelaskan bagaimana tahap-tahap penelitian ini dilakukan, mulai dari awal hingga sampai pada ke hasil. Diagram tersebut juga menggambarkan sebuah penyelesaian masalah, yang digunakan untuk menganalisis dan mendokumentasikan proses-proses dari sebuah penelitian [9].



Gambar 3. Diagram alir penelitian

3.2 Kebutuhan Torsi Motor *Steering*

Terdapat beberapa asumsi dan syarat yang digunakan dalam perhitungan kebutuhan torsi motor *steering* diantaranya sebagai berikut :

- Bagian *main plate* dianggap sebagai cakram padat.
- Massa dari *main plate* diasumsikan sebesar 1 kg.
- Nilai konstanta *gear reduction* diasumsikan 5.
- Diameter *main plate* sebesar 120 mm.
- Main plate* dapat berputar sebesar 180° dalam waktu kurang dari 0.5 detik.

Melalui asumsi – asumsi yang digunakan, maka didapatkan hasil perhitungan kebutuhan torsi motor *steering* sebesar 0.036 Nm yang dijelaskan melalui Persamaan 14 sampai 17.

$$I = \frac{1}{2}(1)(0.12)^2 = 0.0072 \text{ kgm}^2 \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{0.5^2} = 25.13 \text{ rad/s}^2 \quad (15)$$

$$\tau_{plate} = (0.0072)(25.13) = 0.18 \text{ Nm} \quad (16)$$

$$\tau_{steering} = \frac{0.18}{5} = 0.036 \text{ Nm} \quad (17)$$

3.3 Kebutuhan Torsi Motor *Drive*

Terdapat beberapa asumsi dan syarat yang digunakan dalam perhitungan kebutuhan torsi motor *drive* diantaranya sebagai berikut :

- Roda *swerve wheel* dianggap cakram padat dengan berat 0.2 kg dan memiliki diameter 100 mm.
- Swerve wheel* dapat berakselerasi dari kecepatan 0 sampai 500 RPM dalam waktu 1 detik.
- Berat struktur rangka *swerve wheel* adalah 1 kilogram.
- Nilai konstanta *drive gear reduction* sebesar 2.5.

Melalui asumsi – asumsi yang digunakan, maka didapatkan hasil perhitungan kebutuhan torsi motor *drive* sebesar 0.23 Nm yang dijelaskan melalui Persamaan 18 sampai 25.

$$I_{wheel} = \frac{1}{2} (0.2)(0.1)^2 = 0.001 \text{ kgm}^2 \quad (18)$$

$$\omega_{target} = \frac{2\pi * 500}{60} = 52.35 \text{ rad/s} \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{52.35 - 0}{1} = 52.35 \text{ rad/s}^2 \quad (20)$$

$$\tau_{wheel} = 0.001 * 52.35 = 0.05235 \text{ Nm} \quad (21)$$

$$a = 52.35 * 0.1 = 5.23 \text{ m/s}^2 \quad (22)$$

$$F_{structure} = 1 * 5.23 = 5.23 \text{ N} \quad (23)$$

$$\tau_{structure} = 5.23 * 0.1 = 0.523 \text{ Nm} \quad (24)$$

$$\tau_{drive} = \frac{0.05235 + 0.523}{2.5} = 0.23 \text{ Nm} \quad (25)$$

3.4 Pertimbangan Konfigurasi Gear

Konfigurasi gear perlu diperhitungkan untuk memasitkan proses transmisi gaya dari motor ke komponen gerak *swerve wheel* berlangsung dengan optimal dan aman. Pertimbangan dapat dilakukan dengan memperkirakan kebutuhan nilai *module* dan *face width* dari sebuah gear ketika dihadapkan dengan situasi ideal dari pergerakan *swerve wheel* yang diinginkan [10]. Pertimbangan nilai *module* dan *face width* dapat dilakukan dengan melakukan kalkulasi dengan nilai torsi yang didapatkan pada Persamaan 26 hingga 29 sebagai nilai torsi minimal dan berasumsi bahwa gear terkecil yang digunakan memiliki 10 buah gigi serta, *tensile strength* dari material PLA+ berkisar antara 47 – 52 MPa (Appusamy et al., 2024).

$$r_p = \frac{m * N}{2} = 5\text{m} \quad (26)$$

$$F_t = \frac{0.23}{5\text{m}} = \frac{0.046}{\text{m}} \quad (27)$$

$$\sigma_b = \frac{\sigma_y}{SF} = \frac{52\text{MPa}}{2} = 26 \text{ Mpa} = 26 * 10^6 \text{ Pa} \quad (28)$$

$$b = \frac{F_t * \pi * m}{\tau * Y} = \frac{0.046 * \pi * m}{26 * 10^6 * 0.201} = \frac{0.14 \text{ m}}{5.2 * 10^6} \quad (29)$$

