

Desain Kendali Kecepatan Mobile Robot Empat Roda Mekanum Berbasis Inverse Kinematics dan PI Anti Windup pada Kontes ABU Robocon 2023

1st Syifa Nurul Asyfia
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

syifnrl@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Arif Abdul Aziz
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

arifabdulaziz@telkomuniversity.ac.id

3rd Irham Mulkan Rodiana
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

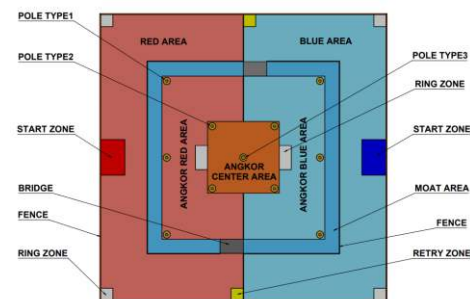
irhammulkan@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — ABU Robocon merupakan kompetisi robotik di Asia – Pasifik yang diselenggarakan oleh Asia-Pacific Broadcasting Union (ABU). Pada tahun 2023, ABU Robocon mengadakan kontes dengan tema "Casting Flower over Angkor Wat". Tantangan dari kompetisi tahun ini adalah rintangan pada lapangan permainan. Akan dirancang mobile robot dengan berbasis roda mekanum untuk dapat melewati permukaan bidang datar dan bidang miring dengan kemiringan $18,43^\circ$ yang ada pada lapangan permainan. Dilakukan metode kendali PI Anti Windup, dalam mengendalikan kecepatan robot. Hasil dari kendali PI Anti windup menunjukkan sistem memiliki overshoot 26% dan settling time yang berada pada rentang 0.6detik hingga 1.7detik. Robot memiliki tingkat keberhasilan melewati rintangan bidang miring sebesar 75%.

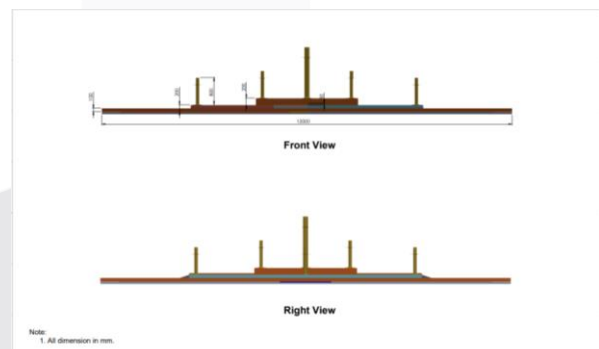
Kata kunci— ABU Robocon, roda mekanum, PI Anti Windup

I. PENDAHULUAN

Kontes ABU (Asia Pacific Broadcasting Union) Robocon adalah kontes robot tahunan antar perguruan tinggi se-Asia Pasifik. Setiap tahunnya kontes ini memiliki tema yang berbeda menyesuaikan dengan negara tuan rumah yang telah ditentukan. Kontes ABU Robocon tahun 2023 akan diadakan di Phnom Penh, Kamboja. Tema kontes robot tahun ini adalah "Casting Flower Over Angkor Wat". Setiap tim akan bertanding dengan dua buah robot, *Elephant Robot* (ER) dan *Rabbit Robot* (RR). Kedua robot ini akan melempar ring pada lapangan permainan yang terdiri dari rintangan bidang datar dua dimensi, bidang miring, dan bidang berbentuk anak tangga. Setiap tim diberikan 40 ring untuk digunakan dalam permainan dan diletakkan pada Ring Zone yang tersedia. Desain dari lapangan permainan yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1.
Lapangan Permainan ABU Robocon 2023(A)



