

PERBANDINGAN KONTROL LOGIKA FUZZY DAN PID PADA ROBOT E-PUCK WALL FOLLOWING MENGGUNAKAN WEBOTS

Yusril Ali Riza Pratama¹, Bayu Wahyu Saputra², Tiara Afifah Nazmudin³, Ardy Seto Priambodo⁴

Departemen Teknik Elektro dan Elektronika, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Yogyakarta Kulonprogo, Mandung St. 55651, Indonesia

Received: 2 Januari 2025
Accepted: 14 Januari 2025
Published: 20 Januari 2025

Keywords:

Kontrol Logika Fuzzy,
Kontrol PID, Robot, E-Puck,
Mengikuti Dinding, Webots

Correspondent Email:

yusrilali.2022@student.uny.a
c.id

Abstrak. Penelitian ini mengeksplorasi penerapan Fuzzy Logic Control (FLC) pada robot E-Puck untuk tugas mengikuti dinding atau wall following menggunakan simulasi Webots. serta membandingkan efisiensi antara sistem FLC dan Proportional-Integral-Derivative (PID). Robot E-Puck dilengkapi dengan sensor proximity inframerah untuk mendeteksi dan mempertahankan jarak yang stabil dari dinding. Logika Fuzzy dipilih karena kemampuannya dalam menangani ketidakpastian dan membuat keputusan adaptif dalam lingkungan yang dinamis. Proses kontrol FLC meliputi fuzzifikasi data sensor, inferensi menggunakan aturan IF-THEN, dan defuzzifikasi untuk menghasilkan sinyal kontrol crisp yang mengatur motor robot. Hasil pengujian menunjukkan bahwa FLC menghasilkan gerakan yang lebih stabil dibandingkan dengan kontrol PID, dengan nilai error rata-rata sebesar -3.32 untuk FLC dibandingkan dengan -13.39 untuk PID. Namun kontrol FLC memiliki nilai waktu puncak 3.71 detik sedangkan PID memiliki nilai waktu puncak 2.24 yang berarti kontrol PID lebih responsif dibandingkan dengan kontrol FLC. Secara keseluruhan, FLC lebih efektif dalam mengontrol gerakan robot dalam tugas wall following, sedangkan kontrol PID lebih efektif dalam mendapatkan respons yang lebih cepat.

Abstract. This research explores the application of Fuzzy Logic Control (FLC) to the E-Puck robot for wall following tasks using Webots simulation and compares the efficiency between FLC and Proportional-Integral-Derivative (PID) systems. The E-Puck robot is equipped with an infrared proximity sensor to detect and maintain a stable distance from the wall. Fuzzy logic was chosen for its ability to handle uncertainty and make adaptive decisions in a dynamic environment. The FLC control process includes fuzzification of sensor data, inference using IF-THEN rules, and defuzzification to generate crisp control signals that govern the robot motors. Test results show that FLC produces more stable motion compared to PID control, with an average error value of -3.32 for FLC compared to -13.39 for PID. However, the FLC control has a peak time value of 3.71 seconds while the PID has a peak time value of 2.24 which means that the PID control is more responsive compared to the FLC control. Overall, FLC is more effective in controlling the robot motion in wall following tasks, while PID control is more effective in getting faster response.

1. PENDAHULUAN

Robot beroda merupakan perangkat mekanis yang memiliki kemampuan untuk bergerak di lingkungan dengan tingkat kemandirian tertentu. Navigasi otonom pada robot ini bergantung pada sensor eksternal yang mengumpulkan informasi lingkungan melalui gambar visual atau pengukuran jarak dan kedekatan. Sensor yang paling umum digunakan adalah sensor jarak, seperti ultrasonik, laser, dan infra merah, yang dapat mendeteksi hambatan dan mengukur jarak ke dinding di sekitar jalur robot. Saat robot otonom canggih bergerak di dalam ruangan (baik di bangunan industri maupun sipil), mereka perlu memiliki kemampuan untuk berpindah melalui koridor, mengikuti dinding, berbelok di sudut, dan memasuki area terbuka di dalam ruangan [1]. Robot *Mobile Wall Follower* memiliki kemampuan untuk bergerak dengan stabil mengikuti jalur dinding dan mempertahankan jarak tetap dari dinding. Salah satu teknologi yang dapat menggabungkan kemampuan ini adalah logika fuzzy. Penggunaan logika fuzzy telah berkembang pesat dan diterapkan dalam berbagai bidang, mulai dari analisis informasi hingga proses industri, peralatan, dan elektronik lainnya. Dalam beberapa tahun terakhir, logika fuzzy telah menjadi dasar untuk desain robot bergerak. Teknologi ini tidak hanya memiliki nilai ekonomi, tetapi juga berkembang seiring dengan peningkatan kemampuan robot. Oleh karena itu, ini akan merancang dan mengimplementasikan kontrol logika fuzzy pada robot mobile wall follower untuk membuat keputusan berdasarkan berbagai masukan yang ada. Saat ini, input yang digunakan adalah kemampuan untuk bergerak sepanjang dinding dengan jarak yang stabil dan menjaga stabilitas saat bergerak [2].