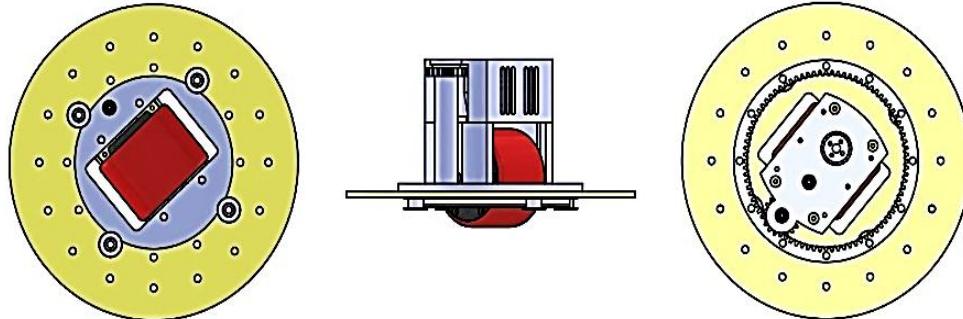
Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan hubungan antara nilai *face width* (b) dan *module* (m) dari gear terkecil yang dipakai dalam *swerve wheel* untuk memudahkan perhitungan, module gear terkecil diasumsikan memiliki nilai 1 sehingga didapatkan nilai *face width* minimal sebesar 2.9mm seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 30.

$$b = \frac{0.14 * 1}{5.2 * 10^6} = 2.6 * 10^{-8} \text{ m} \quad (30)$$

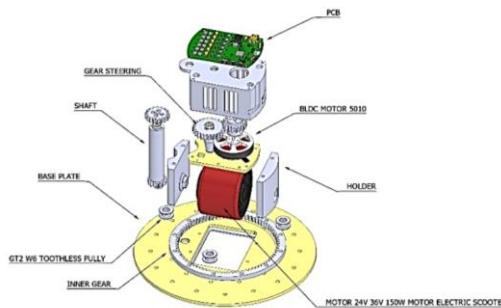
3.5 Desain Mekanis

Berdasarkan perhitungan syarat konfigurasi gear pada Persamaan 3.17, nilai *module gear* ditentukan menjadi 1.5 dan *face width* sebesar 10 mm untuk memudahkan proses desain mekanisme *swerve wheel*. Gambar 4 hingga 6 merupakan desain mekanis dari *swerve wheel* yang dibuat menggunakan *software solidworks 2022* [11].

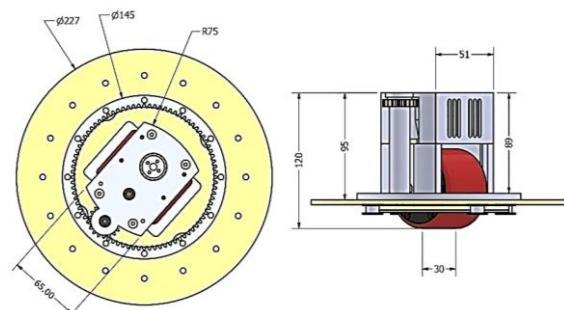
Sistem dirancang dengan tiga modul *swerve wheel*. Setiap modul memiliki dua motor BLDC, satu untuk translasi dan satu untuk rotasi sudut modul. Pengendalian motor dilakukan oleh mikrokontroler STM32 menggunakan kontrol PID. Sedangkan pengaturan logika navigasi, perhitungan kinematika, dan koordinasi keseluruhan dilakukan oleh NI myRIO yang diprogram menggunakan LabVIEW. Encoder dipasang pada motor untuk memberikan umpan balik posisi dan kecepatan.



Gambar 4. Desain mekanisme swerve wheel



Gambar 5. Desain *swerve wheel* exploded view



Gambar 6. Dimensi *swerve wheel*

Adapun spesifikasi dari komponen – komponen yang dipakai adalah sebagai berikut :

1. *Main plate* dan *top plate* dibuat menggunakan material plat fiber resin dengan ketebalan 5 mm.
2. Semua komponen gear dibuat menggunakan material filament PLA+.
3. Komponen – komponen seperti *spacer*, *bearing* dan *baut* menggunakan material logam.
4. *Drive Motor* menggunakan *brushless motor* tipe BM4108 370 kV dengan torsi 8.6 Nm.
5. *Steering Motor* menggunakan *brushless motor* tipe A2212 1000 kV dengan torsi 12.9 Nm.
6. Roda menggunakan bahan *Polyurethane Wheel* karet 64 mm 85 A.

