

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi robotika mengalami kemajuan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir, khususnya pada bidang robot mobile yang banyak dimanfaatkan pada sektor industri, logistik, pendidikan, dan penelitian. Robot mobile merupakan sistem elektromekanik yang mampu melakukan perpindahan secara otomatis maupun semiotomatis dengan memanfaatkan sistem penggerak, sensor, serta algoritma kendali untuk mencapai tujuan tertentu. Perkembangan teknologi tersebut didorong oleh meningkatnya kebutuhan terhadap sistem otomasi yang mampu bekerja secara cepat, presisi, fleksibel, dan memiliki tingkat keamanan yang tinggi dalam menghadapi berbagai kondisi lingkungan.

Di Indonesia, perkembangan teknologi robotika menunjukkan peningkatan yang cukup pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan terhadap sistem otomasi dan teknologi cerdas. Berdasarkan proyeksi pasar robotika Indonesia, nilai pasar robotika nasional diperkirakan meningkat dari sekitar USD 23,8 juta pada tahun 2025 menjadi USD 47,75 juta pada tahun 2030 dengan laju pertumbuhan tahunan (Compound Annual Growth Rate/CAGR) sebesar 14,94%. Selain itu, perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) di Indonesia juga mengalami peningkatan dengan semakin banyaknya perangkat yang saling terhubung. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan terhadap teknologi robotika, sistem kendali, dan otomasi akan terus berkembang untuk mendukung berbagai sektor kehidupan.

Dalam bidang pendidikan dan penelitian, perkembangan robotika juga mengalami peningkatan yang ditunjukkan melalui berbagai kegiatan penelitian dan kompetisi robot tingkat nasional. Salah satu indikator perkembangan tersebut adalah penyelenggaraan Kontes Robot Indonesia (KRI) yang secara rutin mendorong perguruan tinggi untuk mengembangkan teknologi robot dengan kemampuan navigasi, mobilitas, dan sistem kendali yang semakin kompleks. Perkembangan tersebut menuntut robot mobile memiliki kemampuan manuver

yang lebih baik, tingkat presisi yang tinggi, serta kemampuan beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Perkembangan teknologi robotika juga sejalan dengan pencapaian Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya SDGs 9 (*Industry, Innovation, and Infrastructure*) melalui pengembangan inovasi teknologi dan penerapan sistem otomasi pada sektor industri, serta SDGs 4 (*Quality Education*) melalui pemanfaatan robot sebagai media pembelajaran dan penelitian berbasis teknologi. Pada tingkat nasional, pengembangan robotika juga mendukung Asta Cita dalam aspek peningkatan kemandirian teknologi, penguatan inovasi, dan peningkatan daya saing bangsa melalui penguasaan bidang robotika dan sistem kendali.

Salah satu sistem penggerak yang banyak digunakan pada robot mobile adalah sistem *differential drive* karena memiliki konstruksi yang sederhana, biaya implementasi yang rendah, serta mudah dikembangkan. Namun, sistem tersebut memiliki keterbatasan dalam kemampuan manuver, terutama ketika melakukan pergerakan lateral dan perubahan arah secara cepat. Perbedaan kecepatan antara roda kanan dan kiri juga dapat menyebabkan terjadinya penyimpangan arah gerak (*heading error*) sehingga robot sulit mempertahankan orientasi sesuai dengan lintasan yang diinginkan. Penelitian yang dilakukan oleh Rijalul Haq dan Rahmawati (2017) menunjukkan bahwa robot *differential drive* tanpa sistem kendali tertutup mengalami kesalahan heading yang besar, sedangkan penerapan metode PID mampu meningkatkan kestabilan arah gerak robot dengan mengurangi nilai kesalahan secara signifikan.

Untuk mengatasi keterbatasan sistem penggerak konvensional tersebut, dikembangkan sistem penggerak *azimuth drive* atau *swerve drive*. Sistem ini menggunakan mekanisme roda yang dapat mengatur arah dan kecepatan putaran secara independen sehingga robot mampu bergerak ke berbagai arah tanpa harus mengubah orientasi bodi secara keseluruhan. Kemampuan tersebut memberikan fleksibilitas manuver yang lebih tinggi dibandingkan sistem *differential drive*, sehingga sesuai diterapkan pada robot mobile yang bekerja pada lingkungan dengan ruang gerak terbatas dan membutuhkan perubahan arah yang cepat. Penelitian Shanjaya et al. (2024) menunjukkan bahwa sistem *swerve drive* memiliki kemampuan manuver yang fleksibel dan mampu menghasilkan pergerakan yang

lebih presisi dibandingkan sistem penggerak konvensional. Hal tersebut diperkuat oleh penelitian Hasibuan dan Khusnureza (2025) yang menyatakan bahwa sistem *swerve drive* memiliki tingkat fleksibilitas dan akurasi gerak yang baik untuk aplikasi robot mobile modern.