Metode kontrol sistem yang telah berkembang dan digunakan di industri sangat beragam, salah satunya adalah kontrol konvensional PID (Proportional Integral Derivative) yaitu salah satu metode pengendalian yang sering digunakan. Pengontrol PID terdiri dari tiga komponen utama: komponen Proporsional (P), komponen Integral (I), dan komponen Derivatif (D) [9]. Fungsi utama pengontrol PID adalah untuk menghasilkan tindakan kontrol berdasarkan perbandingan antara kesalahan atau error, yang merupakan selisih antara variabel proses dan set point yang diinginkan. Selain pengontrol PID,

teknik pengendalian lainnya adalah menggunakan logika fuzzy. Pengendalian dengan logika fuzzy cenderung lebih sederhana karena meniru cara berpikir manusia dengan menginterpretasikan data dan mencari solusi yang optimal [10]. Logika fuzzy, juga dikenal sebagai logika samar, beroperasi dengan konsep kebenaran sebagian, yang berbeda dengan logika klasik yang mengasumsikan segala hal dapat diekspresikan dalam istilah biner (0 atau 1). Dalam logika fuzzy, nilai keanggotaan dapat berada dalam rentang antara 0 dan 1. Berbagai teori dalam pengembangan logika fuzzy menunjukkan bahwa secara prinsip, logika fuzzy dapat digunakan untuk memodelkan beragam sistem [14]. Beberapa penelitian juga berusaha mencari metode pengendalian yang paling efektif dan efisien [5].

Namun demikian, diperlukan suatu penelitian yang dapat memperlihatkan perbandingan hasil pengendalian antara kontrol PID dan logika fuzzy, terutama dalam tugas wall following. Penelitian yang diusulkan ini akan membahas tingkat akurasi dan presisi pada sistem wall following menggunakan algoritma Fuzzy Logic Controller (FLC) dibandingkan dengan algoritma PID (Proportional Integral Derivative) dengan menggunakan simulasi Webots. Data yang diperoleh dari penelitian ini akan dibandingkan dengan data dari sistem wall following yang sebelumnya telah menggunakan algoritma PID. Parameter yang akan dibandingkan antara PID dan FLC meliputi kecepatan sudut dan kecepatan linear [6]. Pada sistem kendali modern, logika fuzzy dianggap mampu mengatasi keterbatasan yang dimiliki oleh pengontrol PID. Algoritma ini bekerja dengan cara memetakan nilai-nilai tegas menjadi derajat keanggotaan, yang kemudian di-fuzzifikasi dan diproses menggunakan sistem inferensi fuzzy yang terdiri dari berbagai aturan. Dengan tetap mempertahankan kelebihan PID dan mengatasi kekurangannya, penelitian ini melakukan kajian eksperimental melalui kombinasi kendali modern-klasik Fuzzy-PID untuk navigasi robot e-puck yang berfungsi sebagai wall follower. Tujuannya adalah untuk menentukan sistem mana yang lebih efisien dalam mengarahkan robot ke dinding dengan tepat dan responsif [7].

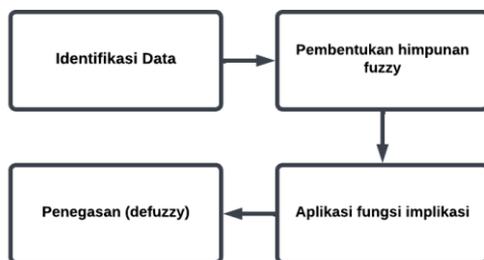
Penelitian ini terdiri dari tiga tahap: pertama, merancang robot e-puck sebagai wall follower dengan masukan dari sensor

inframerah; kedua, melakukan pengujian menggunakan kendali Fuzzy logic controller; dan ketiga, menguji kendali Fuzzy-PID. serta saat Defuzzifikasi dalam penelitian ini dibantu menggunakan software Jupyterlab. Jupyterlab dapat digunakan dalam pembuatan software berbasis web dengan menggunakan bahasa pemrograman apapun, kelebihan inilah yang menjadi kemudahan bagi programmer untuk membuat inovasi baru dalam aplikasi yang bermanfaat [15].