3.6 Referensi Desain Mekanis *Chassis Swerve Wheel*

Berikut merupakan referensi desain mekanis *chassis* dari *swerve wheel* dengan konfigurasi tiga buah *swerve wheel* dapat dilihat pada Gambar 7. Masing – masing *swerve wheel* berjarak 30 cm dari titik pusat dan membentuk segitiga sama sisi. *Sswerve wheel* dihubungkan satu sama lain menggunakan komponen penghubung yang dibuat dari material filament jenis PLA+ [12].

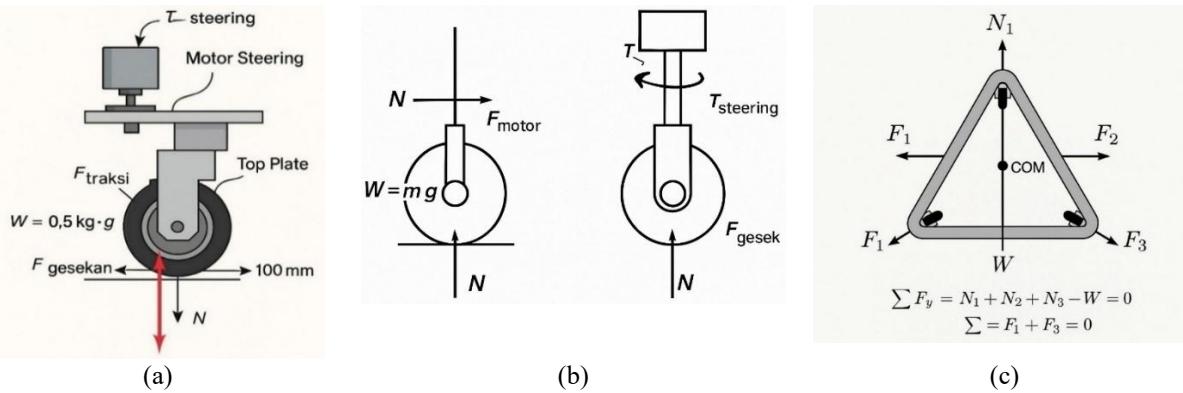


Gambar 7. Desain mekanisme *chassis swerve wheel*

3.7 Diagram Benda Bebas (Free Body Diagram)

Diagram Benda Bebas (DBB) adalah sebuah gambaran skematis dari sebuah benda atau sistem, yang menunjukkan semua gaya dan momen yang bekerja pada benda tersebut. Diagram benda bebas digunakan untuk menganalisis keseimbangan gaya dan momen, baik dalam kondisi diam (statik) maupun bergerak (dinamik).

Diagram benda bebas sangat penting dalam perancangan *swerve wheel* untuk *autonomous mobile* robot karena berfungsi sebagai dasar analisis gaya dan momen yang bekerja pada setiap komponen sistem. Melalui diagram benda bebas, perancang dapat menentukan besar gaya normal pada roda, menghitung torsi yang dibutuhkan motor penggerak dan motor *steering*, serta memahami distribusi beban ke setiap roda untuk memastikan kestabilan robot. Selain itu, diagram benda bebas membantu mengidentifikasi kebutuhan gaya traksi dan gesekan agar robot dapat bergerak tanpa selip. Dengan informasi ini, perancang dapat memilih material, dimensi, dan spesifikasi motor yang sesuai secara teknis, sehingga desain menjadi efisien, kuat, dan andal [13]. Diagram benda bebas juga menjadi alat validasi teknis yang penting sebelum robot direalisasikan secara fisik, karena memastikan bahwa semua komponen mampu bekerja sesuai beban dan gaya yang terjadi selama pengoperasian. Dapat dilihat contoh dari Diagram Benda Bebas (DBB) pada Gambar 8.



