

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Mobile robot*

Mobile robot merupakan sebuah robot yang dapat bergerak dengan leluasa karena memiliki alat gerak untuk berpindah posisi. Secara umum dan mendasar sebuah *mobile robot* dibedakan oleh *locomotion mobile robot* atau sistem penggerak. *Locomotion* merupakan gerakan melintasi permukaan datar dengan semua ini disesuaikan oleh medan yang akan dilalui dan juga tugas yang diberikan kepada robot. *Mobile robot* diklasifikasikan menjadi robot beroda dan robot berkaki. Perbedaan keduanya adalah pada sistem pergerakannya, yaitu di bagian mekanik robot yang terhubung langsung dengan aktuator yang terkontrol. Untuk robot beroda, aktuator dihubungkan ke mekanik roda dan untuk robot berkaki, aktuator dihubungkan ke alat gerak yang bentuk mekaniknya didesain menyerupai kaki (Mawardani et al., 2022).

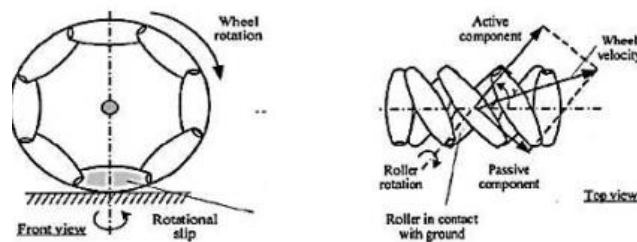
2.2. *Mecanum Wheels*

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 2.1), 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 (Hakim et al., 2015).

Roda Mecanum disebut sebagai roda Ilon atau roda Swedia yang diciptakan pada tahun 1973 oleh insinyur Swedia, Bengt Ilon. Pada gambar 2.2 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 (Muliady & Arisandy, 2017).



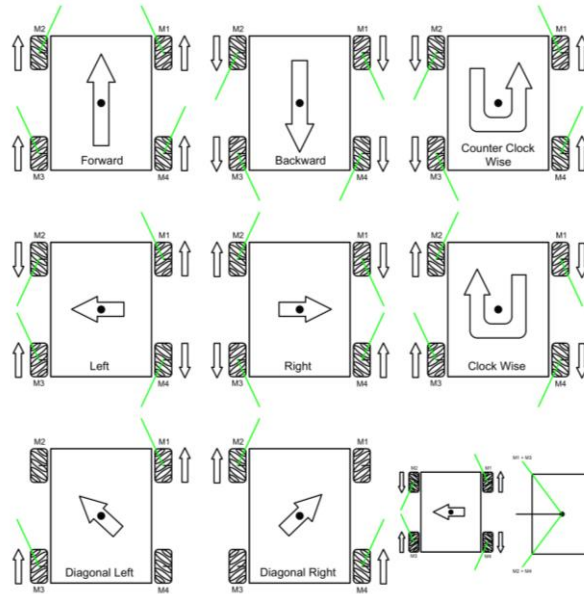
Gambar 2. 1 *Mecanum Wheels* 45°
(Sumber: Hakim et al., 2015)



Gambar 2. 2 Derajat Kebebasan *Mecanum Wheels*
(Sumber: Muliady & Arisandy, 2017)

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° dan -45°. Arah dan kecepatan tiap roda menghasilkan gaya resultan yang memungkinkan pergerakan linier tanpa mengubah orientasi robot atau sudut roda, sehingga

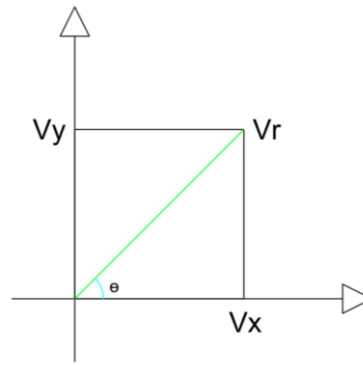
memberikan mobilitas yang tinggi tanpa perlu memutar arah hadap robot (Gambar 2.3).



Gambar 2. 3 *Mecanum Drive*
(Sumber: Pribadi Desain AutoCAD)

2.3. *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 (Fahmizal et al., 2022). Dengan mengacu dari persamaan vektor yang digambar pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Arah Vektor Kecepatan *Mecanum Wheels*
(Sumber: Pribadi Desain AutoCAD)

$$V_r = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (2.1)$$

Persamaan dasar (2.1) digunakan sebagai referensi dalam menurunkan rumus *invers kinematics* untuk *mecanum wheel* yang akan diterapkan pada kecepatan keluaran setiap roda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Jika kecepatan total robot V_r dan arah geraknya θ diketahui, maka komponen kecepatan translasi V_y dan V_x dapat dihitung. Komponen-komponen ini kemudian digunakan dalam solusi *invers kinematics* untuk mengontrol pergerakan *mecanum wheel*. Proses langkah-langkah penurunan rumusnya dijelaskan sebagai berikut.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x} \quad (2.2)$$