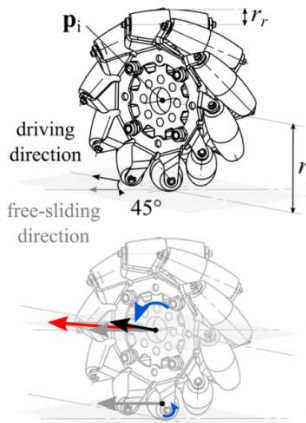
GAMBAR 2.
Desain Lapangan Permainan

Desain lapangan ABU Robocon 2023 menjadi tantangan dalam robot untuk dapat bermain. Sistem pergerakan yang akan digunakan oleh robot menentukan bagaimana performa tim dalam bermain. Sistem pergerakan yang umum digunakan untuk *mobile robot* adalah *differential drive* [1]. Penggunaan *differential drive* memiliki keterbatasan yaitu *mobile robot* tidak bisa bergerak ke segala arah tanpa merubah orientasinya. Salah satu solusi robot dalam bergerak adalah dengan menggunakan roda *omnidirectional*. Roda *omnidirectional* memungkinkan *mobile robot* untuk bergerak ke segala arah secara kontinu tanpa merubah orientasinya [2]. Dengan penggunaan inverse kinematics pada pergerakan

robot *omnidirectional*, robot dapat bergerak secara stabil dan presisi sesuai dengan kendali dari *user*.

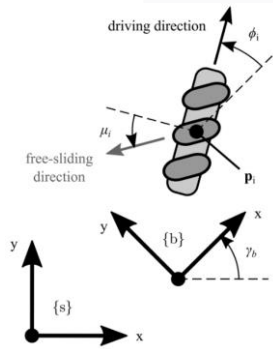
II. KAJIAN TEORI

A. Roda Mecanum



GAMBAR 3. Struktur Roda Mecanum (A)

Roda mecanum merupakan roda yang dikembangkan di perusahaan Mecanum AB, Sweden [3]. Struktur dari roda mecanum terdiri dari roda dan roller. Orientasi perputaran roller terhadap arah gerak translasi dari roda adalah 45° dan terletak pada semua area luar roda, hal ini memungkinkan roda untuk bergerak ke segala arah [4]. Pergerakan roda tidak terbatas pada arah rotasi roda karena terdapat roller yang dapat berotasi dengan bebas. Pada saat roda berputar, terdapat dua arah gerakan; arah gerak translasi roda dan arah gerak perputaran roller.



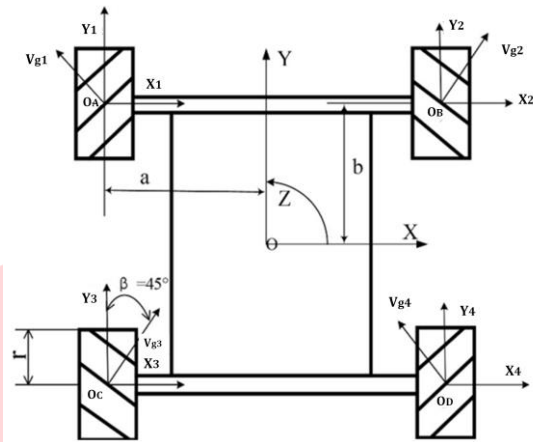
GAMBAR 4. Kinematika dari Roda Mecanum (A)

Kinematika dari roda mecanum telah diteliti dalam berbagai jurnal dan buku sebelumnya [5]. Berdasarkan referensi jurnal yang ada, kinematika roda mecanum dapat ditunjukkan pada Gambar 4. Bidang $\{s\}$ merupakan koordinat dari pergerakan robot dan bidang $\{b\}$ merupakan koordinat referensi. Bidang $\{b\}$ terletak pada titik P_i yang merupakan titik pusat dari chassis roda mecanum i sehingga membentuk $bP_i = [x_i, y_i]^T$. Ketika roda berputar maju, arah dari putaran roda membentuk sudut ϕ_i terhadap sumbu x bidang $\{b\}$ dimana bagian dari roller menyentuh permukaan. Roller dapat bergeser secara bebas pada sudut μ_i yang terbentuk dari arah pergeseran roller terhadap sumbu y bidang $\{b\}$. Besar sudut μ_i pada mecanum adalah 45°. Dari Gambar 4,

kecepatan linear pada titik bP_i didapatkan dari penjumlahan kecepatan putar roda dan kecepatan roller dalam bergeser.

B. Inverse Kinematics

Sistem pergerakan robot yang digunakan adalah dengan menggunakan empat roda mecanum. Setiap roda dihubungkan dengan motor DC gearbox.