Gambar 8. (a) dan (b) Diagram benda bebas dari 1 roda *swerve wheel*; (c) Diagram benda bebas dari 3 roda *swerve wheel*

3.8 Gaya Normal (N)

Gaya normal adalah gaya yang bekerja tegak lurus terhadap permukaan sentuh antara dua benda dan muncul sebagai reaksi terhadap gaya tekan yang diberikan oleh benda tersebut pada permukaan. Gaya normal bekerja vertikal dari permukaan lantai ke atas dapat dilihat pada Persamaan 30 :

$$N = m_{total} \cdot \frac{g}{n}$$

- m_{total} = massa total robot
- g = percepatan gravitasi (9.81 m/s^2)
- n = jumlah roda *swerve* (3 roda)

Contoh : Jika massa robot 5 kg dan kamu pakai 3 roda,

$$N = 5 \cdot \frac{9.81}{3} = 49.05 \frac{\text{N}}{\text{roda}} \quad (30)$$

3.9 Gaya Friksi / Traksi (f)

Gaya friksi (atau gaya gesek) adalah gaya yang muncul di antara dua permukaan yang bersentuhan dan bergerak atau cenderung bergerak relatif satu sama lain, dengan arah yang berlawanan terhadap arah gerak atau kecenderungan gerak tersebut.

$$f = \mu \cdot N$$

- μ = koefisien gesekan statis antara roda dan lantai (biasanya 0.6–0.9 untuk karet dan lantai kasar)
- N dari perhitungan sebelumnya

Misal $\mu = 0.7$, maka $f = 0.7 \cdot 49.05 = 34.3 \text{ N}$ (31)

3.10 Torsi Penggerak Roda (τ_{drive})

Torsi penggerak roda adalah momen putir yang diberikan oleh motor ke roda untuk menghasilkan putaran dan menggerakkan kendaraan atau robot. Torsi dari BLDC motor yang mendorong roda :

$$\tau = f \cdot r$$

- r = jari-jari roda
- f = gaya friksi (hasil dari BLDC motor)

Jika $r = 0.05 \text{ m}$, maka $\tau = 34.3 \cdot 0.05 = 1.715 \text{ Nm}$ (32)

3.11 Torsi Steering (τ_{steer})

Torsi steering adalah momen putir yang diperlukan untuk memutar arah roda sehingga mengubah arah gerak kendaraan atau robot. Motor 24 V 150 W berfungsi memutar modul dengan estimasinya sebagai berikut :

$$\tau_{steer} = \frac{P}{\omega}$$

- P = daya motor (150 W)
- ω = kecepatan sudut (rad/s), misal 60 rpm = 6.28 rad/s

$$\tau_{steer} = \frac{150}{6.28} \approx 23.9 \text{ Nm} \quad (33)$$

Perhitungan torsi diatas asumsi tanpa gear. Jika menggunakan gearbox 1:5, torsi efektif dapat dihasilkan sebesar 120 Nm.

3.12 Perhitungan Rasio Gear dan Torsi

Perhitungan rasio gear dan torsi digunakan untuk menyesuaikan kecepatan dan kekuatan putaran antara motor dan roda. Rasio gear menentukan seberapa besar torsi yang ditingkatkan atau dikurangi, di mana torsi berbanding lurus dengan rasio gear dan kecepatan berbanding terbalik.

1. Rasio Tahap 1

Inner Gear (72 gigi) dengan Gear Steering 4 (24 gigi):

$$GR_1 = \frac{72}{24} = 3$$

2. Rasio Tahap 2

Gear Steering 4 (24 gigi) ke Gear Steering 3 (20 gigi):

$$GR_2 = \frac{24}{20} = 1.2$$

3. Rasio Tahap 3

Gear Steering 3 (20 gigi) ke Gear Steering 2 (16 gigi):

$$GR_3 = \frac{20}{16} = 1.25$$

4. Total Rasio Reduksi

$$GR_{\text{total}} = GR_1 \times GR_2 \times GR_3 = 3 \times 1.2 \times 1.25 = 4.5$$

5. Torsi Output dari Motor Steering

Misal motor input:

$$150 \text{ W pada } 60 \text{ rpm} \rightarrow \tau_{\text{motor}} \approx 24 \text{ Nm}$$

Maka torsi setelah gear:

$$\tau_{\text{output}} = \tau_{\text{motor}} \times GR_{\text{total}} = 24 \times 4.5 = 108 \text{ Nm}$$

6. Estimasi Torsi (Contoh)

- Massa robot 20 kg $\rightarrow N \approx 49 \text{ N/roda}$
- $u=0.$ $\rightarrow f \approx 34 \text{ N}$
- $r=0.05 \text{ m} \rightarrow \tau=1.7 \text{ Nm}$
- Motor steer 150W, 60 rpm $\rightarrow M \approx 24 \text{ Nm}$

