

Diterima : 20 April 2025

Direvisi : 25 April 2025

Online : 25 April 2025

Edisi : 30 Juni 2025

## Pengembangan Robot Tematik Digital Twin Universitas Negeri Jakarta pada Motor dan Roda Sebagai Manuver

Saddam Bimo Eryanto\*, Mochammad Djaohar, Aris Sunawar

*Universitas Negeri Jakarta, Jl.R.Mangun Muka, No.11, Rawamangun, East Jakarta 13220, Indonesia*

\*Email: [saddambimo99@gmail.com](mailto:saddambimo99@gmail.com)

### Abstrak

Penelitian ini memiliki tujuan untuk perancangan dan pengujian robot dengan fokus pada peningkatan stabilitas pergerakan, penyederhanaan kontrol, serta pengurangan jumlah motor penggerak. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi perbedaan kinerja antara motor DC biasa dan motor encoder dengan kontrol PID untuk menentukan solusi yang lebih efisien dan optimal. Dengan demikian penulis membuat pengembangan pada motor dan roda robot menggunakan tiga buah roda omniwheel dengan asumsi koin tidak akan menyentuh lantai dan robot stabil tidak akan menyentuh robot lawan. Metode pengembangan yang digunakan adalah Research and Development (R&D) dengan pendekatan ADDIE meliputi analisis, desain, pengembangan, implementasi dan evaluasi pada robot. Hasil yang diperoleh pada pengujian yaitu untuk kecepatan, motor encoder unggul dengan 0,72 detik lebih cepat data dapat dilihat pada tabel 4.18. Pada pengujian kestabilan motor encoder unggul lebih stabil dengan grafik berada pada rentang 7000 – 10.000 pulse sinyal digital sedangkan motor DC berada pada 16.000 – 20.000 pulse sinyal digital data dapat dilihat pada tabel 4.9. Pada pengujian manuver motor encoder unggul 13,4 detik lebih cepat dari motor DC data dapat dilihat pada tabel 4.19. Kesimpulan berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa robot yang dikembangkan pada motor dan roda memiliki hasil yang lebih unggul dalam kestabilan pada semua pengujian.

**Kata-kunci:** mechanum wheel, motor encoder, robot

### Abstract

*This study aims to design and test robots with a focus on increasing movement stability, simplifying control, and reducing the number of drive motors. In addition, this study also evaluates the performance differences between ordinary DC motors and encoder motors with PID control to determine a more efficient and optimal solution. Thus, the author made developments on robot motors and wheels using three omniwheel wheels with the assumption that coins will not touch the floor and stable robots will not touch opposing robots. The development method used is Research and Development (R&D) with the ADDIE approach including analysis, design, development, implementation and evaluation on robots. The results obtained in the test are for speed, the encoder motor is superior with 0.72 seconds faster data can be seen in table 4.18. In the stability test, the encoder motor is superior and more stable with a graph in the range of 7000 - 10,000 digital signal pulses while the DC motor is at 16,000 - 20,000 digital signal pulses data can be seen in table 4.9. In the test of encoder motor maneuvers, it is 13.4 seconds faster than the DC motor, the data can be seen in table 4.19. The conclusion based on the test results shows that the robot developed on the motor and wheels has better results in stability in all tests.*

**Keywords:** mecanum wheel, motor encoder, robot

## Pendahuluan

Dalam era digitalisasi dan revolusi industri 4.0, integrasi antara dunia fisik dan dunia virtual menjadi salah satu fokus utama dalam pengembangan teknologi, termasuk dalam bidang robotika (Chen et al., 2025). Salah satu inovasi yang berkembang pesat adalah konsep Digital Twin, yaitu representasi digital dari sistem fisik yang memungkinkan pemantauan, pengendalian, dan simulasi secara real-time (Torchio et al., 2025). Konsep ini mulai banyak diadopsi dalam berbagai bidang, termasuk pendidikan, industri, dan kompetisi robotik. *Robot Tematik Digital Twin* merupakan wujud implementasi konsep tersebut dalam dunia pendidikan dan kompetisi robotika, yang menggabungkan dua entitas robot fisik (real) dan representasi digital untuk bekerja secara simultan dalam dua lintasan atau arena berbeda (Lee et al., 2025).