2. METODE PENELITIAN

Proses pengerjaan dalam penelitian ini beberapa tahap – tahap yang mencakup:

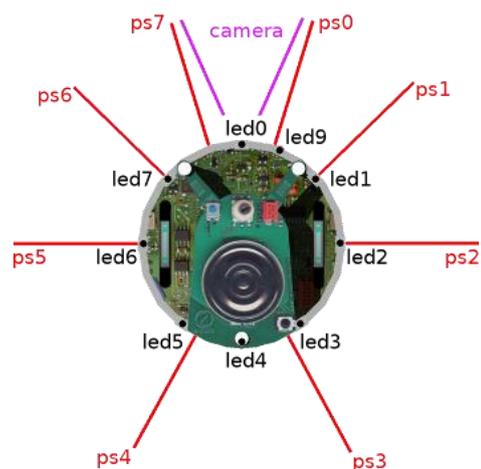
1. Identifikasi Data
Identifikasi data dilakukan dengan menentukan variabel-variabel yang diperlukan untuk melakukan perhitungan dan analisis masalah: error, delta_error, control
2. Pembentukan Himpunan Fuzzy
Dalam metode Mamdani, baik variabel input maupun variabel output dibagi menjadi satu atau lebih himpunan fuzzy.
3. Aplikasi fungsi implikasi
Pada metode Mamdani, fungsi implikasi yang digunakan untuk setiap aturan adalah fungsi minimum.
4. Penegasan (defuzzy).
Proses defuzzifikasi dilakukan dengan bantuan software Jupyter-Lab menggunakan fasilitas yang disediakan dalam library fuzzy.



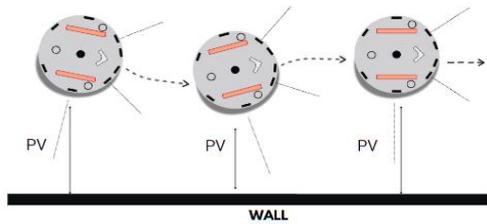
Gambar 1. Tahap Penelitian

2.1. Perancangan Mobil Robot

Robot E-puck adalah robot mobile yang sederhana, fleksibel, dan ramah pengguna. Dengan diameter 7,4 cm dan tinggi 4,5 cm serta berat 150 g, robot ini dilengkapi dengan perangkat keras berupa mikrokontroler dan beragam sensor serta aktuator, termasuk sensor proximity infra merah (IR), accelerometer 3D, kamera RGB, tiga mikrofon, dua motor stepper, delapan LED, dan speaker [4]. Badan utama adalah komponen inti dari struktur mekanis dan berfungsi sebagai tempat penyimpanan baterai. Pengguna dapat dengan mudah mengeluarkan baterai dari bagian bawah e-puck. Dua motor dipasang di sisi badan utama dengan menggunakan sekrup, dan roda langsung terhubung ke poros motor [8]. Terdapat delapan sensor proximity, yaitu PS0 hingga PS7, yang ditempatkan di sekeliling robot dalam arah yang berbeda. Sensor-sensor ini berfungsi untuk mendeteksi keberadaan rintangan dengan mengukur jumlah cahaya yang dipantulkan [11]. Rentang nilai yang dihasilkan oleh sensor-sensor ini adalah dari 0 hingga 2000, dan keberadaan rintangan diindikasikan jika nilai yang dikembalikan oleh satu atau lebih sensor melebihi 1000. Dalam penelitian ini, fokus utamanya adalah pada lima sensor proximity yaitu ps0, ps1, ps2, ps3, dan ps,7 yang menggunakan teknologi infra merah.



Gambar 2. Sensor Robot E-Puck



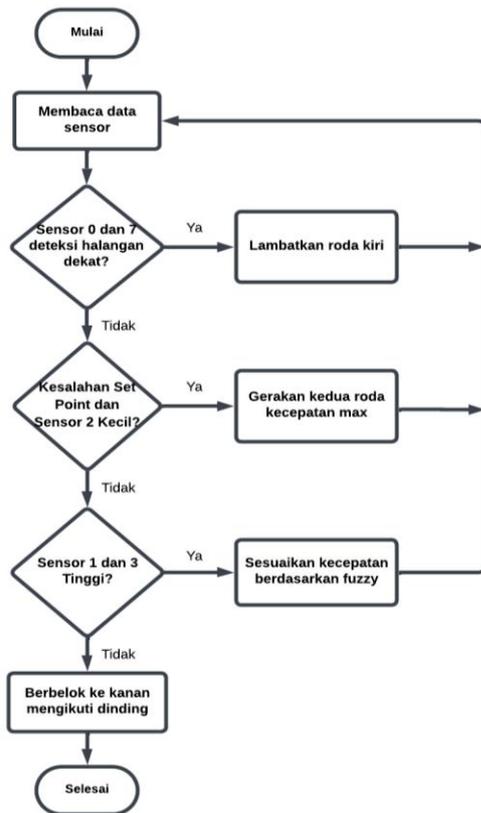
Gambar 3. Prinsip gerak Robot

$$Error = SP - PV \tag{1}$$

$$Delta\ Error = Error - Error\ Terakhir \tag{2}$$

$$Kecepatan\ Motor\ Kiri = Kecepatan\ Max + Kecepatan\ Fuzzy \tag{3}$$

$$Kecepatan\ Motor\ Kanan = Kecepatan\ Max - Kecepatan\ Fuzzy \tag{4}$$



Gambar 4. Flowchart Logika Robot

Ketika sensor 0 dan 7 mendeteksi adanya halangan di dekatnya, roda kiri akan melambat sehingga robot dapat berbelok ke kiri. Jika kesalahan antara set point dan data dari sensor 2 kecil, kedua roda akan bergerak dengan kecepatan maksimum untuk menjaga jalur lurus. Apabila sensor 1 dan 3 menunjukkan nilai yang tinggi, kontrol fuzzy akan menyesuaikan