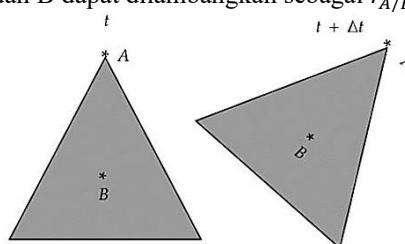
7. Perhitungan Gear (Asumsi)

- Inner Gear = 20 teeth
- Steering Gear = 80 teeth
- Rasio gear = 1:4 \rightarrow Torsi output = $5 \text{ Nm} \times 4 = 20 \text{ Nm}$

3.13 Rigid Body Motion

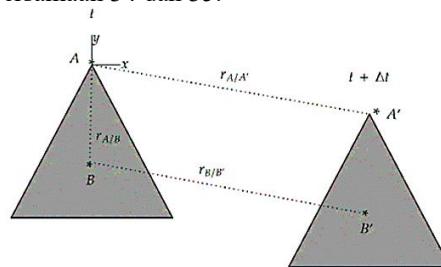
Pengembangan kinematika robot dimulai dengan gagasan tentang gerakan benda tegar, yang menekankan karakteristik geometrisnya. Gerakan benda tegar terdiri dari gerakan translasi dan rotasi.

Pada Gambar 9 terlihat ada 2 jenis gerakan yaitu gerakan translasi dan gerakan rotasi, serta pergerakan badan robot dari waktu t sampai waktu $t + \Delta t$. Gerak translasi merupakan gerakan perpindahan yang mengubah jarak dari posisi awal tanpa mengubah arah hadap dan gerak rotasi merupakan gerakan rotasi yang tidak mengubah jarak tetapi mengubah arah hadap yang mengakibatkan sudut dari kondisi awal [14]. Pada Gambar 9 terdapat 2 titik yang posisinya selalu tetap yaitu A dan B the distance between points A and B dapat dilambangkan sebagai $r_{A/B}$.



Gambar 9. Gerakan robot pada 2D

Karena robot berpindah tempat, titik A dan B juga mengalami perpindahan gerakan translasi robot seperti titik A ke A' dan titik B ke titik B' seperti pada Gambar Meskipun robot berpindah tempat, jarak A dan B tetap sama. Oleh karena itu, dapat dilambangkan seperti pada Persamaan 34 dan 35.

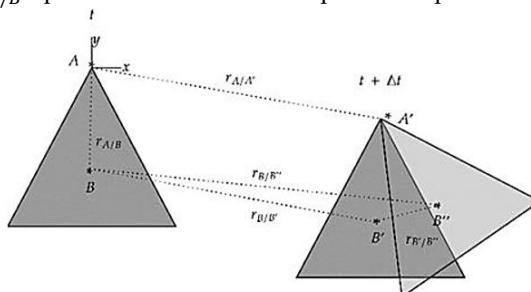


Gambar 10. Gerak translasi

$$r_{A/B} = r_{A'/B'} \quad (34)$$

$$r_{A/A'} = r_{B/B'} \quad (35)$$

Kemudian, pada Gambar 11, robot mengalami rotasi setelah translasi. Gerakan benda tegar dalam contoh ini berputar di sekitar sumbu tetap, khususnya sumbu z, yang dikaitkan dengan titik A' dan kecepatan sudut ω . Dalam kondisi ini, titik B' berubah posisi ke B'' sejauh $r_{B'/B''}$ persamaan matematika dapat dilihat pada Persamaan 36.



Gambar 11. Gerak rotasi

$$r_{B/B''} = r_{B/B'} + r_{B'/B''} \quad (36)$$

Jika Persamaan 37 diturunkan ke waktu, bentuk matematika berikut akan diperoleh seperti yang terlihat pada Persamaan 38 :

$$\frac{dr_{B/B''}}{dt} = \frac{dr_{B/B'}}{dt} + \frac{dr_{B'/B''}}{dt} \quad (37)$$

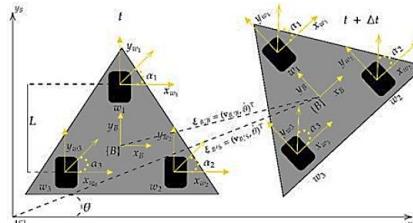
$$v_{B/B''} = v_{B/B'} + v_{B'/B''} \quad (38)$$

Persamaan 39 adalah persamaan perubahan kecepatan terhadap waktu. $v_{B/B'}$ adalah kecepatan perubahan posisi dari titik B ke titik B', $v_{B/B''}$ adalah kecepatan perubahan posisi dari titik B ke titik B'', dan $v_{B'/B''}$ adalah kecepatan perubahan posisi dari titik B' ke titik B'' dengan mengacu pada sumbu rotasi di titik A'. Notasi $v_{B'/B''}$ sama dengan kecepatan sudut (ω), persamaannya dapat dilihat pada Persamaan 3.23.