Robot Tematik Digital Twin merupakan robot yang menggabungkan dua keadaan yaitu keadaan nyata (real) dan keadaan digital (Hu et al., 2024). Pada implementasinya kedua robot ini berada pada lapangan yang berbeda dan operator, robot, koin, tim serta lainnya tidak dapat saling bertemu dan melihat secara langsung mereka dapat bertemu dan melihat satu sama lain pada layar digital tiap track perlombaan masing-masing. Sehingga walaupun pada lapangan robot satu hanya memiliki benda benda robot 1 tetapi pada keadaan digital terdapat robot dan benda benda dari robot 2 (Yang et al., 2025). Kendala yang ada setelah melakukan percobaan, latihan dan pertandingan antara lain sistem kontrol pada robot yang cukup rumit dikarenakan penggunaan roda Mecanum yang mengharuskan kombinasi 4 roda secara bersamaan sehingga cukup banyak tombol yang dipakai hanya sebagai manuver gerak serta pemrograman yang cukup banyak kode (Ceccarelli, 2024). Pergerakan robot yang kurang stabil yaitu saat bermanuver robot berjalan kurang lurus serta bergetar saat membawa koin yang mana dapat mengakibatkan penalti karena koin menyentuh lantai atau bagian bawah arena (Sovukluk et al., 2023). Penggunaan servo yang banyak pemilihan jumlah servo dikarenakan penulis menambahkan gerak pada gripper karena robot bergetar saat membawa koin sehingga diperlukan gerak tambahan untuk mengangkat sudut derajat gripper saat membawa koin sehingga koin tidak jatuh atau menyentuh lantai (Bilancia et al., 2024). Banyaknya jumlah servo naik dan turun, miring vertikal dan horizontal, buka dan tutup gripper serta angkat posisi koin membuat robot memerlukan 4 buah servo yang mana bukan hanya menambah berat pada robot namun juga penulis harus membuat desain mekanikal untuk keempat fungsi axis tersebut agar dapat berfungsi dengan baik serta menambah arus (ampere) pada robot karena menggunakan 4 buah motor DC dan 4 buah servo sehingga dalam bagian elektrikal harus dibuat tegangan tambahan dan tegangan yang berbeda karena Servo, Motor DC, Arduino dan Receiver memiliki tegangan kerja yang berbeda.

Salah satu permasalahan yang ditemukan dalam pengembangan dan uji coba robot adalah kompleksitas sistem kontrol, terutama karena penggunaan roda Mecanum (Yin et al., 2025). Roda jenis ini memungkinkan robot untuk bermanuver ke segala arah, namun memerlukan koordinasi yang sangat presisi dari keempat roda secara bersamaan (Sano et al., 2025). Hal ini mengakibatkan sistem kontrol menjadi cukup rumit, dengan banyak tombol hanya untuk mengatur manuver, serta kode pemrograman yang padat dan kompleks. Selain itu, stabilitas robot saat bermanuver juga menjadi masalah tersendiri; misalnya, ketika membawa koin dalam pertandingan, robot sering kali bergetar atau tidak berjalan lurus, yang berpotensi menimbulkan penalti karena koin dapat jatuh atau menyentuh permukaan arena (Qi et al., 2024).

Untuk mengatasi hal tersebut, penambahan servo motor pada gripper dilakukan sebagai solusi mekanis agar robot dapat menyesuaikan sudut saat membawa koin, menjaga keseimbangan, dan menghindari penalti. Namun, penggunaan empat buah servo untuk mengatur pergerakan naik-turun, membuka-menutup, serta rotasi vertikal dan horizontal, menimbulkan konsekuensi baru: bertambahnya berat robot, kebutuhan desain mekanikal yang lebih kompleks, dan meningkatnya konsumsi daya. Oleh karena itu, aspek elektrikal juga menjadi tantangan, mengingat perbedaan tegangan kerja antara motor DC, servo, Arduino, dan receiver, yang memerlukan pengaturan suplai daya tambahan dan diferensiasi arus secara tepat.