kecepatan roda agar robot dapat mengikuti dinding. Jika tidak ada kondisi di atas yang terpenuhi, robot akan berbelok ke kanan untuk terus mengikuti dinding.

2.2. Perancangan Arena

Penelitian ini menggunakan arena berbentuk lingkaran. Arena yang ditunjukkan pada Gambar 5 digunakan untuk melakukan perbandingan antara kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*) dan sistem berbasis logika fuzzy. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas dan kinerja kedua metode kontrol tersebut dalam situasi yang sama. Sementara itu, arena yang ditunjukkan pada Gambar 5 digunakan untuk melakukan pengujian pembacaan sensor dua.



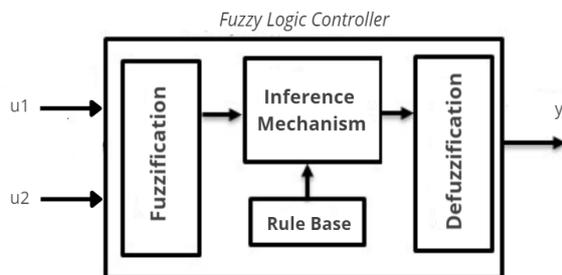
Gambar 5. Arena Percobaan

2.3. Perancangan Kendali Fuzzy

Dalam pengembangan sistem navigasi robot yang efisien, diperlukan sistem kendali yang mampu mengatasi situasi dinamis dan kompleks. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah penerapan logika fuzzy. Penelitian mengembangkan perangkat lunak untuk sistem kendali wall following pada robot e-Puck menggunakan metode Fuzzy Logic. Robot didesain untuk mengikuti dinding dalam lingkungan arena dengan memanfaatkan sensor infra merah untuk mendeteksi dinding dan menentukan tindakan yang sesuai.

Desain Kontroler Fuzzy mencakup tiga langkah utama. Langkah pertama adalah Fuzzifikasi, yaitu mengubah input crisp berupa jarak dan sudut menjadi nilai fuzzy

menggunakan fungsi keanggotaan. Langkah kedua adalah Inferensi, yang menggunakan aturan IF-THEN untuk menentukan output fuzzy berdasarkan nilai input fuzzy. Langkah ketiga adalah Defuzzifikasi, yang mengubah output fuzzy menjadi nilai crisp yang digunakan untuk mengontrol motor robot.



Gambar 6. Diagram Blok Fuzzy Logic Controller

Tabel 1. Variabel Fuzzy

Input	Kategori
error	Sangat Kecil (SK)
	Kecil (K)
	Netral (N)
	Besar (B)
	Sangat Besar (SB)
delta_error	Sangat Kecil (SK)
	Kecil (K)
	Netral (N)
	Besar (B)
	Sangat Besar (SB)
Output	Kategori
Control	Sangat Lambat(SL)
	Lambat (L)
	Netral (N)
	Cepat (C)
	Sangat Cepat (SC)

Logika fuzzy didasarkan pada prinsip pengambilan keputusan oleh ahli manusia dalam mekanisme pemecahan masalah. Di mana, solusi dijelaskan dalam istilah linguistik atau bahasa sehari-hari, misalnya, cepat, lambat, tinggi, rendah, dll [3]. Dalam kasus yang lebih kompleks, mereka mencakup beberapa istilah penghubung, misalnya, sangat tinggi, tidak begitu rendah, dll. Untuk merepresentasikan istilah-istilah tersebut, dibutuhkan teori himpunan fuzzy yang non matematis.

Penelitian ini menggunakan Metode mamdani yang disebut metode Max-Min. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim

Mamdani pada tahun 1975 [13]. Metode Mamdani, yang sering disebut sebagai metode berbasis aturan (rule-based), adalah salah satu pendekatan yang paling umum digunakan dalam logika fuzzy karena kemampuannya untuk menangani permasalahan pengambilan keputusan yang kompleks dengan menggunakan aturan yang mudah dimengerti oleh manusia. Untuk mendapatkan output, diperlukan 4 tahapan: Pembentukan himpunan fuzzy, Aplikasi fungsi implikasi (Rules) Komposisi aturan (inference), Penegasan (defuzzy). Defuzzifikasi dilakukan menggunakan metode centroid dari himpunan fuzzy yang mampu menghasilkan nilai keluaran tertentu berdasarkan keanggotaan relatif dari semua aturan yang berlaku [14].