$$V_r^2 = V_x^2 + V_y^2 \quad (2.3)$$

$$V_y = \sqrt{V_r^2 - V_x^2} \quad (2.4)$$

$$V_y = \sqrt{V_r^2 - V_x^2} \quad (2.5)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.5) ke (2.2), maka diperoleh persamaan:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x} \quad (2.6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_y^2}{V_x^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_r^2 - V_x^2}{V_x^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

$$(\tan \theta)^2 = \frac{V_r^2 - V_x^2}{V_x^2} \quad (2.9)$$

$$(\tan \theta)^2 = \frac{V_r^2}{V_x^2} - 1 \quad (2.10)$$

$$(\tan \theta)^2 + 1 = \frac{V_r^2}{V_x^2} \quad (2.11)$$

$$V_x^2 = \frac{V_r^2}{(\tan \theta)^2 + 1} \quad (2.12)$$

$$V_x = \sqrt{\frac{V_r^2}{(\tan \theta)^2 + 1}} \quad (2.13)$$

Berdasarkan hasil penurunan persamaan rumus (2.5) dan (2.13) dapat diperoleh nilai V_x dan V_y yang akan digunakan dalam solusi *invers kinematics* pada robot beroda *mecanum* sesuai dengan persamaan yang telah ditentukan. Nilai tersebut menjadi dasar untuk menghitung kecepatan dan arah masing-masing roda guna mencapai pergerakan yang diinginkan.

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(l_1 + l_2) \\ 1 & 1 & (l_1 + l_2) \\ 1 & -1 & (l_1 + l_2) \\ 1 & 1 & -(l_1 + l_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R\omega_1 \\ R\omega_2 \\ R\omega_3 \\ R\omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(l_1 + l_2) \\ 1 & 1 & (l_1 + l_2) \\ 1 & -1 & (l_1 + l_2) \\ 1 & 1 & -(l_1 + l_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Keterangan:

V_i = Kecepatan linier roda ke i ($i = 1,2,3,4$) (m/s)

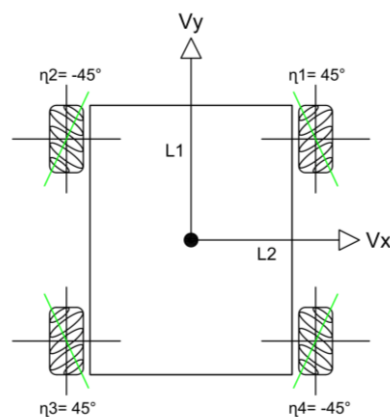
$R\omega_i$ = Kecepatan sudut roda ω_i ($i = 1,2,3,4$) (rad/s)

V_x = Kecepatan translasi sumbu X (m/s)

V_y = Kecepatan translasi sumbu Y (m/s)

ω_z = Kecepatan rotasi sumbu Z (rad/s)

l_1 dan l_2 = Jarak titik pusat ke sumbu X dan Y (meter)



Gambar 2. 5 Posisi *Mecanum Wheel* dengan Konfigurasi *Quad Position*.

(Sumber: Pribadi Desain AutoCAD)

2.4. Motor DC

Motor DC (*Direct Current*) adalah perangkat elektromekanik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor ini menggunakan tegangan searah sebagai sumber daya utamanya. Perbedaan tegangan antara kedua terminal motor menyebabkan rotor berputar dalam satu arah, sementara membalikkan polaritas tegangan akan membalikkan arah putaran motor. Arah putaran motor ditentukan oleh polaritas tegangan pada terminal-terminalnya, sedangkan kecepatan putaran bergantung pada besarnya perbedaan tegangan tersebut (Kusuma & Santoso, 2023).

2.4.1. Komponen Utama Motor DC

1. Stator

Stator adalah bagian motor DC yang tetap diam dan berfungsi menghasilkan medan magnet. Di dalamnya terdapat magnet permanen atau kumparan medan (*field winding*) yang menghasilkan medan magnet saat diberi catu daya DC. Medan magnet ini menciptakan interaksi dengan rotor untuk rotor berputar.

Oleh karena itu stator disebut sebagai penghasil medan magnet utama dalam motor DC.

2. Rotor

Rotor adalah bagian motor DC yang bergerak dan berfungsi sebagai penggerak utama. Rotor terbuat dari inti besi yang dililitkan dengan kumparan sebagai tempat terjadinya induksi GGL (Gaya Gerak Listrik). Kecepatan putaran rotor bergantung pada besarnya tegangan sumber dan kuatnya medan magnet yang dihasilkan. Semakin tinggi tegangan yang diberikan, semakin cepat rotor berputar karena keduanya memiliki hubungan yang sebanding.

3. Air gap/celah udara

Celah udara adalah jarak antara rotor dan stator pada motor DC. Bagian ini memiliki peran penting untuk rotor berputar dengan bebas dan jika celah udara tidak ada, rotor dan stator akan bergesekan dengan mengakibatkan motor tidak dapat berputar dan berpotensi mengalami kerusakan.