## Metode

Metode penelitian yang digunakan peneliti adalah riset dan pengembangan atau Research and Development yaitu pendekatan yang digunakan untuk mengembangkan atau meningkatkan produk, proses, atau layanan baru atau yang sudah ada. Merujuk pada kerangka kerja dan pendekatan yang digunakan untuk merancang, melaksanakan, dan mengevaluasi suatu proyek penelitian dan pengembangan. Metodeologi ini mencakup langkah-langkah sistematis yang membantu peneliti dalam menghasilkan data yang valid, reliabel, dan bermakna. Penelitian ini dimulai dari mengidentifikasi masalah, merancang penelitian lewat diagram alir penelitian, diagram alir alat, desain alat perangkat keras, desain alat perangkat lunak, pembuatan alat, pengujian, analisa dan penulisan.

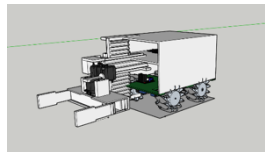
Metode penelitian research and development (RnD) dengan pendekatan ADDIE adalah yang penulis pakai karena cocok dalam langkah penelitian yang akan penulis lakukan. Berikut adalah langkah pendekatan ADDIE pada Metode penelitian research and development :

### Analysis (Analisis)

Dalam analisis pengambilan data penulis menggunakan percobaan pada robot dan angket anggota tim Kontes Robot Tematik Nasional 2023 sebagai data.

### Design (Perancangan)

Dalam desain penulis menggunakan *software sketchup* untuk desain 3 dimensi dan *Ultimaker Cura* untuk mencetak pada *3D printer*.



**Gambar 1.** Desain 3D Robot

### Development (Pengembangan)

Pengembangan dilakukan dengan mengolah data yang sudah ada dan membuat data baru yang akan dikembangkan lalu pembuatan desain sebagai implementasi data yang akan dikembangkan. Pengembangan dilakukan setelah rancangan desain selesai dibuat.

### Implementation (Implementasi)

Implementasi dilakukan saat robot sudah selesai dibuat serta sudah menggunakan desain dan pengembangan pada rancangan baru.

### Evaluation (Evaluasi)

Evaluasi adalah tahap akhir penulis dalam penelitian ini yang mana hasil akhir ini akan mendapatkan jawaban serta kesimpulan dari seluruh rangkaian penelitian yang ada dan juga dapat dijadikan evaluasi penambah data untuk pengujian ulang apabila hasil yang dicapai masih kurang. Uji coba dan evaluasi awal pada prototipe robot untuk mengevaluasi kinerja dan fungsionalitasnya serta melakukan perbaikan dan pengoptimalan berdasarkan hasil uji coba, lakukan perbaikan dan pengoptimalan terhadap desain, program, atau algoritma robot.

## Teknik Pengumpulan Data

Paragraf ini membahas tahap implementasi dalam model ADDIE, yang melibatkan proses penerapan robot yang telah dikembangkan ke dalam situasi nyata. Tahap ini bertujuan untuk menguji efektivitas robot dalam mendukung pencapaian tujuan pengembangan yang lebih baik dari angket atau percobaan dengan robot sebelumnya

## Hasil dan Pembahasan

Tabel 1. Pengujian Kecepatan Motor DC

<b>Variable Kestabilan</b>					
<b>Tabel Pengujian Motor Robot Awal</b>					
<b>Percobaan Ke</b>	<b>Posisi</b>	<b>Jenis Motor</b>	<b>Kecepatan Pada Program</b>	<b>RPM pada pengujian</b>	<b>Voltase</b>
1	Depan kanan	DC	85 pwm	191	4,75 V
	Depan kiri	DC	85 pwm	172	4,34 V
	Belakang kanan	DC	85 pwm	189	4,71 V
	Belakang kiri	DC	85 pwm	182	4,62 V
2	Depan kanan	DC	85 pwm	187	4,71 V
	Depan kiri	DC	85 pwm	168	4,30 V
	Belakang kanan	DC	85 pwm	181	4,67 V
	Belakang kiri	DC	85 pwm	185	4,65 V
3	Depan kanan	DC	85 pwm	187	4,70 V
	Depan kiri	DC	85 pwm	170	4,32 V
	Belakang kanan	DC	85 pwm	184	4,69 V
	Belakang kiri	DC	85 pwm	185	4,64 V
4	Depan kanan	DC	85 pwm	190	4,74 V
	Depan kiri	DC	85 pwm	175	4,37 V
	Belakang kanan	DC	85 pwm	185	4,69 V
	Belakang kiri	DC	85 pwm	184	4,63 V
5	Depan kanan	DC	85 pwm	190	4,75 V
	Depan kiri	DC	85 pwm	168	4,31 V
	Belakang kanan	DC	85 pwm	182	4,67 V