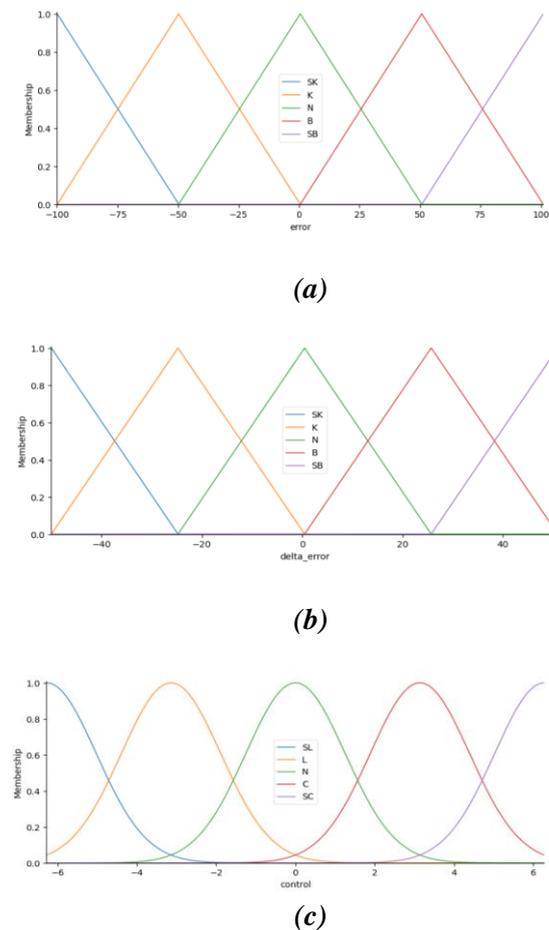
Tabel 2. Rule Base

Rules	Error	Delta_error	Control
1	SK	SK	SL
2	SK	K	SL
3	SK	N	L
4	SK	B	L
5	SK	SB	N
6	K	SK	SL
7	K	K	L
8	K	N	N
9	K	B	N
10	K	SB	C
11	N	SK	L
12	N	K	N
13	N	N	N
14	N	B	C
15	N	SB	C
16	B	SK	L
17	B	K	N
18	B	N	C
19	B	B	C
20	B	SB	SC
21	SB	SK	N
22	SB	K	C
23	SB	N	C
24	SB	B	SC
25	SB	SB	SC

Berdasarkan Blok pada Gambar 5, maka:
 Input : u1 (error), u2 (delta_error)
 Output : y (control)

Dalam penelitian ini, terdapat 3 variabel data yang akan digunakan untuk membuat aturan-aturan fuzzy, yaitu dua input dan satu output [12]. data input pertama adalah error, sedangkan data input kedua adalah delta error. data output berupa nilai control. Langkah pertama yang perlu dilakukan adalah menentukan fungsi keanggotaan atau membership Function (MF). Pada perancangan

ini menggunakan fungsi segitiga untuk MF input, dan gaussian untuk output. Fungsi Gaussian di kasus ini memberikan perubahan yang halus dan tidak linear dalam nilai keanggotaan sehingga menghasilkan keluaran yang lebih halus.

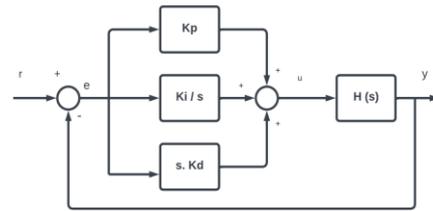


Gambar 7. (a) Input error, (b) Input delta_error, (c) Output control

2.4. Perancangan Kendali Fuzzy

PID Controller adalah salah satu jenis pengontrol yang sangat umum digunakan. Sistem ini juga dapat dengan mudah digabungkan dengan metode pengendalian lain seperti Logika Fuzzy. PID Controller sebenarnya terdiri dari tiga jenis strategi pengendalian yang saling dipadukan, yaitu P (Proportional) Controller, D (Diferensial) Controller, dan I (Integral) Controller. Setiap jenis memiliki parameter khusus yang harus

diatur dengan tepat untuk memastikan kinerja yang optimal, yang dikenal sebagai koefisien.