$$v_{B/B''} = v_{B/B'} + \omega \times v_{B'/B''} \quad (39)$$

3.14 Pemodelan Kinematika pada Penggerak Swerve 3 Roda

Ilmu pergerakan robot yang dikenal sebagai pemodelan kinematika didasarkan pada pemeriksaan koordinat robot saja, tanpa memperhitungkan gaya, torsi, atau percepatan. Pada bagian ini, model struktur penggerak swerve 3 roda dijelaskan. Model ini sangat penting untuk menentukan persamaan kinematika robot. Gambar 12 menggambarkan model robot penggerak swerve 3 roda.



Gambar 12 Gerak robot swerve 3 roda

Sebelum menentukan pergerakan, terlebih dahulu harus ditemukan koordinat (frame) yang dapat dijadikan acuan oleh robot ketika bergerak. Frame pada badan robot ditentukan dengan mengambil titik tengah badan robot yang dinotasikan dengan (B) dan frame pada roda ditentukan dengan mengambil titik tengah setiap roda robot yang dinotasikan dengan (W). Untuk mengendalikan kecepatan badan robot yang dipengaruhi oleh kecepatan putar roda dari badan robot itu sendiri dinotasikan dengan ($v_{W/B}$), bentuk matematikanya dapat dilihat pada Persamaan 40.

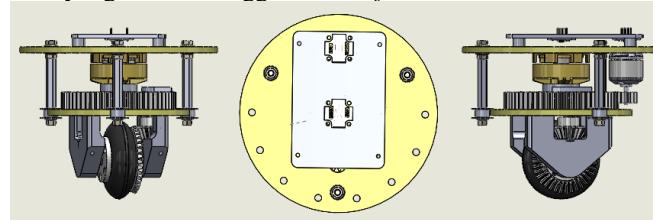
$$v_{W/B} = v_{B/B} + \omega \times r_{W/B} \quad (40)$$

Karena kecepatan sudut robot hanya berada pada sumbu Z, nilai ω pada Persamaan 40 dapat diselesaikan dengan perkalian silang sehingga menjadi seperti berikut seperti terlihat pada Persamaan 41.

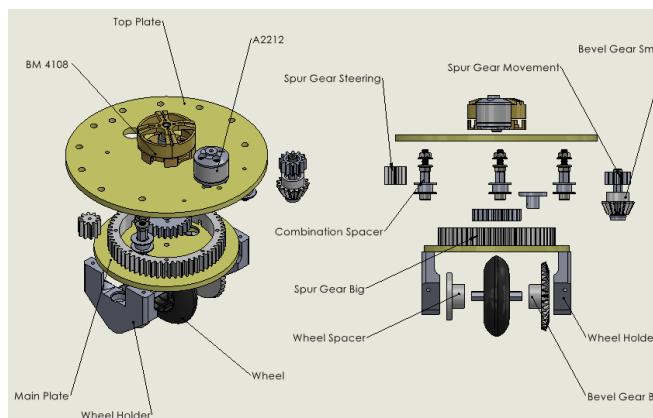
$$\begin{pmatrix} \dot{x}_{W/B} \\ \dot{y}_{W/B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x}_{B/B} \\ \dot{y}_{B/B} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -y_{W_i} \omega_z \\ x_{W_i} \omega_z \end{pmatrix} \quad (41)$$

3.15 Bentuk Desain Swerve Wheel Saat Sebelum Dikembangkan

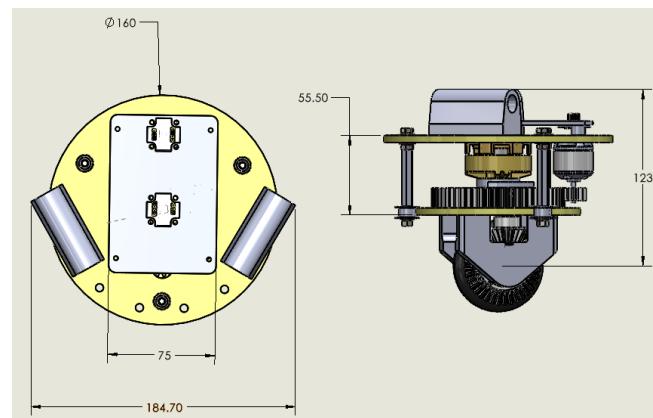
Berikut merupakan bentuk tampak dari desain yang telah dikembangkan sebelumnya oleh rekan saya Gabriel Julio Armando Siagian. Berdasarkan perhitungan syarat konfigurasi gear, nilai *module gear* ditentukan menjadi 1.5 dan *face width* sebesar 10 mm untuk memudahkan proses desain mekanisme *swerve wheel*. Gambar 13 hingga 15 merupakan desain mekanis dari *swerve wheel* yang dibuat menggunakan *Software Solidworks 2022*. (Fazekas et al., 2022)



