



Rancang Bangun Robot *Wall follower* dengan Kendali *Fuzzy-PID* Berbasis Sensor Ultrasonik

Burhanudin

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta, Indonesia

*Penulis korespondensi: burhanudinrimbawan482@gmail.com¹

Abstract. A wall follower robot is a type of autonomous robot that is designed to move by following a wall at a certain distance. This research aims to design and build a Wall follower robot equipped with a Fuzzy-PID control system to improve navigation performance. The robot uses five HC-SR04 ultrasonic sensors to detect the distance to the wall and the surrounding obstacles. The data from the sensor is then processed by a Fuzzy-PID algorithm that combines the advantages of conventional PID control with fuzzy logic, resulting in a more adaptive response to environmental conditions. The test results showed that the robot with Fuzzy-PID control was able to maintain the stability of the distance to the wall more consistently compared to the pure PID control. In addition, the system exhibits better adaptability to complex environmental conditions, such as sharp turns, uneven wall surfaces, and the presence of resistance variations. The application of Fuzzy-PID control has been shown to improve the stability, response speed, and accuracy of the robot's navigation. These findings are expected to contribute to the development of robotic navigation systems for a wide range of practical applications, including automated cleaning robots, environmental exploration, and industrial systems that require reliable autonomous mobility.

Keywords: Fuzzy-PID Control; Robot Navigation; System Control; Ultrasonic Sensor; Wall follower Robot

Abstrak. Robot Wall follower merupakan salah satu jenis robot otonom yang dirancang untuk bergerak dengan mengikuti dinding pada jarak tertentu. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun robot Wall follower yang dilengkapi dengan sistem kendali Fuzzy-PID guna meningkatkan performa navigasi. Robot menggunakan lima sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mendeteksi jarak terhadap dinding maupun hambatan di sekitarnya. Data dari sensor kemudian diproses oleh algoritma Fuzzy-PID yang menggabungkan keunggulan kendali PID konvensional dengan logika fuzzy, sehingga menghasilkan respon yang lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa robot dengan kendali Fuzzy-PID mampu menjaga kestabilan jarak terhadap dinding secara lebih konsisten dibandingkan dengan kendali PID murni. Selain itu, sistem ini menunjukkan kemampuan adaptasi yang lebih baik pada kondisi lingkungan yang kompleks, seperti belokan tajam, permukaan dinding yang tidak rata, serta adanya variasi hambatan. Penerapan kendali Fuzzy-PID terbukti meningkatkan stabilitas, kecepatan respon, dan akurasi navigasi robot. Temuan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem navigasi robotik untuk berbagai aplikasi praktis, termasuk robot pembersih otomatis, eksplorasi lingkungan, maupun sistem industri yang membutuhkan mobilitas otonom yang andal.

Kata Kunci: Kendali Fuzzy-PID; Navigasi Robot; Pengendalian Sistem; Robot Wall Follower; Sensor Ultrasonik

1. LATAR BELAKANG

Dalam dunia robotika, sistem navigasi otonom menjadi salah satu tantangan utama dalam pengembangan teknologi robot cerdas (Misaros, *et al.*, 2023). Salah satu metode navigasi yang banyak digunakan adalah sistem *Wall follower*, di mana robot bergerak mengikuti dinding dengan menjaga jarak tertentu (Chen, *et al.*, 2020). Robot ini memiliki berbagai aplikasi penting, seperti eksplorasi area yang tidak dapat diakses manusia, robot pembersih otomatis, serta sistem pemetaan dalam robotika Mobile (Thrun, *et al.*, 1999).

Perkembangan teknologi robotika semakin pesat, terutama dalam hal sistem navigasi dan penghindaran rintangan (Nirmala & Hidayati., 2024). Sistem *Wall follower* sering digunakan

dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam bidang industri, rumah tangga, dan eksplorasi (Akmal, et al., 2024). Contohnya, robot pembersih otomatis seperti *iRobot Roomba* menggunakan sistem serupa untuk menavigasi ruang dan membersihkan lantai secara efisien. Selain itu, dalam bidang eksplorasi, robot yang mampu mengikuti dinding dapat digunakan untuk menjelajahi terowongan, gua, atau bangunan yang sulit dijangkau manusia (Dash., 2015).