GAMBAR 5. Analisis kinematika roda mecanum (B)

Gambar 5 menunjukkan analisis dari kinematika robot berbasis empat roda mecanum. Y dan X merupakan arah gerak robot pada bidang datar. Y_i dan X_i merupakan arah gerak translasi dari setiap roda. O_i merupakan titik tengah dari roda, dan O_i merupakan titik tengah dari roda yang terhubung dengan shaft motor DC gearbox. r merupakan radius dari roda mecanum yang digunakan. B merupakan sudut roller terhadap sumbu Y_i . a dan b merupakan jarak antara titik tengah dari kedua roda ke titik tengah robot, masing – masing pada sumbu X dan sumbu Y.

Kecepatan robot pada sumbu X, sumbu Y, dan kecepatan angular rotasi robot direpresentasikan dengan v_x, v_y , dan ω_r . Kecepatan pasif roller pada roda disimbolkan dengan v_{gi} . Untuk roda O_A , kecepatan O_A pada koordinat global dapat digambarkan pada persamaan

$$v_{OA} = \begin{bmatrix} v_{xOA} \\ v_{yOA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & b \\ 0 & 1 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

Kecepatan O_A pada koordinat lokal dapat digambarkan dengan persamaan

$$v_{OA} = \begin{bmatrix} v_{xOA} \\ v_{yOA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin \beta \\ r & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_A \\ v_{g1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & b \\ 0 & 1 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin \beta \\ r & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_A \\ v_{g1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

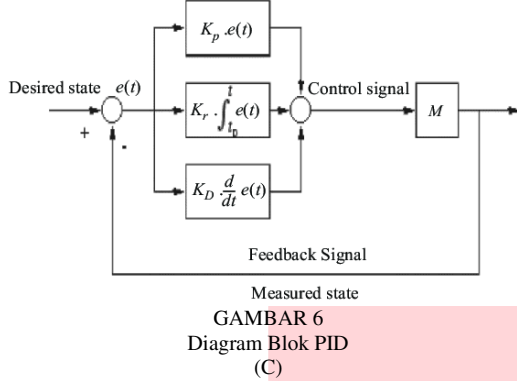
Karena kecepatan dari roller pasif, maka persamaan (3) dapat disederhanakan menjadi

$$\omega_A = \left[\frac{1}{r \tan \beta} \quad \frac{1}{r} \quad \frac{a \tan \beta + b}{r \tan \beta} \right] \quad (4)$$

Bila mengimplementasikan metode pada persamaan (1), (2), dan (3) pada roda yang lain, akan didapat persamaan inverse kinematics yaitu

$$\begin{bmatrix} \omega_A \\ \omega_B \\ \omega_C \\ \omega_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r \tan \beta} & \frac{1}{r} & -\frac{a \tan \beta + b}{r \tan \beta} \\ \frac{1}{r \tan \beta} & \frac{1}{r} & \frac{a \tan \beta + b}{r \tan \beta} \\ \frac{1}{r \tan \beta} & \frac{1}{r} & -\frac{a \tan \beta + b}{r \tan \beta} \\ \frac{1}{r \tan \beta} & \frac{1}{r} & \frac{a \tan \beta + b}{r \tan \beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

C. Kendali PI Anti Windup

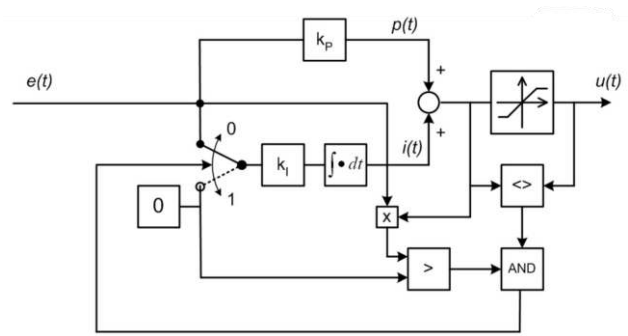


GAMBAR 6
Diagram Blok PID
(C)

Prinsip kerja PID dapat dilihat pada Gambar 6. $e(t)$ merupakan error dari nilai yang diinginkan pada sistem untuk bekerja (setpoint) dan nilai output aktual sistem. Nilai K_p , K_i dan K_d merupakan gain atau penguat yang dihasilkan oleh PID. Gain tersebut akan diubah menjadi sinyal input atau sinyal kontrol $u(t)$ yang akan diberikan ke sistem. M merupakan sistem yang berbentuk persamaan Fungsi Transfer dengan domain frekuensi. Feedback Signal merupakan output dari sistem yang akan dipantau dan dijadikan parameter apakah sistem telah mencapai nilai yang diinginkan. PID merupakan sistem dengan kendali tertutup (*closed – loop*) dan bekerja berdasarkan error dari nilai setpoint dan nilai output aktual sistem. PID bekerja berdasarkan frekuensi yang ada pada sistem dan bagaimana memanipulasi variabel terkontrol untuk mendapat output yang diinginkan.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_{t_0}^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (6)$$