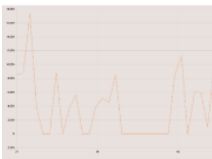
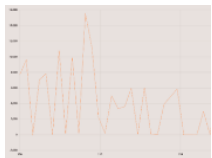

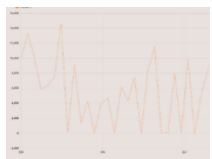

Belakang kiri	DC	85 pwm	185	4,65 V
---------------	----	--------	-----	--------

**Tabel 2.** Pengujian Kecepatan Motor Encoder


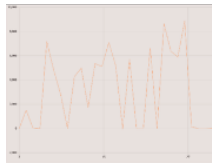
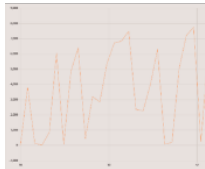

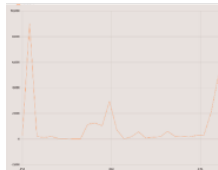
<b>Variable Kestabilan</b>						
<b>Tabel Pengujian Motor Robot Pengembangan Krtmi Motor Encoder</b>						
<b>Percobaan Ke</b>	<b>Posisi</b>	<b>Jenis Motor</b>	<b>Kecepatan Pada Program</b>	<b>RPM pada pengujian</b>	<b>Voltase Awal</b>	<b>Voltase Stabil</b>
1	Depan kanan	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	150	6,3 V	4,4 V
	Depan kiri	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	148	6,6 V	4,32 V
	Belakang	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	153	6,9 V	4,54 V
2	Depan kanan	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	149	6,6 V	4,38 V
	Depan kiri	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	146	6,5 V	4,31 V
	Belakang	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	150	6,6 V	4,51 V
3	Depan kanan	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	149	6,5 V	4,39 V
	Depan kiri	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	149	6,5 V	4,34 V
	Belakang	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	150	6,5 V	4,49 V
4	Depan kanan	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	146	6,35 V	4,33 V
	Depan kiri	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	149	6,5 V	4,34 V

5	Belakang	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	151	6,35 V	4,52 V
	Depan kanan	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	151	6,4 V	4,4 V
	Depan kiri	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	149	6,6 V	4,33 V
	Belakang	Encoder	Ki 0.4 ,Kd 0.4, Kp 0.4 Setpoint 32	151	6,4 V	4,50 V

**Tabel 3.** Pengujian Kestabilan Getaran Motor Robot Motor DC

<b>Variable Kestabilan</b>		
<b>Pengujian Getaran Robot Awal</b>		
<b>Pengujian Ke</b>	<b>Robot</b>	<b>Grafik Sensor Getaran</b>
1	KRTMI MOTOR DC	
2	KRTMI MOTOR DC	
3	KRTMI MOTOR DC	
4	KRTMI MOTOR DC	
5	KRTMI MOTOR DC	

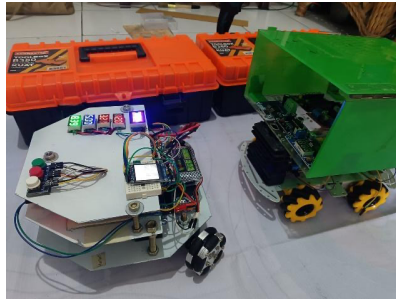
**Tabel 4.** Pengujian Kestabilan Getaran Motor Robot Dengan Motor Encoder

<b>Variable Kestabilan</b>		
<b>Pengujian Getaran Robot Pengembangan KRTMI Motor Encoder</b>		
<b>Pengujian Ke</b>	<b>Robot</b>	<b>Grafik Sensor Getaran</b>
1	Pengembangan KRTMI Motor Encoder	
2	Pengembangan KRTMI Motor Encoder	
3	Pengembangan KRTMI Motor Encoder	
4	Pengembangan KRTMI Motor Encoder	
5	Pengembangan KRTMI Motor Encoder	

Penelitian ini dilakukan untuk pengembangan robot KRTMI yang sebelumnya atau yang menggunakan motor dc dan yang terbaru atau yang menggunakan motor encoder.