Gambar 13 Desain mekanisme *swerve wheel*



Gambar 14 Desain *swerve wheel* exploded view



Gambar 15 Dimensi *swerve wheel*

4. Pembahasan

4.1 Proses Manufaktur Mekanisme *Scurve Wheel*

Proses manufaktur mekanisme *swerve wheel* merupakan rangkaian tahapan produksi yang meliputi perancangan, pemilihan material, pemesinan, perakitan, hingga pengujian komponen, dengan tujuan menghasilkan sistem roda yang mampu berputar dan berbelok secara independen. Setiap tahap, mulai dari pemotongan dan pembentukan material, pembuatan komponen poros dan roda gigi, hingga perakitan modul roda dengan aktuator dan sensor, dilakukan secara presisi untuk menjamin keandalan, kekuatan struktural, serta ketepatan gerak dari mekanisme *swerve wheel* [15].

4.2 Total Assembly *Swerve Wheel*

Perakitan total ini memperlihatkan struktur utama mekanisme *swerve wheel* yang telah terintegrasi antara cover, shaft, gear steering, serta inner gear sebagai komponen penggerak, sehingga sistem sudah mampu menggambarkan alur transmisi dan fungsi steering. Posisi komponen terlihat selaras dan sesuai rancangan, dengan bearing yang mendukung kestabilan poros saat berputar. Meskipun belum dilengkapi roda sebagai elemen akhir penggerak, hasil perakitan ini sudah

menunjukkan kesesuaian desain serta memberikan gambaran nyata mengenai tata letak dan interaksi antar komponen dalam modul swerve wheel. Hasil dari perakitan total dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16 Total Assembly Swerve Wheel

4.3 Perhitungan Kontrol Swerve Wheel

Perhitungan kontrol swerve wheel dilakukan untuk menentukan kebutuhan torsi serta rasio gear yang sesuai agar sistem dapat bergerak dengan efisien dan presisi. Proses ini mencakup analisis gaya normal, gaya friksi, serta torsi yang bekerja pada roda dan mekanisme steering, yang kemudian disesuaikan dengan spesifikasi motor dan konfigurasi gear yang digunakan. Dengan perhitungan yang tepat, diperoleh gambaran mengenai distribusi gaya dan momen putir pada setiap komponen, sehingga sistem kendali mampu mengatur kecepatan dan arah pergerakan roda secara optimal. Hasil perhitungan ini menjadi dasar dalam pemilihan komponen mekanik dan pengembangan algoritma kontrol untuk menjamin kinerja swerve wheel yang stabil, responsif, dan andal.

4.4 Perhitungan Torsi Motor Steering dan Motor Drive

Perhitungan torsi pada mekanisme swerve wheel menunjukkan bahwa motor steering membutuhkan torsi sebesar 0,036 Nm untuk memutar main plate bermassa 1 kg dengan diameter 120 mm melalui reduksi gear 1:5, sehingga orientasi roda dapat berubah dengan cepat dan presisi. Sementara itu, motor drive memerlukan torsi sebesar 0,23 Nm untuk menggerakkan roda bermassa 0,2 kg dengan diameter 100 mm serta rangka swerve wheel 1 kg agar mampu berakselerasi hingga 500 RPM dalam 1 detik. Dengan demikian, spesifikasi motor yang digunakan harus mampu memenuhi kebutuhan torsi minimal tersebut agar sistem bekerja stabil dan optimal.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa pemilihan material PLA+ untuk gear, fiber resin untuk plat utama, serta logam pada komponen penguat terbukti efektif dalam menghasilkan konstruksi yang kuat, kaku, dan mudah diproduksi dengan biaya terjangkau. Desain mekanis dengan konfigurasi triangular swerve drive juga memberikan struktur sederhana namun tetap mendukung manuverabilitas penuh, sehingga sesuai untuk prototipe robot skala laboratorium. Namun, diperlukan evaluasi lebih lanjut terhadap toleransi pada rangkaian gear agar transmisi daya berlangsung optimal dengan friksi yang minimal.