Pada simulasi di dunia nyata, kendali PID memiliki keterbatasan seperti input yang terus bertambah hingga diluar kapasitas sistem akibat *gain* integral [6]. Keterbatasan ini akan membuat PID memberikan input pada sistem diluar rentang input yang dapat diterima oleh sistem atau batasan – batasan yang telah ditentukan pengguna. Pada bagian *gain* integral, akibat penambahan error yang terus terjadi, PID akan memberikan input yang nilainya akan terus bertambah. Fenomena ini dinamakan windup. Untuk mengatasi masalah ini, digunakan algoritma anti – windup pada perhitungan *gain* integral. Dua metode konvensional anti – windup adalah *clamping* dan *back – calculation* [7]. Metode *clamping* menonaktifkan *gain* dari integral ketika output sistem sudah mencapai keadaan saturasi.



GAMBAR 7
Diagram Blok PI Anti Windup
(C)

Gambar 7 menunjukkan blok diagram dari kendali PI Anti Windup dengan metode *clamping* pada K_i . Dapat dikatakan metode ini mereset nilai K_i menjadi nol ketika sistem hanya dalam kondisi nilai output mencapai keadaan saturasi. Pada Gambar 7 terdapat blok logic AND dengan parameter:

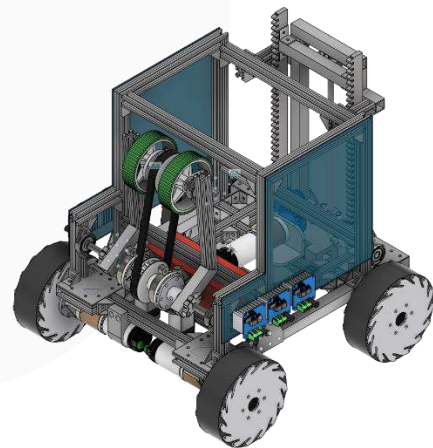
1. Output mencapai keadaan saturasi
2. Tanda nilai pada error dan output sama (positif atau negatif)

Ketika dua kondisi tersebut tercapai, maka nilai K_i akan berubah menjadi nol.

III. Perancangan Sistem *Mobile Robot*

A. Desain *Mekanika*

Desain mekanika dari *mobile robot* dibatasi pada dimensi maksimum 50cm×50cm×50cm. Bahan yang digunakan dalam membangun rangka mekanika robot adalah aluminium hollow dan aluminium extrude. Desain mekanika yang digunakan sudah terintegrasi dengan sistem mekanika robot dalam melewati bidang anak tangga pada lapangan permainan ABU Robocon 2023.



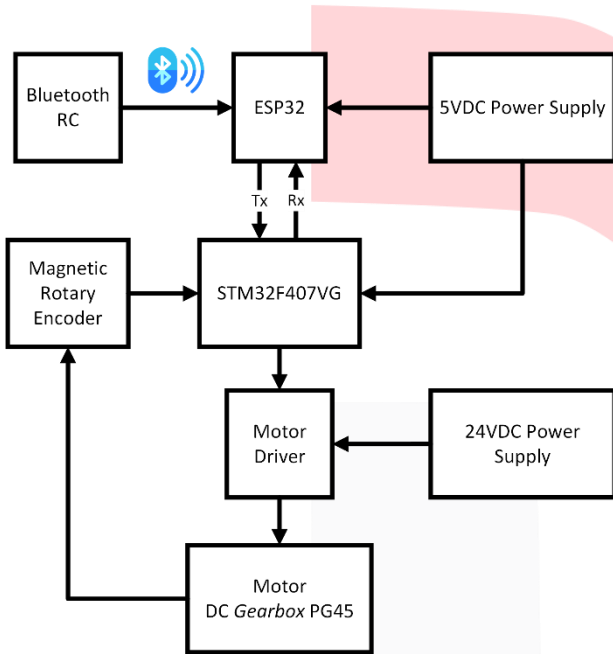
GAMBAR 7.
Desain mekanika *mobile robot*
(A)

Gambar 7 merupakan desain dari *mobile robot* yang dibangun dengan dimensi 48,5cm×46,4cm×48,9cm dan memiliki berat 20,95kg. Roda mekanum yang digunakan berbahan dasar aluminium alloy dan memiliki diameter 152mm.