4. Brushes

Brushes pada motor DC berfungsi menyalurkan arus listrik ke komutator untuk aliran listrik ke kumparan rotor. Brushes biasanya terbuat dari campuran karbon, logam, dan grafit, dilengkapi dengan pegas untuk menjaga kontak yang stabil dengan komutator. Bahan karbon yang digunakan harus memiliki konduktivitas tinggi untuk meminimalkan kerugian listrik dan koefisien gesekan rendah untuk mengurangi keausan, sehingga motor dapat bekerja dengan efisien dan lebih tahan lama.

5. Komutator

Batangan tembaga yang diperkuat dan dilapisi dengan bahan isolasi seperti mika berfungsi untuk mengumpulkan arus listrik yang diinduksi dari kumparan jangkar. Arus ini kemudian dikonversi menjadi arus searah melalui kontak dengan brushes untuk motor DC beroperasi dengan efisien.

2.4.2. Prinsip Kerja Motor DC

Motor DC mengubah energi listrik menjadi energi mekanik melalui interaksi medan magnet. Saat arus listrik mengalir melalui konduktor dalam medan magnet stator terbentuk fluks magnet yang menghasilkan gaya sesuai prinsip gaya Lorentz dan memicu perputaran rotor. Arah putaran ditentukan oleh hubungan antara arah arus, medan magnet, dan gaya yang diprediksi menggunakan kaidah tangan kanan. Komutator dan sikat-sikat (*brushes*) menjaga arus tetap searah dalam jangkar untuk mempertahankan putaran. Tegangan induksi yang muncul disebut GGL lawan, bekerja melawan tegangan suplai dan memengaruhi kecepatan putaran motor, memastikan motor DC beroperasi secara kontinu dan efisien (Imroatul Hudati, 2021).

2.4.3. Motor DC JGA25-370

Motor DC JGA25-370 adalah motor yang dilengkapi dengan encoder untuk meningkatkan kontrol posisi dan kecepatan. Encoder bawaan memungkinkan deteksi posisi rotor secara real-time, sehingga sistem dapat menyesuaikan arus dan tegangan untuk mencapai kinerja optimal. Motor ini dirancang untuk menghasilkan torsi tinggi dalam ukuran kecil, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi yang membutuhkan presisi tinggi seperti robotika dan otomasi industri. Dibandingkan dengan motor DC tanpa encoder, JGA25-370 menawarkan pengendalian yang lebih

akurat dan responsif terhadap perubahan kondisi operasional, meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.



Gambar 2. 6 Motor DC JGA25-370
(Sumber: Pribadi)

Tabel 2. 1 Spesifikasi Motor DC JGA25-370

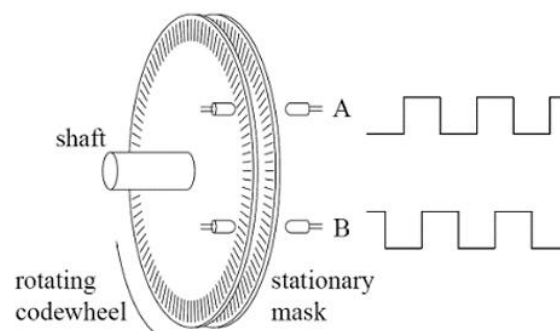
<i>Operating Voltage</i>	6.0 VDC
<i>Speed</i>	100 RPM
<i>Shaft diameter</i>	4 mm
<i>Length</i>	12 mm
<i>Connection Wire Length</i>	20 cm
<i>No-Load Speed</i>	100RPM @ 0.13A
<i>Max Efficiency</i>	1 Kg.cm/80 RPM @ 0.5A
<i>Max Power</i>	3 Kg.cm/55 RPM @ 1A
<i>Stall Torque</i>	6.5 Kg.cm @ 3A
<i>Reduction Ratio</i>	1:75
<i>Hall Effect Sensor Resolution</i>	823.1 PPR

Sumber: <https://abra-electronics.com/>

2.5. Rotary Encoder

Rotary encoder adalah perangkat yang mengubah gerakan mekanik menjadi sinyal digital. Perangkat ini berfungsi sebagai sensor untuk mendeteksi posisi, arah, dan kecepatan rotasi. *Rotary encoder* terdiri dari piringan kaca atau plastik dengan

pola garis-garis lubang. Saat piringan berputar, garis-garis ini memotong sinar cahaya antara pasangan photoemitter dan detektor. Proses ini menghasilkan sinyal digital yang sesuai dengan pergerakan piringan, memungkinkan pengukuran yang presisi dalam berbagai aplikasi (Distara & Rohman, 2020).