Gambar 8. Diagram Blok Sistem Kendali PID

Pada gambar 8, $H(s)$ merupakan model dari plant yang ingin dikendalikan, dan dalam penelitian ini adalah model matematika dari motor DC yang direpresentasikan menggunakan fungsi alih. Blok sistem kendali terlihat pada blok sebelum plant yaitu Proporsional, Integral, dan Derivatif yang ditandai dengan adanya K_p , K_i , K_d . Simbol e atau *error* adalah selisih antara r yang merupakan set poin dengan pembacaan umpan balik dari sistem yang dalam aktual biasanya menggunakan sensor. Keluaran dari sistem kendali PID atau u yang merupakan masukan dari *plant* dapat dihitung pada domain waktu yang ditunjukkan pada persamaan (5).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \tag{5}$$

Transformasi laplace dari persamaan (5) ditunjukkan pada persamaan (6).

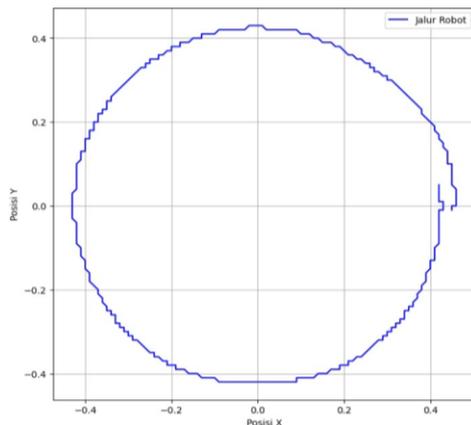
$$K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s + K_p s + K_i}{s} \tag{6}$$

Parameter-parameter tersebut diturunkan dari perhitungan matematis pada metode PID konvensional. PID controller dapat digunakan untuk mengontrol kecepatan motor DC dengan mengirimkan sinyal kontrol ke mikrokontroler untuk diolah menggunakan kontrol PID hingga mencapai set point.

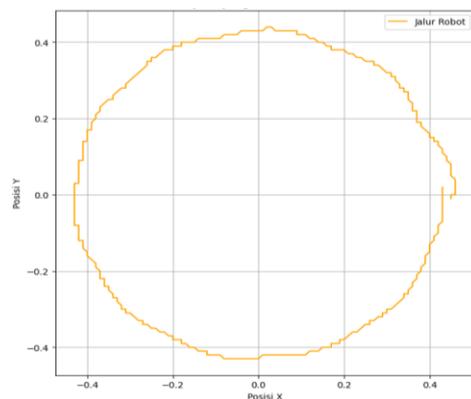
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan efektivitas algoritma kendali Fuzzy Logic dan PID Controller dalam mengendalikan robot E-puck sebagai robot pengikut dinding, serta menentukan mana yang memberikan kinerja yang lebih optimal. Pengendali fuzzy yang dibuat untuk mengatur

robot E-Puck dapat dilihat pada 2.3.1 Prinsip Gerak Robot. Selama pengujian berlangsung terdapat beberapa penyesuaian gerak robot yang diakibatkan oleh pembacaan input error dan delta error yang didapat yang selalu mampu menghindari rintangan yang ada dan tidak mengalami tabrakan.

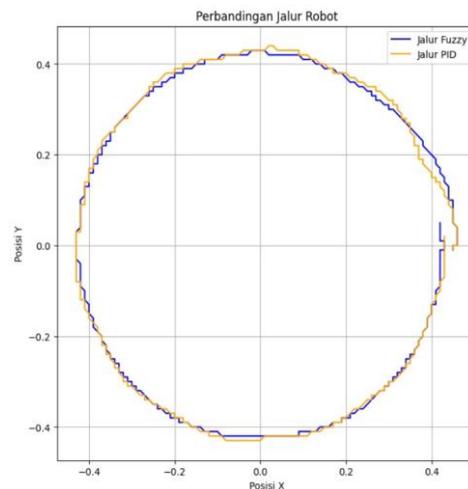


(a)



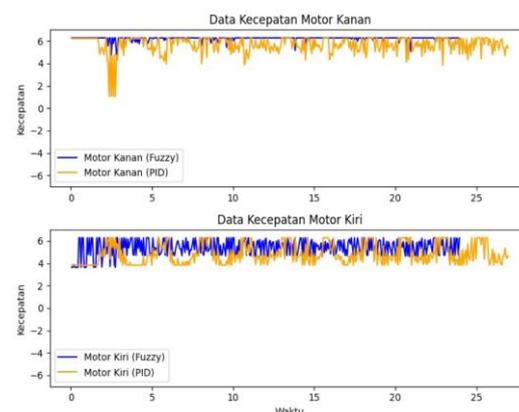
(b)