B. Desain Rangkaian Elektronika

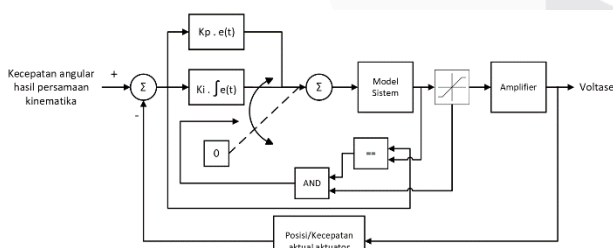
Mobile Robot yang dibangun menggunakan mikrokontroler STM32F407VGT6. Pergerakan *mobile robot* ditentukan oleh *user* dengan menggunakan *remote control*. Untuk dapat mengendalikan *mobile robot* secara *wireless*, digunakan komunikasi Bluetooth dari *user* ke *mobile robot*. Komunikasi Bluetooth *remote control* terhubung pada Bluetooth Serial ESP32. Pembacaan input pada *remote control* kemudian dikirim dari ESP32 ke STM32.

Pada desain elektronika, terdapat sensor rotary encoder pada setiap motor yang terhubung dengan roda mekanum. Rotary encoder digunakan untuk memantau kecepatan angular aktual robot. Skema elektronika ditunjukkan pada Gambar 8.



GAMBAR 8. Skematik elektronika sistem (B)

C. Kendali PI Anti Windup



GAMBAR 10. Diagram block Solusi Metode Kendali PID (C)

Setpoint yang dibutuhkan untuk kendali PI berasal dari hasil perhitungan inverse kinematics. Gain sistem dari PI kemudian akan diubah menjadi sinyal PWM dan akan diperkuat dengan amplifier untuk mendapatkan voltase yang sesuai. Voltase tersebut kemudian diberikan ke aktuator yang dituju. Kecepatan aktual aktuator akan menjadi sinyal umpan balik untuk kalkulasi PID.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

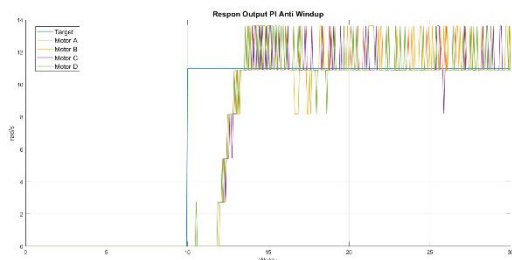
A. Pengujian Kendali PI Anti Windup Kecepatan Motor

Dilakukan empat pengujian parameter PI pada masing – masing motor yang ditunjukkan pada Tabel 1.

TABEL 1. Parameter PI (A)

No	Motor	Kp	Ki	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Steady - state error		Overshoot	
						Minimu	Maximu	Max	Min
1	A	0.0027	0.0893	0.2	0.74	-2.13	2.9	77%	0%
2		0.0039	0.0593	0.34	0.74	-2.41	2.8	51%	0%
3		0.0009	0.0299	0.75	0.60	-2.64	2.9	26%	0%
1	B	0.0020	0.0819	0.27	1.12	-2.85	3	77%	0%
2		0.0036	0.0598	0.23	0.67	-2.15	2.80	77%	0%
3		0.0015	0.0298	0.70	1.21	-2.64	2.9	26%	0%
1	C	0.0026	0.0883	0.34	1.05	-2.13	2.80	77%	0%
2		0.0027	0.0596	0.34	0.75	-2.14	2.90	74%	0%
3		0.0006	0.0298	0.90	1.22	-2.64	2.90	26%	0%
1	D	0.0049	0.1010	0.22	0.98	-2.13	3.00	77%	0%
2		0.0030	0.0602	0.37	0.72	-3.14	2.80	77%	0%
3		0.0000	0.0301	0.75	1.70	-2.64	2.85	26%	0%

Performa terbaik dengan kendali kecepatan PI Anti Windup memiliki overshoot 26% dan settling time 0.6 detik hingga 1.70 detik.