Kendali *Proportional Integral Derivative* (PID) adalah salah satu metode yang umum digunakan dalam pengaturan gerak robot (Solekha & Latifa., 2024). Namun, kendali PID konvensional sering kali mengalami kendala dalam menyesuaikan perubahan lingkungan yang dinamis, seperti dinding yang tidak rata atau hambatan yang muncul secara tiba-tiba. Ketika parameter PID tidak disesuaikan dengan baik, sistem dapat mengalami *overshoot*, waktu stabilisasi yang lama, atau bahkan kegagalan dalam menjaga jalur yang tepat (Dormino.,2006). Oleh karena itu, diperlukan metode kendali yang lebih adaptif dan fleksibel dalam menghadapi kondisi lingkungan yang berubah-ubah.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, pendekatan logika *Fuzzy* dikombinasikan dengan PID untuk meningkatkan fleksibilitas dan adaptabilitas sistem. Logika *Fuzzy* memungkinkan sistem untuk menangani ketidakpastian dan 1 perubahan lingkungan tanpa perlu model matematis yang kompleks (Zadeh., 1973). Pendekatan *Fuzzy-PID* telah terbukti meningkatkan performa dalam berbagai aplikasi, seperti kendali suhu, pengaturan kecepatan motor, dan sistem navigasi robot (Jantzen., 2008). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penerapan *Fuzzy-PID* dalam navigasi robot mampu meningkatkan stabilitas, mengurangi *overshoot*, serta memberikan respons yang lebih cepat terhadap perubahan jalur dibandingkan dengan PID konvensional.

Dengan semakin berkembangnya teknologi dan kebutuhan akan robot otonom yang cerdas dan responsif, penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan kendali *Fuzzy-PID* dalam sistem robot *Wall follower* guna meningkatkan akurasi dalam menjaga jarak dari dinding. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem navigasi robot yang lebih adaptif, efisien, dan andal.

2. KAJIAN TEORITIS

Robot Wall follower

Robot *Wall follower* adalah robot otonom yang bergerak mengikuti dinding dengan menjaga jarak konstan yang diatur menggunakan sensor jarak. Umumnya robot ini menggunakan sensor ultrasonik, inframerah, atau LIDAR untuk membaca jarak dinding dan

mengoreksi arah gerak berdasarkan data sensor. Prinsip kerja robot ini adalah melakukan koreksi otomatis ketika jarak robot terhadap dinding terlalu dekat atau jauh agar tetap pada jalur yang diinginkan. Keunggulan utama robot ini adalah navigasi yang stabil tanpa perlu peta, efisiensi energi, dan adaptasi yang baik terhadap berbagai kondisi lingkungan, serta kegunaan di aplikasi seperti robot pembersih otomatis, eksplorasi gua atau terowongan, dan sistem pengantaran barang otomatis.

Penelitian yang relevan telah banyak mengkaji sistem navigasi robot *Wall follower* dengan kendali PID, *Fuzzy logic*, dan integrasi *Fuzzy-PID*. Sobirin & Hidayat, (2025) menggunakan kendali PID berbasis sensor ultrasonik dengan metode tuning Ziegler-Nichols, menghasilkan kestabilan tinggi dengan PI controller terbaik dan *settling time* rendah 0,44 detik serta error steady-state nol. Zaki, (2021) memasang logika *Fuzzy Mamdani* dengan sensor HC-SR04 untuk mengendalikan kecepatan motor dan posisi pada robot *wall tracer* berbasis Arduino Mega, memperlihatkan adaptasi yang baik terhadap variasi jarak dan lintasan.