### Hasil Prototipe

Robot memiliki ketentuan dimensi yang sama dengan robot sebelumnya dan juga berat yang sama pada pengujian.



**Gambar 2.** Robot Awal dan Robot Terbaru

Hasil pengembangan robot tematik digital twin Universitas Negeri Jakarta menunjukkan bahwa pemilihan komponen motor dan roda memiliki peran krusial dalam menentukan kualitas manuver dan stabilitas pergerakan robot secara keseluruhan. Pengujian yang dilakukan menunjukkan adanya pengaruh signifikan dari perbedaan spesifikasi motor, khususnya antara motor DC biasa dengan motor encoder, terhadap kecepatan, kestabilan, dan efisiensi manuver robot. Hal ini menjadi temuan penting karena manuver merupakan inti dari keberhasilan navigasi robot, baik dalam lingkungan nyata maupun dalam simulasi digital twin. Penggunaan motor encoder terbukti memberikan hasil yang lebih optimal dibandingkan motor DC konvensional. Pada lintasan lurus sejauh 150 cm, robot yang menggunakan motor encoder mampu menempuh jarak tersebut dengan waktu rata-rata 4,88 detik, lebih cepat dibandingkan dengan robot bermotor DC yang mencatat waktu 5,6 detik. Keunggulan ini menunjukkan bahwa motor encoder mampu mengatur kecepatan dan arah dengan lebih presisi, sehingga cocok digunakan dalam sistem kendali yang membutuhkan kecepatan respons tinggi. Kecepatan yang stabil juga sangat penting dalam konteks kompetisi robotik digital twin, di mana waktu dan efisiensi manuver menjadi tolok ukur utama keberhasilan.

Selain aspek kecepatan, kestabilan gerak juga menjadi indikator utama dalam pembahasan ini. Motor encoder menunjukkan grafik sinyal pulse digital yang lebih rendah dan stabil Sensor-less Drive of Ultra-Low Inductance SPMSM with DC-Link Single Current Sensor, yaitu antara 7000 hingga 10.000, dibandingkan dengan motor DC yang berada pada rentang 16.000 hingga 20.000 (Huang et al., 2024). Grafik yang lebih stabil menunjukkan bahwa perputaran motor encoder lebih konsisten dan minim fluktuasi, yang berdampak pada minimnya getaran saat robot bergerak, khususnya saat membawa objek seperti koin dalam simulasi tugas. Stabilitas ini sangat berkontribusi dalam menghindari penalti yang kerap terjadi akibat jatuhnya koin atau ketidaktepatan posisi. Pada uji manuver di lintasan arena yang lebih kompleks, robot dengan motor encoder juga mencatat waktu tempuh rata-rata yang lebih cepat, yakni 27,8 detik, dibandingkan dengan robot bermotor DC yang memerlukan waktu 41,2 detik. Selisih waktu ini menandakan efisiensi sistem kontrol yang didukung oleh kemampuan encoder dalam menjaga arah dan kecepatan sesuai setpoint. Meskipun kedua robot tidak menyentuh pembatas arena, efisiensi waktu menjadi keunggulan strategis dalam kompetisi berbasis waktu.