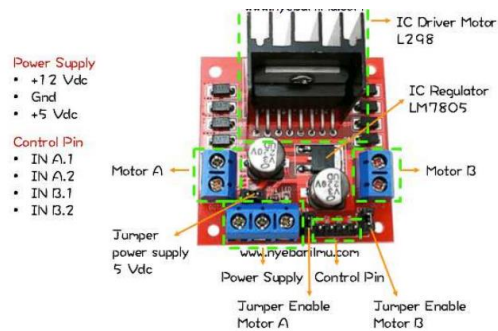
Gambar 2. 7 Sensor *Rotary Encoder*
(Distara & Rohman, 2020)

2.6. Driver Motor

Driver motor adalah rangkaian elektronik yang menggunakan transistor untuk mengendalikan gerakan motor DC. Salah satu driver motor yang sering digunakan adalah modul L298N, yang memiliki fungsi utama mengontrol kecepatan dan arah putaran motor DC. Pengaturan arah putaran dilakukan melalui rangkaian H-Bridge, sedangkan kecepatan motor dikendalikan menggunakan teknik PWM (*Pulse Width Modulation*) (Muttaqin & Santoso, 2021).

Motor driver L298N menggunakan IC L298 tipe H-Bridge yang terdiri dari transistor-transistor logik (TTL) dengan gerbang NAND. IC ini bekerja berdasarkan prinsip H-Bridge, yang memungkinkan pengendalian arah putaran motor DC. Pengaturan arah motor dilakukan melalui logika gerbang NAND, sementara level tegangan TTL dari output mikrokontroler digunakan untuk mengontrol motor. Tegangan yang dapat digunakan untuk mengendalikan robot

bisa mencapai tegangan 46 VDC dan arus 2A untuk setiap kanalnya. L298 dapat mengontrol dua motor DC secara bersamaan, karena memiliki dua rangkaian H-Bridge di dalam satu modul (Meidi et al., 2020).



Gambar 2. 8 *Driver Motor*
(Sumber: Meidi et al., 2020)

Keterangan:

- Enable A berfungsi untuk mengaktifkan bagian output motor A
- Enable B berfungsi untuk mengaktifkan bagian output motor B
- Jumper 5 Vdc sebagai mode pemilihan sumber tegangan 5Vdc, jika tidak dijumpers maka akan ke mode sumber tegangan 12 Vdc
- Control Pin Sebagai kendali perputaran dan kecepatan motor yang dihubungkan ke *Mikrocontroller*

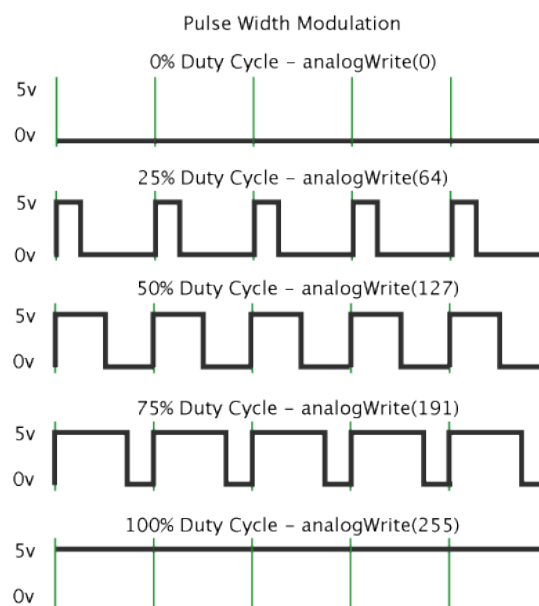
Adapun untuk spesifikasi dari *driver* motor L298N dapat dijabarkan seperti berikut:

- Menggunakan IC L298N (*Double H-bridge Drive Chip*)
- Tegangan minimal untuk masukan power antara 5V-35V
- Tegangan operasional 5V
- Arus untuk masukan antara 0-36mA
- Arus maksimal untuk keluaran per Output A maupun B yaitu 2A
- Daya maksimal yaitu 25W

- Dimensi modul yaitu 43 x 43 x 26mm
- Berat: 26g

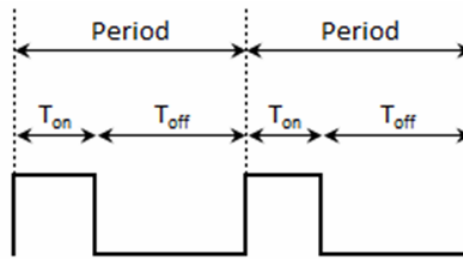
2.7. *Pulse Width Modulation (PWM)*

Pulse Width Modulation (PWM) adalah teknik yang digunakan untuk mengatur tegangan rata-rata yang diberikan ke perangkat elektronik dengan cara menghidupkan dan mematikan daya secara cepat. Tegangan rata-rata yang dihasilkan tergantung pada *duty cycle*, yaitu perbandingan antara waktu sinyal ON terhadap total waktu dalam satu siklus. Dalam pengendalian motor DC, PWM sering digunakan untuk mengatur kecepatan motor dengan mengubah lebar pulsa tegangan yang diberikan dalam bentuk gelombang persegi, sehingga memungkinkan kontrol yang efisien dan presisi (Maung et al., 2018).



Gambar 2. 9 PWM dengan *Duty Cycle* yang berbeda-beda
(Sumber: Maung et al., 2018)

Nilai sinyal PWM berkisar dari 0 hingga 255 yang setara dengan duty cycle PWM dari 0% hingga 100%. Diagram duty cycle ditunjukkan pada Gambar 2.10.