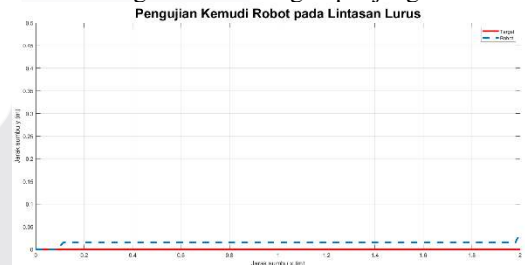


GAMBAR 11.

Respon output kecepatan angular sistem motor pada roda mekanum (A)

B. Pengujian Kemudi *Mobile Robot*

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan metode odometry. Robot akan berjalan pada lintasan yang telah ditentukan secara otomatis dengan kecepatan dibawah 1m/s. Lintasan berbentuk garis lurus dengan panjang 2meter.

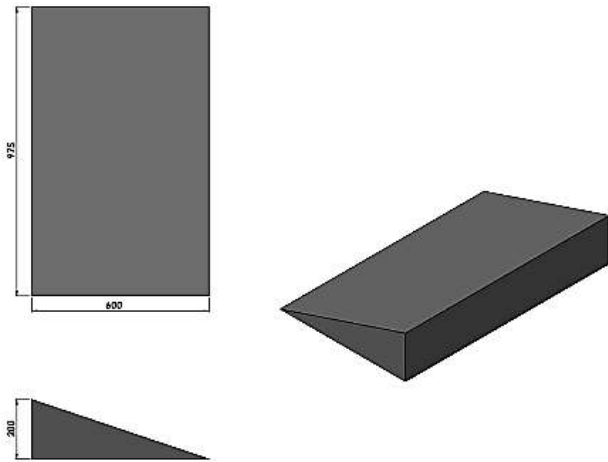


GAMBAR 12. Pengujian kemudi robot (B)

Terlihat pada Gambar 12, robot mengalami kemiringan dalam berjalan dengan penyimpangan dibawah 2cm ketika robot melakukan akselerasi. Hal ini disebabkan oleh Motor B yang memiliki waktu rise time lebih singkat dibandingkan dengan motor lain pada robot dan Motor D yang memiliki waktu settling time lebih lambat dibandingkan dengan motor lain. Pada saat sistem dalam keadaan tunak, robot dapat berjalan lurus dengan kecepatan stabil dan kemudian mengalami penyimpangan pada jalur ketika melakukan deakselerasi. Waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan lintasan adalah 1,5 detik. Dapat disimpulkan robot berjalan melalui lintasan dengan kecepatan 0,75m/s.

C. Pengujian melewati bidang miring

Untuk menguji kemampuan robot dalam melewati bidang miring, dilakukan 20 pengujian robot melewati bidang miring dengan melihat keadaan robot dan waktu yang dihabiskan robot dalam menyelesaikan rintangan bidang miring. Bidang miring yang digunakan memiliki kemiringan $18,43^\circ$ dengan panjang lintasan 60cm dan lebar lintasan 975mm.



GAMBAR 13.
Rintangan bidang miring

Hasil dari pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.

TABEL 2.
Hasil pengujian melewati bidang miring
(C)

Data	Durasi (s)	Status	Keterangan
1	8	Berhasil	-
2	180	Gagal	Roda depan slip
3	12	Berhasil	-
4	180	Gagal	Roda depan slip
5	8	Berhasil	-
6	9	Berhasil	-
7	180	Gagal	Roda belakang terjatuh ke bagian samping bidang miring
8	11	Berhasil	-
9	8	Berhasil	-
10	8	Berhasil	-
11	12	Berhasil	-
12	9	Berhasil	-
13	180	Gagal	Roda depan slip
14	9	Berhasil	-
15	12	Berhasil	-
16	13	Berhasil	-
17	11	Berhasil	-
18	9	Berhasil	-
19	180	Gagal	Roda belakang terjatuh keluar dari bidang miring
20	12	Berhasil	-

Tabel 2 menunjukkan keberhasilan robot dalam melewati rintangan bidang miring. Robot mengalami kegagalan melewati bidang miring sebanyak 5 kali. 3 dari 5 alasan robot gagal melewati bidang miring adalah karena roda pada bagian depan robot mengalami slip. Hal ini merupakan salah satu kerugian dari penggunaan roda mekanum, karena dalam cara kerjanya hanya satu roller pada roda mekanum yang bersentuhan dengan permukaan. Keberhasilan dari robot melewati bidang miring adalah 75% dengan rentang durasi berada pada 8 detik – 12 detik.