Hasil pengujian fungsi robot dalam tugas peletakan koin memperkuat keunggulan motor encoder. Robot dengan motor encoder mampu meletakkan rata-rata 3 koin secara tepat tanpa mengalami penalti, sedangkan robot dengan motor DC hanya berhasil meletakkan rata-rata 2 koin dan mengalami penalti akibat koin jatuh sebesar 0,6. Efektivitas ini mencerminkan stabilitas kontrol gripper serta kemampuan sistem dalam menjaga keseimbangan beban selama bergerak. Dengan waktu operasional yang sama, yaitu 60 detik, robot dengan motor encoder terbukti lebih unggul dalam aspek akurasi dan efektivitas kerja. Tak hanya dari sisi mekanik, pembahasan ini juga menyoroti pentingnya pengaturan parameter PID (Proportional, Integral, Derivative) dalam mendukung kestabilan sistem kontrol (Won & Iwase, 2024). Hasil pengujian awal menunjukkan bahwa kombinasi parameter  $K_p = 0,1$ ,  $K_i = 0,1$ , dan  $K_d = 0,2$  masih menghasilkan grafik respons sistem yang landai, yang mengindikasikan bahwa tuning lebih lanjut diperlukan untuk mencapai kestabilan optimal. Ini menunjukkan bahwa performa robot tidak hanya ditentukan oleh hardware, tetapi juga oleh pengaturan software yang tepat.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menegaskan bahwa keberhasilan pengembangan robot tematik digital twin tidak bisa dilepaskan dari sinergi antara pemilihan motor yang sesuai, perancangan mekanikal yang matang, dan sistem kendali yang terintegrasi baik secara elektrik maupun digital.

Motor encoder terbukti menjadi solusi unggul untuk kebutuhan manuver yang cepat, stabil, dan presisi dalam konteks pembelajaran maupun kompetisi berbasis teknologi digital twin. Temuan ini dapat menjadi dasar bagi pengembangan lebih lanjut, baik untuk peningkatan performa robot maupun untuk penerapannya dalam skenario pendidikan robotika berbasis simulasi dan kendali jarak jauh.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengembangan serta serangkaian pengujian yang telah dilakukan terhadap robot KRTMI digital twin 2023 yang dikembangkan, dapat disimpulkan bahwa perbedaan spesifikasi motor memberikan pengaruh signifikan terhadap pergerakan robot, yang berdampak pada perbedaan kecepatan dan kestabilan sehingga turut memengaruhi performa keseluruhan robot; hal ini dibuktikan melalui pengujian kecepatan pada lintasan lurus sejauh 150 cm, di mana robot dengan motor encoder menunjukkan waktu tempuh rata-rata lebih cepat (4,88 detik) dibandingkan robot dengan motor DC (5,6 detik), yang mengindikasikan bahwa penggunaan motor encoder mampu meningkatkan kecepatan gerak robot secara lebih konsisten dan efisien. Pada pengujian kestabilan, motor encoder juga menunjukkan performa lebih baik dengan grafik sinyal pulse digital berada dalam rentang 7000–10.000, sedangkan motor DC memiliki rentang yang lebih tinggi dan kurang stabil, yakni 16.000–20.000. Dalam pengujian manuver, robot dengan motor encoder mencatat waktu tempuh rata-rata lintasan arena sebesar 27,8 detik, lebih cepat dibandingkan robot dengan motor DC yang memerlukan waktu 41,2 detik, dan meskipun keduanya tidak menyentuh pembatas lintasan, perbedaan waktu tempuh menunjukkan bahwa motor encoder memberikan efisiensi manuver yang lebih tinggi tanpa mengorbankan akurasi gerak. Hasil uji fungsi juga memperkuat keunggulan tersebut, di mana robot dengan motor encoder berhasil meletakkan rata-rata 3 koin tanpa penalti, sementara robot dengan motor DC hanya berhasil meletakkan rata-rata 2 koin dan mengalami penalti rata-rata sebesar 0,6 koin jatuh, dengan durasi waktu pengujian yang sama, yaitu 60 detik, yang menunjukkan bahwa motor encoder mampu meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam tugas peletakan koin. Selain itu, hasil pengujian terhadap sistem kontrol menunjukkan bahwa nilai parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  sangat memengaruhi stabilitas dan akurasi sistem dalam mencapai setpoint, di mana pada percobaan awal dengan nilai  $K_d = 0,2$ ,  $K_i = 0,1$ , dan  $K_p = 0,1$ , grafik respon sistem masih menunjukkan pola yang landai, sehingga diperlukan penyesuaian lebih lanjut terhadap parameter PID untuk mengoptimalkan respons sistem secara keseluruhan.