Gambar 2. 10 Diagram *Duty Cycle*

(Sumber: Maung et al., 2018)

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

$$\text{Periode} = 1/f \quad (2.14)$$

$$\text{Periode} = T_{on} + T_{off} \quad (2.15)$$

$$\text{Duty cycle} = \frac{T_{on}}{(T_{on} + T_{off})} \times 100\% \quad (2.16)$$

2.8. Mikrokontroler Arduino

Mikrokontroler adalah sebuah sistem komputer lengkap yang terintegrasi dalam satu chip. Berbeda dengan mikroprosesor, mikrokontroler sudah memiliki komponen internal seperti ROM (Read-Only Memory), RAM (Read-Write Memory), dan beberapa fitur standar untuk masukan (input) dan keluaran (output). Selain itu, mikrokontroler juga dilengkapi dengan perangkat tambahan seperti pencacah atau pewaktu, ADC (Analog to Digital Converter), DAC (Digital to Analog Converter), dan sistem komunikasi serial. Mikrokontroler tersedia dalam berbagai jenis dan sering digunakan dalam sistem pengendalian. Salah satu jenis mikrokontroler yang populer adalah Arduino, yang dikenal karena kemudahannya dalam penggunaan (ERWIN SUSANTO, 2015).



Gambar 2. 11 IC Mikrokontroler
(Sumber: Circuits-Electronic.com)

Mikrokontroler ATmega 2560 adalah bagian dari keluarga mikrokontroler AVR yang memiliki kapasitas memori flash sebesar 256KB. AVR (*Alf and Vegard's RISC Processor*) merupakan seri mikrokontroler CMOS 8-bit yang diproduksi oleh perusahaan ATMEL. Board Arduino 2560 menggunakan IC mikrokontroler ATmega 2560 dan memiliki jumlah pin I/O yang cukup banyak, dengan 54 pin digital input/output, di mana 15 di antaranya mendukung output PWM, serta 16 pin analog input dan 4 UART. Arduino Mega 2560 dilengkapi dengan kristal 16 MHz, yang memungkinkan penggunaannya menjadi sederhana hanya dengan menghubungkan daya melalui USB ke komputer atau laptop, atau menggunakan adaptor DC dengan tegangan 7-12 VDC melalui jack DC (Kartiria Kartiria, Erhaneli Erhaneli, 2021).



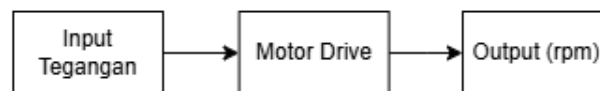
Gambar 2. 12 Arduino Mega 2560
(Sumber: Tokopedia.com)

2.9. Sistem Kontrol

Sistem kontrol adalah kombinasi beberapa komponen yang bekerja bersama untuk melaksanakan tugas tertentu. Komponen-komponen ini dapat berfungsi secara independen, namun secara keseluruhan mampu memerintah dan mengarahkan sistem secara aktif. Secara umum dalam sebuah sistem kontrol terdiri dari input berupa data atau informasi yang diterima dari luar dan diterapkan pada sistem pengendalian. Proses dalam sistem kontrol adalah pengendalian yang dilakukan pada suatu sistem yang melibatkan penerapan dan definisi keluaran serta masukan. Setelah keluaran dan masukan ditentukan, output (hasil yang diperoleh) merupakan respons yang dihasilkan oleh sistem kontrol (Elektro & Rekayasa, 2023).

2.9.1 Sistem Kontrol Terbuka (Open Loop)

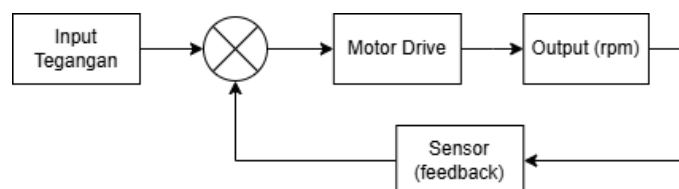
Pada sistem loop terbuka, robot bergerak semata-mata berdasarkan input yang diterima tanpa adanya umpan balik untuk mengoreksi atau mengubah input tersebut. Salah satu contoh penerapan sistem ini adalah pengendalian motor menggunakan tegangan. Dalam hal ini tegangan berperan sebagai input sedangkan kecepatan motor merupakan output. Ketika tegangan diberikan, maka motor akan bergerak dengan kecepatan tertentu. Semakin besar tegangan yang diterapkan, semakin tinggi pula kecepatan motor. Namun, jika motor diberi beban tambahan, kecepatan motor akan menurun. Penurunan ini dapat menyebabkan kesalahan (error) karena kecepatan yang diinginkan tidak tercapai akibat pengaruh beban (Nugraha, 2010).