6. Daftar Pustaka

- [1] Appusamy, A. M., Karuppan, S., Subramaniyan, M., & Chinnappan, B. A. (2024). Influence of filler and FDM printing parameters on PLA tensile strength. *Polimery/Polymers*, 69(2), 92–102. <https://doi.org/10.14314/polimery.2024.2.3>
- [2] DeNoma, Benjamin, Kendall, Michael, Poulos, & Nick. (2022). 4-wheel Independent Steering “Swerve Drive.”
- [3] Diah Ika Putri, M., Ma’arif, A., & Dwi Puriyanto, R. (2022). Pengendali Kecepatan Sudut Motor DC Menggunakan Kontrol PID dan Tuning Ziegler Nichols. *Techno* (Jurnal Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Purwokerto), 23(1). <https://doi.org/10.30595/techno.v23i1.10773>
- [4] Rosyidin, A. A., Siradjuddin, I., Putri, R. I., & Achmadiah, M. N. (2024). Kinematic of 3-Wheels Swerve Drive Using BLDC Motor. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*. <https://doi.org/10.22219/kinetik.v9i3.1995>
- [5] Tagliavini, L., Colucci, G., Botta, A., Cavallone, P., Baglieri, L., & Quaglia, G. (2022). Wheeled Mobile Robots: State of the Art Overview and Kinematic Comparison Among Three Omnidirectional Locomotion Strategies. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 106(3). <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01745-7>
- [6] Tun, T. T., Huang, L., Mohan, R. E., & Matthew, S. G. H. (2019). Four-wheel steering and driving mechanism for a reconfigurable floor cleaning robot. *Automation in Construction*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.017>

-
- [7] Vranas, M., & Mourtos, N. J. (2022). Compact Shaft-Rotating Swerve Drive with Prong Structure for Highly-Maneuverable and Agile Robots. Athens Journal of Technology & Engineering, 9(1), 25–42. <https://doi.org/10.30958/ajte.9-1-2>
 - [8] A. A. Rosyidin, I. Siradjuddin, R. I. . Putri, and M. N. Achmadiah, “Kinematic of 3-Wheels Swerve Drive Using BLDC Motor”, KINETIK, vol. 9, no. 3, Aug. 2024. <https://doi.org/10.22219/kinetik.v9i3.1995>
 - [9] D. Rijalusalam and I. Iswanto, “Implementation Kinematics Modeling and Odometry of Four Omni Wheel Mobile Robot on The Trajectory Planning and Motion Control Based Microcontroller,” Journal of Robotics and Control (JRC), vol. 2, Jan. 2021. <https://doi.org/10.18196/jrc.25121>
 - [10] N. Ghobadi and S. F. Dehkordi, “Dynamic modeling and sliding mode control of a wheeled mobile robot assuming lateral and longitudinal slip of wheels,” in 2019 7th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), Nov. 2019, pp. 150–155. <https://doi.org/10.1109/ICRoM48714.2019.9071913>
 - [11] A. Sofwan, H. R. Mulyana, H. Afrisal, and A. Goni, “Development of Omni-Wheeled Mobile Robot Based-on Inverse Kinematics and Odometry,” in 2019 6th International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE), 2019, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2019.8904418>
 - [12] D. and B. F. and P. J. I. Yunardi Riky Tri and Arifianto, “Holonomic implementation of three wheels omnidirectional mobile robot using DC motors,” Journal of Robotics and Control (JRC), vol. 2, pp. 65–71, 2021. <https://doi.org/10.18196/jrc.2254>
 - [13] H. Taheri and C. X. Zhao, “Omnidirectional mobile robots, mechanisms and navigation approaches,” Mech Mach Theory, vol. 153, p. 103958, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103958>
 - [14] M. Achmadiah, A. Rosyidin, A. Pracoyo, I. Siradjuddin, D. Permatasari, and G. Azhar, “Desain permodelan dan simulasi Field Oriented Control (FOC) menggunakan motor BLDC: Aplikasi pada Drive Train -Swerve Drive,” Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri, vol. 10, pp. 361–368, Jun. 2023. <https://doi.org/10.33795/elkolind.v10i3.4416>
 - [15] X. Zhang, Y. Xie, L. Jiang, G. Li, J. Meng, and Y. Huang, “Trajectory Tracking of a 4wis4wid Robot Using Adaptive Receding Horizon Control Based on Neurodynamics Optimization,” in 2019 ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2019, pp. 565–570