## References

- Bilancia, P., Locatelli, A., Tutarini, A., Mucciarini, M., Iori, M., & Pellicciari, M. (2024). Online motion accuracy compensation of industrial servomechanisms using machine learning approaches. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *91*, 102838–102838. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102838>
- Ceccarelli, M. (2024). Challenges in service robot devices for elderly motion assistance. *Robotica*, *42*(12), 4186–4199. <https://doi.org/10.1017/s0263574724001528>
- Chen, W., Choi, T.-M., Dolgui, A., Ivanov, D., & Pesch, E. (2025). Digital manufacturing and supply chain: creating benefits through operations research and artificial intelligence. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-06450-2>
- Hu, B., Cheng, D., Fu, Y., Song, X., Bi, Y., Zhao, Q., & Tan, J. (2024). An equipment-level digital twin method for industrial robots for machining. *International Journal of Production Research*, *1*–19. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2446953>
- Huang, Y.-H., Zhao, Q.-Y., Hao, H., Liu, N.-T., Liu, Z., Deng, J., Yang, F., Ru, S.-Y., Tu, X.-C., Zhang, L.-B., Jia, X.-Q., Chen, J., Kang, L., & Wu, P.-H. (2024). Monolithic integrated superconducting nanowire digital encoder. *Applied Physics Letters*, *124*(19). <https://doi.org/10.1063/5.0202827>

- Hwang, J.-S., Chae, M.-S., & Choi, H.-G. (2024). Sensor-Less Drive of Ultra-Low Inductance SPMSM With DC-Link Single Current Sensor. *IEEE Access*, 12, 78959–78968. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3405401>
- Lee, Y., Baek, M.-S., & Yoon, K. (2025). Digital Entity Management Methodology for Digital Twin Implementation: Concept, Definition, and Examples. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 1–11. <https://doi.org/10.1109/tbc.2024.3517138>
- Lu, Z., Luo, Y., Penčić, M., Oros, D., Čavić, M., Đukić, V., Krasnik, R., Mikov, A., & Orošnjak, M. (2024). Development of a Virtual Robot Rehabilitation Training System for Children with Cerebral Palsy: An Observational Study. *Sensors*, 24(24), 8138–8138. <https://doi.org/10.3390/s24248138>
- Qi, H., Li, X., Ding, L., Cheng, Q., Gao, H., Terze, Z., & Deng, Z. (2024). Enhancing Maneuverability in a Variable Wheelbase Wheeled Mobile Robot Through Dynamic Steering Curvature Control. *Journal of Field Robotics*. <https://doi.org/10.1002/rob.22437>
- Sano, S., Tadakuma, K., Kayawake, R., Watanabe, M., Abe, K., Kemmotsu, Y., & Tadokoro, S. (2025). Poloidal Drive: Direct-Drive Transmission Mechanism for Active Omni-Wheels with Spoke Interference Avoidance. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/lra.2024.3524885>
- Sovukluk, S., Engelsberger, J., & Ott, C. (2023). Highly Maneuverable Humanoid Running via 3D SLIP+Foot Dynamics. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(2), 1131–1138. <https://doi.org/10.1109/lra.2023.3342668>
- Torchio, R., Conte, F., Scarpa, M., Filippini, M., Pase, F., Toso, F., Nasab, P. S., Marson, E., Viroli, A., Posa, P., & Zangoli, M. (2025). Digital Twins in Power Electronics: A Comprehensive Approach to Enhance Virtual Thermal Sensing. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1–11. <https://doi.org/10.1109/tpel.2025.3531695>
- Won, J., & Iwase, M. (2024). Highly Responsive Robotic Prosthetic Hand Control Considering Electrodynamic Delay. *Sensors*, 25(1), 113. <https://doi.org/10.3390/s25010113>
- Yang, L., Constantinescu, D., & Wu, L. (2025). Passivity-Based Connectivity Maintenance of Teleoperated Multi-Robots Under DoS Attacks. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/tase.2024.3524358>
- Yin, R., Wu, Z., & Feng, L. (2025). Pulse width modulation control of Mecanum-wheeled mobile robot with random noise. *IEEE Access*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3530405>