Gambar 2. 13 Sistem *Open Loop*

(Sumber: Nugraha, 2010)

2.9.2 Sistem Kontrol Tertutup (Close Loop)

Sistem loop tertutup mengatasi kelemahan yang ada pada sistem loop terbuka. Dalam contoh sebelumnya, penurunan kecepatan akibat beban tambahan akan diukur dan dibandingkan dengan input awal. Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, input dapat disesuaikan untuk mengkompensasi perubahan yang disebabkan oleh beban. Dengan demikian, sistem loop tertutup memastikan output yang diinginkan tetap dapat dicapai meskipun terdapat gangguan atau perubahan kondisi (Nugraha, 2010).

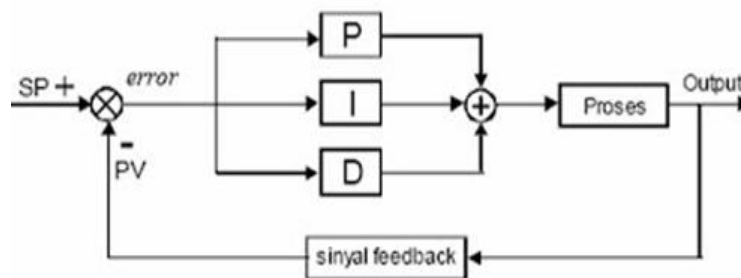
Gambar 2. 14 Sistem *Close Loop*

(Sumber: Nugraha, 2010)

2.9.3 Kontrol PID (Proportional-Integrative-Derivative)

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 (Purbowaskito & Hsu, 2017).



Gambar 2. 15 Kontrol PID

(Sumber: Purbowaskito & Hsu, 2017)

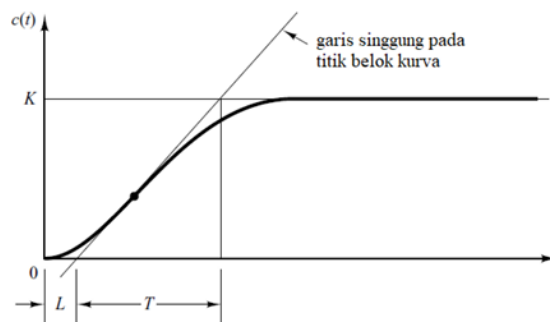
Secara matematis, sinyal kontrol PID dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.17)$$

Pada persamaan 8 $e(t)$ 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 (Maung et al., 2018).

2.9.4 Metode Tuning Ziegler-Nichols

Selama bertahun-tahun ada berbagai metode yang telah dikembangkan untuk menyetel pengendali PID, metode Ziegler-Nichols menjadi salah satu yang paling terkenal. Penyetelan pengendali dilakukan untuk menentukan nilai parameter kontrol seperti K_p , T_i , dan T_d berdasarkan karakteristik respons transien dari sistem. Ziegler dan Nichols mengusulkan dua metode penyetelan yaitu metode pertama dan kedua. Metode pertama menggunakan respons sistem terhadap masukan fungsi step dalam kondisi loop terbuka. Jika respons sistem menunjukkan kurva berbentuk S, maka metode ini dapat diterapkan (Hamid & Mansur, 2021). Pada Gambar 2.17 kurva S dicirikan oleh dua parameter utama yaitu waktu tunda (L) dan konstanta waktu (T) yang dihitung dari garis singgung pada titik belok kurva dan perpotongannya dengan sumbu waktu menjadi dasar dalam menentukan parameter kontrol.



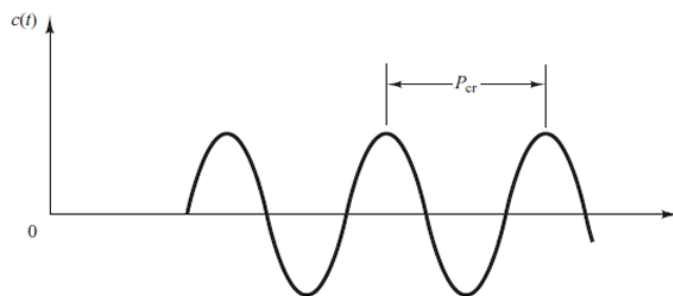
Gambar 2. 16 Respon Sistem Kurva S
(Sumber: Hamid & Mansur, 2021)

Parameter K_p , T_i , dan T_d yang diperoleh dari metode pertama Ziegler-Nichols ditentukan berdasarkan Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Aturan *Ziegler-Nichols* Metode Pertama

Pengendali	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	-	-
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	-
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Metode kedua Ziegler-Nichols, penalaan dilakukan dalam loop tertutup dengan masukan berupa fungsi step. Hanya pengendali proporsional (K_p) yang digunakan dan nilainya ditingkatkan secara bertahap hingga sistem mulai berosilasi dengan amplitudo konstan. Nilai K_p pada titik ini disebut ultimate gain (K_u), sedangkan periode osilasi yang terjadi disebut ultimate period (T_u). Kedua nilai ini digunakan untuk menghitung parameter pengendali PID sesuai dengan aturan empiris Ziegler-Nichols (Braun, 2020).