V. KESIMPULAN

Mobile robot yang dibangun menggunakan kendali PI Anti Windup untuk mengendalikan kecepatan pada setiap roda mekanum yang terdapat pada robot. Performa terbaik robot dengan kendali PI Anti Windup memiliki *overshoot* 26% dan settling time pada rentang 0,6 detik hingga 1,7 detik. Perbedaan pada rise time dan settling time setiap motor menyebabkan penyimpangan orientasi robot ketika robot melakukan akselerasi dan deakselerasi pada lintasan lurus. Penyimpangan nilai tersebut berada pada rentang 0cm – 5cm.

Keberhasilan robot dalam melewati bidang miring memiliki nilai 75% dengan durasi robot dalam menyelesaikan lintasan bidang miring adalah 8detik – 12detik. Hal ini disebabkan roda mekanum pada robot yang mengalami slip ketika robot sedang melewati lintasan bidang miring.

REFERENSI

- [1] H. A. H. R. M. A. G. Aghus Sofwan, "Development of Omni-Wheeled Mobile Robot Based-on Inverse Kinematics and Odometry," pp. 144 - 145, 2019.
- [2] D. W. Y. H. Changshun Wang, "Neural Network Based Adaptive Dynamic Surface Control for Omnidirectional Mobile Robots Tracking Control with Full-state Constraints and Input Saturation," *International Journal of Control, Automation and Systems* 19, no. 21, pp. 4068 - 4077, 2021.
- [3] D. Dong, Y. Fang dan Z. Zhou, "Omnidirectional Mobile Robot Structure Design," *RICAI 2019: Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence*, pp. 195 - 199, 2019.
- [4] T. Bräunl, *Embedded Robotics*, Berlin: Springer, 2008.
- [5] L. Tagliavini, G. Colucci, A. Botta, P. Cavallone, L. Baglieri dan G. Quaglia, "Wheeled Mobile Robots: State of the Art Overview and Kinematic Comparison Among Three Omnidirectional Locomotion Strategies," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022.
- [6] A. I. A. N. K. N. Wan Mohd Nafis Wan Lezaini, "Integration of PI-Anti-windup and Fuzzy Logic Control with External Derivative Solution for Leg's Robot Angular Joint Precision," *Proceedings of the 10th National Technical Seminar on Underwater System Technology*, no. 2018, pp. 161 - 171, 2018.
- [7] MATLAB, "Anti - Windup Control Using PID Controller Block," The Mathworks Inc., 2023. [Online]. Available: <https://au.mathworks.com/help/simulink/slref/anti-windup-control-using-a-pid-controller.html>. [Accessed 8 Agustus 2023].
- [8] Asia-Pacific Broadcasting Union(ABU), *ABU Asia-Pacific Robot Contest 2023 Phnom Penh, Cambodia Rule Book Theme and Rules Casting Flowers over Angkor Wat*, Phnom Penh: ABU Robocon 2023, 2023.

- [9] N. Zijie, L. Qiang, L. Qiang dan S. Zhijun, "Fuzzy Control Strategy for Course Correction of Omnidirectional Mobile Robot," *International Journal of Control, Automation and Systems* 17, pp. 2354 - 2364, 2019.
- [10] D. U. Rijalusalam dan 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*, vol. 2, no. 5, p. 450, 2021.
- [11] E. Savaee, A. R. Hanzaki dan Y. Anabestani, "Kinematic Analysis and Odometry-Based Navigation of an Omnidirectional Wheeled Mobile Robot on Uneven Surfaces," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 13, no. 108, p. 3, 2023.
- [12] J. S. L. Leong, K. T. K. Teo dan H. P. Yoong, "Four Wheeled Mobile Robots: A Review," *2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAET)*, 2022.