Gambar 9. (a)Track Sistem FLC, (b) Track Sistem PID

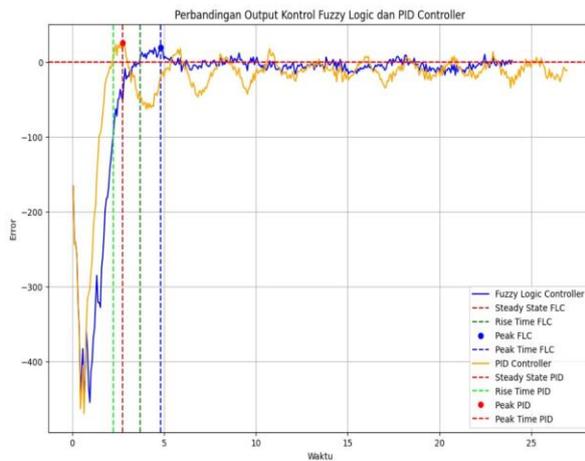


Gambar 10. Perbandingan Jalur antara Sistem FLC dan PID

Pada Gambar 9(a), warna biru menunjukkan grafik kecepatan motor dengan menggunakan kontrol fuzzy menunjukkan hasil yang lebih stabil. Kecepatan motor kanan cenderung konstan pada nilai 6,28 rad/s. Motor kiri bergerak menyesuaikan bentuk arena yang melingkar, sehingga grafiknya terlihat sedikit bergelombang. Namun, jalur pergerakan robot pada Gambar 10 dengan kontrol fuzzy terlihat lebih halus dibandingkan jalur robot dengan kontrol PID. Sementara itu, Dalam simulasi yang ditampilkan pada Gambar 9(b), warna kuning menunjukkan grafik pergerakan motor kanan dan kiri dengan kontrol PID terlihat kasar dan berosilasi. Kecepatan motor kiri secara berulang naik dari 4 rad/s ke 6 rad/s, kemudian turun kembali ke 4 rad/s, dan pola ini terus berulang. Dalam simulasi yang ditampilkan Pada Gambar 10, jalur pergerakan robot terlihat bergelombang.



Gambar 11. Perbandingan Pembacaan motor FLC dan PID



Gambar 12. Perbandingan Output FLC dan PID

Tabel. 3 Output sistem FLC

Output Kontrol Sistem Fuzzy Logic	
Steady State	0
Peak Time	4.8
Peak Value	19.36
Overshoot	9.82%
Rise Time	3.71
Settling Time	-

Tabel 4. Output Sistem PID

Output Kontrol Sistem PID	
Steady State	0
Peak Time	2.75
Peak Value	25.51
Overshoot	-3.25%
Rise Time	2.24
Settling Time	-

Berdasarkan hasil data output dari kedua sistem kontrol, sistem kontrol Fuzzy memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai nilai puncak, yaitu 4.8 detik dengan nilai puncak sebesar 19.36. Meskipun waktu puncaknya lebih lambat dan memiliki overshoot sebesar 9.82%, grafik dari sistem Fuzzy menunjukkan respons yang lebih halus dengan tingkat error rata-rata -3.31 dan stabil tanpa adanya osilasi. Sistem Fuzzy cenderung mencapai steady state dengan nilai error yang tidak terlalu besar, menjadikannya lebih sesuai untuk aplikasi yang memerlukan stabilitas dan respons yang halus. Dengan demikian, sistem

kontrol Fuzzy memberikan output yang stabil, namun dengan respons yang lebih lambat.

Di sisi lain, sistem PID menunjukkan respons yang lebih cepat dengan waktu puncak tercatat pada 2.75 detik dan nilai puncak mencapai 25,51. Meskipun demikian, sistem PID ini mengalami ketidakstabilan yang ditandai dengan osilasi berkelanjutan dan tingkat error rata-rata -13.39, serta tidak mencapai steady state. Overshoot negatif sebesar -3.25% mengindikasikan adanya undershoot dan ketidakmampuan sistem untuk mencapai nilai target yang stabil. Dengan demikian, meskipun sistem kontrol PID memberikan respons cepat, ia kurang mampu menjaga stabilitas.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan metode fuzzy logic menggunakan robot E-Puck yang dilakukan dengan simulasi di aplikasi Webots dapat mengikuti dinding dengan efisien dan cepat. Dengan logika fuzzy yang diterapkan, robot E-Puck mampu meningkatkan keputusan kontrol yang digunakan untuk mengatasi arena yang diberikan. Dalam penelitian ini, dilakukan dua pemodelan yaitu pemodelan arena dan pemodelan robot menggunakan aplikasi Webots yang digunakan untuk mensimulasikan logika yang dibuat. Pemilihan robot E-Puck dalam penelitian ini dikarenakan keunggulannya dalam portabilitas yang baik dan memiliki banyak sensor yang dapat membantu berjalannya penelitian ini.

Dalam penelitian ini, dilakukan dua kendali yang berbeda yaitu PID (Proportional, Integral, Derivative) dan Fuzzy Mamdani. Input yang digunakan dalam kendali fuzzy adalah error dan delta error yang didapat dari pembacaan sensor infra merah pada robot E-Puck, dan outputnya adalah kontrol motor untuk maju lurus, belok kiri, dan belok kanan sesuai dengan kondisi yang dibaca oleh sensor infra merah di dalam robot E-Puck.