Gambar 2. 17 Periode P_{cr} dari Osilasi Keluaran Sistem

(Sumber: Hamid & Mansur, 2021)

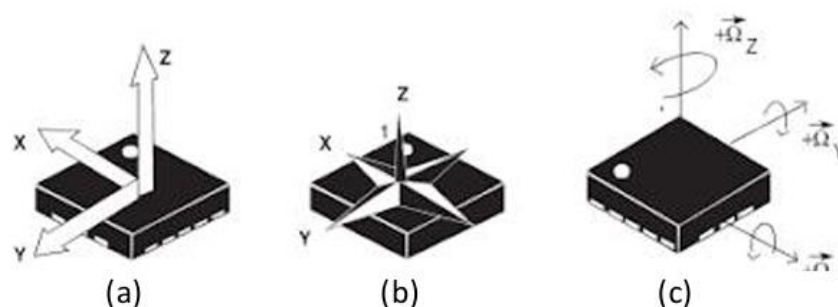
Tabel 2. 3 Aturan *Ziegler-Nichols* Metode Kedua

Pengendali	Kp	Ti	Td
P	$0.5K_{cr}$	-	-
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	-
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Metode penalaan Ziegler-Nichols dirancang untuk menghasilkan respons sistem dengan lonjakan maksimum sekitar 25% terhadap masukan fungsi step. Parameter pengendali PID seperti K_p , T_i , dan T_d ditentukan berdasarkan respons sistem yang diperoleh secara eksperimental. Penentuan ini juga dapat dilakukan dengan menggunakan nilai K_p yang menyebabkan sistem mencapai kestabilan marginal saat hanya pengendali proporsional yang diterapkan.

2.10. IMU (*Inertial Measurement Unit*) MPU9250

Inertial Measurement Unit (MPU9250) adalah perangkat atau sensor MEMS yang menggabungkan akselerometer, giroskop, dan magnetometer, yang masing-masing bekerja pada tiga sumbu utama. MPU9250 digunakan untuk memperkirakan posisi relatif, kecepatan, akselerasi, serta kemiringan suatu objek terhadap orientasi tertentu. (Mudarris & Zain, 2020).



Gambar 2. 18 Ilustrasi Sensor MPU9250 pada (a) akselerometer, (b) magnetometer, (c) giroskope
(Sumber: Vokasi, 2018)

Prinsip kerja MPU9250 (*Inertial Measurement Unit*) dengan memanfaatkan sifat inersia atau kelembaman yang secara numerik diwakili oleh massa untuk mendeteksi orientasi tertentu. MPU9250 menghitung perubahan nilai inersia secara berkelanjutan guna menentukan pergerakan dan orientasi sistem. Sensor

magnetometer berfungsi untuk membaca nilai arah dalam derajat berdasarkan medan magnet bumi, yang menunjukkan orientasi robot relatif terhadap arah mata angin. Semua nilai yang dihasilkan oleh magnetometer merupakan data mentah (*raw data*), yang memerlukan pengolahan lebih lanjut agar dapat digunakan oleh sistem kontrol. (Vokasi, 2018).



Gambar 2. 19 MPU9250

(Sumber: Mudarris & Zain, 2020)

2.11. Penelitian Terkait

Penelitian tentang Implementasi *Inverse Kinematics* dan Kontrol PID pada *Mobile robot Mecanum Wheels* dengan koreksi *Heading* ini telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya dengan penggunaan komponen dan variabel yang berbeda. Hasil dari penelitian tersebut dituliskan ke dalam jurnal yang dapat dijadikan sebagai referensi atau rujukan pada Tabel 2.4 sebagai perbandingan dalam mengidentifikasi dan menganalisis penelitian yang sedang dilakukan.

Tabel 2. 4 Jurnal Penelitian Terkait

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
1.	<i>Kinematic Analysis of</i>	Haastrup Adebayo	<i>Federal University of</i>	Penelitian ini membahas analisis

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
	<i>Omnidirectional Mecanum Wheeled Robot</i>	Ibukun, Onyero Walter Ofuzim, dan Oladejo Julius Aanuoluwa.	<i>Technology Akure dan University of Benin, Nigeria, 2023</i>	kinematika robot omnidirectional dengan roda Mecanum untuk menentukan hubungan antara kecepatan roda dan kecepatan rangka robot. Tujuannya adalah mempelajari batas kecepatan rangka dengan keterbatasan kecepatan roda individual menggunakan simulasi di V-rep.
2.	<i>Trajectory tracking control for mecanum wheel mobile robot by time-varying parameter PID controller</i>	Nguyen Hong Thai, Trinh Thi Khanh Ly, dan Le Quoc Dzung.	<i>Hanoi University of Science and Technology & Electric Power University, Vietnam, 2022</i>	Penelitian ini membahas desain kontrol PID dengan parameter waktu yang berubah-ubah untuk pergerakan pada robot roda mecanum. Error posisi maksimum < 5,5 cm pada t =