Pada robot azimuth drive, kemampuan melakukan translasi ke berbagai arah juga diikuti dengan kemampuan melakukan gerakan rotasi terhadap sumbu vertikal (*yaw rotation*). Kemampuan rotasi menjadi salah satu aspek penting karena menentukan kecepatan perubahan orientasi robot ketika melakukan manuver. Namun, proses rotasi robot dapat mengalami ketidaksesuaian antara nilai rotasi yang diperintahkan dengan rotasi aktual akibat beberapa faktor, seperti perbedaan karakteristik motor, ketidakseimbangan distribusi beban, gesekan mekanik, serta slip pada roda. Apabila sistem rotasi tidak dikendalikan dengan baik, robot dapat mengalami *overshoot*, respon yang lambat, atau kesalahan sudut rotasi yang menyebabkan penurunan performa manuver robot.

Selain pengendalian rotasi, kestabilan *heading* juga menjadi faktor penting dalam sistem robot mobile. *Heading* merupakan orientasi arah robot terhadap suatu sumbu referensi yang digunakan sebagai acuan pergerakan. Pada kondisi ideal, robot harus mampu mempertahankan arah hadap sesuai dengan nilai referensi yang diberikan. Namun, gangguan eksternal maupun faktor internal seperti perbedaan torsi motor, perubahan permukaan lintasan, dan kesalahan mekanik dapat menyebabkan terjadinya penyimpangan orientasi robot. Penyimpangan tersebut dapat menurunkan tingkat akurasi navigasi dan menyebabkan robot tidak bergerak sesuai dengan lintasan yang telah direncanakan.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan sistem kendali tertutup (*closed-loop control*) menggunakan metode Proportional-Integral-Derivative (PID) pada sistem rotasi dan heading robot. Metode PID merupakan salah satu metode kendali yang banyak digunakan pada sistem robotika karena memiliki struktur sederhana, mudah diimplementasikan, serta mampu menghasilkan respon sistem yang cepat dan stabil. Pada sistem kendali rotasi, PID digunakan untuk mengatur kecepatan putar robot agar sesuai dengan nilai referensi yang diberikan, sedangkan pada sistem kendali heading, PID digunakan untuk mempertahankan orientasi robot berdasarkan data umpan balik dari sensor inersia seperti MPU. Penelitian Sagita

(2024) menunjukkan bahwa metode PID efektif dalam menjaga kestabilan heading robot mobile berbasis sensor inersia, sedangkan penelitian Hasibuan (2025) menunjukkan bahwa penerapan PID mampu menghasilkan respon sistem dengan waktu tanggap yang cepat dan tingkat kesalahan keadaan tunak (*steady state error*) yang rendah.

Dalam implementasinya, penerapan sistem kendali rotasi dan heading secara bersamaan pada robot azimuth drive memiliki beberapa tantangan, terutama dalam proses pengolahan data sensor dan pengendalian aktuator secara real-time. Mikrokontroler yang digunakan harus mampu melakukan pembacaan sensor, perhitungan algoritma kendali PID, proses kinematika robot, serta pengaturan kecepatan motor secara bersamaan. Penggunaan mikrokontroler ESP32-S3 menjadi salah satu solusi karena memiliki kemampuan pemrosesan yang lebih tinggi, dukungan komunikasi yang lengkap, serta mendukung implementasi sistem kendali berbasis sensor secara real-time.

Meskipun penelitian mengenai sistem azimuth drive, pemodelan kinematika, dan penerapan metode PID pada robot mobile telah banyak dilakukan, penelitian yang mengintegrasikan sistem kendali rotasi dan heading menggunakan metode PID pada robot azimuth drive berbasis ESP32-S3 masih memiliki ruang pengembangan yang luas. Pengendalian kedua parameter tersebut secara bersamaan diperlukan agar robot mampu menghasilkan gerakan rotasi yang presisi sekaligus mempertahankan orientasi arah secara stabil. Oleh karena itu, diperlukan penelitian mengenai perancangan sistem kendali rotasi dan heading menggunakan metode PID untuk meningkatkan performa manuver robot azimuth drive.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan dengan judul "Perancangan Sistem Kendali Rotasi dan Heading Menggunakan Metode PID pada Robot Azimuth Drive Berbasis ESP32-S3". Penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan sistem kendali yang dapat meningkatkan kestabilan rotasi dan mempertahankan heading robot dengan tingkat kesalahan yang rendah, respon yang cepat, serta kemampuan manuver yang lebih presisi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi robot mobile untuk kebutuhan industri, pendidikan, dan penelitian di Indonesia.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang dan penelitian terdahulu, maka dapat diidentifikasi beberapa permasalahan sebagai berikut.