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa sistem kontrol PID memberikan respons yang lebih cepat dengan waktu puncak yang lebih singkat, namun kurang stabil dengan osilasi yang berkelanjutan dan tidak mencapai steady state. Di sisi lain, sistem kontrol Fuzzy memberikan respons yang lebih halus dan stabil

tanpa adanya osilasi, meskipun memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai nilai puncak. Oleh karena itu, pemilihan antara kedua sistem kontrol ini harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi, apakah lebih mengutamakan respons yang cepat atau stabilitas sistem.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Vokasi Universitas Negeri Yogyakarta dan pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hanafi, D., Abueejela, Y.M. and Zakaria, M.F., 2013 "Wall Follower Autonomous Robot Development Applying Fuzzy Incremental Controller", *Intelligent Control and Automation*, 04(01), pp. 18–25.
- [2] J. S. Aripin, "Design of Mobile Robot Wall Follower Using Microcontroller Using Fuzzy Logic Algorithms", *J. Teknik Informatika CIT Medicom*, vol. 11, no. 1, pp. 1–7, Mar. 2019.
- [3] Matko, D., & Skrjanc, I., 2000. Predictive functional control based on a fuzzy model for heat-exchanger pilot plant. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(6), 705–712.
- [4] Almasri, M. M., Elleithy, K. M., & Alajlan, A. M., 2016. "Development of efficient obstacle avoidance and line following mobile robot with the integration of fuzzy logic system in static and dynamic environments". *2016 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT)*.
- [5] R. Maerani and S. Bakhri, "Perbandingan Sistem Pengontrolan PID Konvensional dengan Pengontrolan CMAC, Fuzzy Logic dan ANN pada Water Level Pressurizer," *Sigma Epsilon*, vol. 17, no. 3, pp. 129-136, Aug. 2013.
- [6] D. Gunawan, Y. Away, and I.D. Sara, "Comparison of PID and Fuzzy Logic Controller Modeling on Light Tracking with Three Sensors," *Journal of Informatics and Computer Science*, vol. 9, no. 1, pp. 5-14, Apr. 2023.
- [7] A. T. Kusuma, I. Agustian, F. Hadi, and A. Suandi, "Sistem Kendali Fuzzy-PID pada Robot Wall Follower Ackerman Steering," *Jurnal Amplifier*, vol. 7, no. 1, pp. 1-9, May 2017.
- [8] F. Mondada, M. Bonani, X. Raemy, J. Pugh, C. Cianci, A. Klaptocz, S. Magnenat, J.-C. Zufferey, D. Floreano, and A. Martinoli, "The e-puck, a Robot Designed for Education in Engineering," in *Proceedings of the 9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, vol. 1, no. 1, pp. 59-65, 2009.
- [9] Borase, R.P., Maghade, D.K., Sondkar, S.Y. *et al.* A review of PID control, tuning methods and applications. *Int. J. Dynam. Control* 9, 818–827 (2021).
- [10] J. Zheng, B. Liu, Z. Meng, and Y. Zhou, "Integrated real time obstacle avoidance algorithm based on fuzzy logic and L1 control algorithm for unmanned helicopter," in 2018 Chinese Control And Decision Conference, pp. 1865–1870, 2018 doi: 10.1109/CCDC.2018.8407430
- [11] F. H. Ajeil, I. K. Ibraheem, A. T. Azar, and A. J. Humaidi, "Autonomous navigation and obstacle avoidance of an omnidirectional mobile robot using swarm optimization and sensors deployment," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 3, p. 1729881420929498, 2020, doi: 10.1177/1729881420929498.
- [12] E. J. Pristianto, H. Arisesa, and A. N. Rahman, "Sistem Pengendali Pemanas Pemanggang Kopi Menggunakan Logika Fuzzy," *INKOM*, vol. 10, no. 2, pp. 67-74, Nov. 2016.
- [13] Simanjuntak and A. Fauzi, "Penerapan Fuzzy Mamdani Pada Penilaian Kinerja Dosen (Studi Kasus STMIK Kaputama Binjai)," *Jurnal ISD*, vol. 2, no. 2, pp. 143-149, Jul.-Dec. 2017.
- [14] E. Sufarnap and Sudarto, "Penerapan Metode Fuzzy Mamdani Dalam Penentuan Jumlah Produksi," in *Proc. Seminar Nasional Sains & Teknologi Informasi (SENSASI)*, Medan, Indonesia, Jul. 2019, pp. 379-382.
- [15] R. R. P. Asyrofi and R. Asyrofi, "Implementasi Aplikasi Jupyter Notebook Sebagai Analisis Kriteria Plagiasi Dengan Teknik Semantik," *JUPI (J. Ilm. Penelit. Pembelajaran Inform.)*, vol. 8, no. 2, pp. 627-637, Jun. 2023.