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				53 s dan error orientasi maksimum $\sim 10^\circ$ pada $t = 49$ s. Parameter PID dilakukan dengan <i>trial and error</i> tidak menggunakan metode tuning PID.
3.	Kendali Robot Beroda Otonom dengan <i>Invers Kinematics</i>	Michael Julyus Christopher Manullang, Medria Kusuma Dewi Hardhienata, dan Karlisa Priandana.	Institut Pertanian Bogor (IPB), Indonesia, 2020	Penelitian ini mengembangkan robot beroda non-holonomic yang dikendalikan dengan algoritma <i>inverse kinematics</i> . Penentuan kecepatan roda dilakukan dengan pendekatan matematis menggunakan parameter robot, seperti jari-jari roda dan jarak antar roda. Galat

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				rata-rata 0.9 meter dalam pergerakan lurus dengan menggunakan sensor GPS dan pengukuran manual. Selain itu penelitian ini hanya fokus pada pergerakan lurus tanpa adanya pergerakan lain dan galat yang dihasilkan cukup besar.
4.	Implementasi Sistem Gerak <i>Holonomic</i> pada Robot KRSBI Beroda 2017	Muliady, Gerry Arisandy	Program Studi Teknik Elektro, Universitas Kristen Maranatha, 2017	Penelitian ini membahas penerapan sistem gerak holonomic menggunakan mecanum drive pada robot KRSBI Beroda untuk meningkatkan mobilitas dan efisiensi pergerakan. Sistem ini memungkinkan

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				robot bergerak ke segala arah dengan presisi melalui perhitungan <i>inverse kinematics</i> dan <i>rotary encoder</i> . Hasil pengujian menunjukkan keunggulan <i>mecanum wheels</i> dibanding roda konvensional dalam hal kecepatan dan fleksibilitas.
5.	<i>Kinematic Modeling of a Combined System of Multiple Mecanum-Wheeled Robot with Volocity Compensation</i>	Yunwang Li, Shirong Ge, Sumei Dai, Lala Zhao, Xucong Yan, Yuwei Zheng, dan Yong Shi	<i>University of Mining and Tecnology, Xuzhou, China, 2019</i>	Penelitian ini membahas model kinematic untuk robot roda mecanum yang difokuskan pada peningkatan akurasi gerak robot dengan mmengurangi kesalahan akibat slip roda. Hasil nya menunjukan

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				efektivitas dalam mengurangi kesalahan gerak.

Sumber: Hasil Studi Literatur, 2024

Pada Tabel 2.4 merupakan penelitian terkait yang menunjukkan bahwa penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Haastrup Adebayo Ibukun, Onyero Walter Ofuzim, dan Oladejo Julius Aanuoluwa berfokus pada analisis hubungan antara kecepatan roda dan rangka robot melalui simulasi di V-rep. Sementara itu penelitian ini mengimplementasikan metode *inverse kinematics* secara langsung pada sistem pergerakan *mobile robot* roda mekanum, di mana kecepatan sudut setiap roda dihitung berdasarkan input kecepatan robot dan arah gerak robot.

Penelitian yang dilakukan oleh Nguyen Hong Thai, Trinh Thi Khanh Ly, dan Le Quoc Dzung membahas kontrol PID untuk pergerakan, namun parameter PID ditentukan melalui *trial and error* yang kurang efektif dalam menjaga kestabilan sistem. Sebagai pembeda dari penelitian sebelumnya penelitian ini menggunakan metode Ziegler-Nichols 1 untuk menentukan parameter PID, sehingga mampu menjaga kecepatan roda dapat tetap stabil. Hal ini juga membedakan penelitian ini dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Muliady, Gerry Arisandy hanya berfokus pada fleksibilitas gerak tanpa menerapkan kontrol PID untuk stabilisasi kecepatan roda.

Selain itu pada penelitian yang dilakukan oleh Michael Julyus Christopher Manullang, Medria Kusuma Dewi Hardhienata, dan Karlisa Priandana berfokus pada robot *non-holonomic* dengan pergerakan lurus yang menghasilkan galat cukup

besar karena tidak adanya koreksi *heading*. Sementara itu, pada penelitian yang dilakukan oleh Yunwang Li, Shirong Ge, Sumei Dai, Lala Zhao, Xucong Yan, Yuwei Zheng, dan Yong Shi membahas pengurangan slip roda, namun tidak menggunakan kontrol PID untuk menjaga stabilitas kecepatan dan orientasi robot.

Dalam penelitian ini kontrol PID diterapkan untuk mengoreksi *error heading* yang disebabkan oleh slip roda dengan memanfaatkan data dari sensor magnetometer MPU9250. Dengan adanya koreksi *heading* arah pergerakan robot menjadi lebih akurat dan stabil. Penelitian ini menawarkan solusi dengan menggabungkan *inverse kinematics*, kontrol PID untuk kestabilan kecepatan roda, serta koreksi *heading* menggunakan sensor magnetometer MPU9250. Pendekatan ini memberikan kontribusi yang signifikan dalam meningkatkan akurasi pergerakan *mobile robot* roda mekanum serta mengatasi masalah slip roda yang terjadi akibat adanya penyimpangan orientasi.