1. Penelitian terdahulu mengenai robot azimuth drive masih banyak berfokus pada pemodelan kinematika, komunikasi sistem, dan pengendalian secara parsial, sehingga integrasi antara sistem kendali rotasi dan sistem kendali heading robot masih terbatas.
2. Ketidakesesuaian antara nilai rotasi yang diperintahkan dengan rotasi aktual masih sering terjadi akibat perbedaan karakteristik motor, ketidakseimbangan beban, gesekan mekanik, dan slip pada roda, sehingga diperlukan sistem kendali yang mampu meminimalkan kesalahan tersebut.
3. Sinkronisasi antara sistem kendali rotasi dan sistem kendali heading menjadi tantangan tersendiri, karena ketidaksinkronan keduanya dapat menyebabkan penyimpangan arah gerak dan menurunkan stabilitas robot.
4. Implementasi sistem kendali rotasi dan heading berbasis PID pada mikrokontroler ESP32-S3 memiliki tantangan dalam pemrosesan data secara real-time, terutama ketika harus menjalankan perhitungan kinematika, pembacaan sensor MPU, perhitungan PID, dan pengendalian aktuator secara bersamaan.
5. Penentuan parameter PID yang kurang tepat pada sistem rotasi maupun heading dapat menyebabkan respon robot menjadi lambat, muncul overshoot, osilasi, dan meningkatnya error selama pergerakan robot.
6. Belum diketahui performa sistem kendali rotasi dan heading berbasis PID yang diterapkan secara terintegrasi dalam menghasilkan pergerakan robot azimuth drive yang presisi, stabil, dan responsif

1.3 Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus dan ketercapaian penelitian, maka batasan masalah dalam penelitian ini ditetapkan sebagai berikut.

1. Penelitian difokuskan pada perancangan dan implementasi sistem kendali rotasi dan sistem kendali heading pada robot mobile berbasis azimuth drive dalam skala prototipe laboratorium.
2. Sistem kendali yang digunakan adalah metode PID (Proportional–Integral–Derivative) yang diterapkan pada pengendalian rotasi dan pengendalian

heading robot dengan umpan balik (feedback) dari sensor MPU.

3. Perangkat keras yang digunakan dibatasi pada mikrokontroler ESP32-S3, motor DC sebagai penggerak robot, dan sensor MPU sebagai sensor orientasi robot.
4. Pengujian dilakukan pada permukaan lantai yang datar, rata, dan kering di dalam ruangan dengan beban dan kecepatan robot yang disesuaikan dengan kemampuan prototipe.
5. Evaluasi sistem dibatasi pada parameter rotation error, heading error, overshoot, settling time, kestabilan pergerakan robot, dan perbandingan performa antara sistem PID dan sistem open-loop pada pengendalian rotasi dan heading.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana merancang sistem kendali rotasi dan sistem kendali heading pada robot azimuth drive berbasis ESP32-S3 agar dapat bekerja secara terintegrasi?
2. Bagaimana sinkronisasi antara sistem kendali rotasi dan sistem kendali heading dapat menghasilkan pergerakan robot yang stabil?
3. Berapa nilai rotation error dan heading error maksimum yang dapat dicapai setelah penerapan metode PID pada sistem kendali rotasi dan heading robot?
4. Bagaimana performa metode PID dibandingkan sistem open-loop ditinjau dari parameter settling time, overshoot, dan kestabilan rotasi serta heading robot?
5. Bagaimana performa keseluruhan robot azimuth drive berdasarkan kestabilan pergerakan dan respon sistem selama proses pengujian?

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem kendali rotasi dan sistem kendali heading berbasis metode PID pada robot azimuth drive menggunakan mikrokontroler ESP32-S3.

2. Mengintegrasikan sistem kendali rotasi dan sistem kendali heading sehingga robot mampu melakukan gerakan rotasi sesuai sudut target serta mempertahankan heading selama pergerakan translasi.
3. Menghasilkan sistem kendali rotasi dengan rotation error rata-rata kurang dari 3° dan settling time kurang dari 2 detik pada berbagai sudut target rotasi.
4. Menghasilkan sistem kendali heading dengan heading error rata-rata kurang dari 3° selama robot bergerak secara translasi.
5. Membandingkan performa sistem kendali berbasis PID dengan sistem open-loop berdasarkan parameter rotation error, heading error, dan settling time.

1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini dapat dibagi menjadi beberapa aspek, yaitu sebagai berikut.

1. Akademik

Menambah referensi dan kajian ilmiah mengenai integrasi sistem kendali rotasi dan sistem kendali heading berbasis PID pada robot mobile azimuth drive.

2. Praktik

Memberikan rancangan robot mobile azimuth drive yang memiliki kestabilan rotasi dan heading serta kemampuan manuver yang baik untuk mendukung kegiatan pembelajaran, penelitian terapan, dan pengembangan sistem robotika.

3. Pengembangan Robotika

Menjadi dasar pengembangan robot mobile berbasis azimuth drive yang mampu bergerak secara fleksibel dan stabil sehingga dapat diterapkan pada bidang pendidikan, kompetisi robotika, dan pengembangan teknologi otomasi di masa mendatang.