Logika Fuzzy

Logika *Fuzzy* adalah metode kontrol berbasis aturan linguistik untuk menangani ketidakpastian dan data ambiguitas, tanpa memerlukan model matematis presisi. Konsep ini pertama kali diperkenalkan Zadeh (1973) dan diterapkan luas di robotika. Ada tiga tahap utama dalam sistem *Fuzzy*: fuzzifikasi (mengubah *input* numerik menjadi nilai *Fuzzy* menggunakan fungsi keanggotaan seperti singleton, segitiga, trapesium, gaussian), inferensi (mengolah data *Fuzzy* berdasarkan aturan IF-THEN, metode Mamdani dan Sugeno), dan defuzzifikasi (mengubah *output Fuzzy* ke nilai numerik). Keunggulan logika *Fuzzy* termasuk fleksibilitas, kemampuan menangani ketidakpastian, dan pendekatan yang menyerupai cara berpikir manusia. Dalam robotika, *Fuzzy* digunakan untuk navigasi adaptif, pengaturan kecepatan motor, dan penghindaran rintangan berbasis data sensor secara *real-time*.

Biswas (2022) mengembangkan kendali *Fuzzy-PID* untuk mengoptimalkan navigasi robot di lingkungan dengan berbagai hambatan, yang secara signifikan mengurangi kesalahan posisi. Sukardi et al. (2020) menerapkan logika *Fuzzy* pada robot hexapod dengan sensor ultrasonik US-100 guna memudahkan manuver rintangan. Dodu et al. (2019) merancang robot pemadam api dengan kendali *Fuzzy Sugeno* dan sensor ultrasonik HC-SR04. Wang, et al., (2018) menekankan superioritas kontrol *Fuzzy-PID* dibanding PID konvensional dalam menyesuaikan parameter kendali secara adaptif sehingga menghasilkan sistem navigasi robot yang lebih stabil dan akurat. Penelitian-penelitian ini menjadi dasar penting untuk pengembangan kendali *Fuzzy-PID* pada robot *Wall follower* berbasis sensor ultrasonik.

Fuzzifikasi

Fuzzifikasi melakukan transformasi input numerik (*crisp*) menjadi nilai *Fuzzy* yang memungkinkan sistem memproses data dengan ketidakpastian. Ada beberapa jenis fungsi keanggotaan yang sering digunakan:

- a. Singleton: input dinyatakan sebagai titik tunggal dengan derajat keanggotaan 1.
- b. Segitiga: input mempunyai derajat keanggotaan naik turun dalam bentuk segitiga, lebih fleksibel untuk variasi data.
- c. Trapesium: mirip segitiga tapi dengan puncak datar, cocok untuk batas data yang jelas.
- d. Gaussian: menggunakan distribusi probabilitas Gaussian, ideal untuk modeling data dengan distribusi statistik yang kompleks. Fuzzifikasi penting untuk mengawali proses kontrol *Fuzzy* dan mengadaptasi sistem terhadap variasi *input real*.

Aturan Fuzzy

Aturan *Fuzzy* adalah kumpulan pernyataan berformat IF-THEN yang menghubungkan variabel input *Fuzzy* dengan output *Fuzzy*. Aturan ini memungkinkan sistem mengambil keputusan berdasarkan kondisi sensor dan data *input* lain. Misalnya, "IF jarak dekat THEN kecepatan motor dikurangi secara signifikan." Aturan ini dapat menggunakan operator logika AND, OR untuk kombinasi kondisi dan membentuk sistem pengambilan keputusan yang kompleks namun intuitif.

Defuzzifikasi

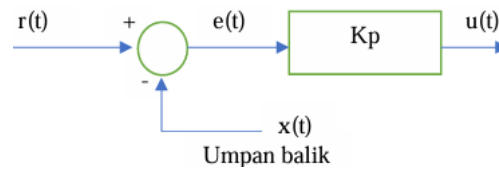
Defuzzifikasi mengonversi output *Fuzzy* berupa himpunan nilai menjadi nilai *crisp* numerik untuk memberikan perintah kendali secara konkret. Metode populer termasuk:

- a. *Centroid (Center of Gravity)*: menghitung pusat massa fungsi keanggotaan, hasil paling representatif tapi komputasi rumit.
- b. *Bisector*: membagi area fungsi menjadi dua bagian sama besar.
- c. *Mean of Maximum*: rata-rata nilai maksimum.

Smallest of Maximum dan *Largest of Maximum*: memilih nilai minimum atau maksimum dari nilai maksimum *Fuzzy*. Metode Centroid adalah yang paling umum digunakan untuk menghasilkan output yang presisi dan digunakan pada kendali robot.

Kendali Proporsional (P), Integral (I), dan Diferensial (D)

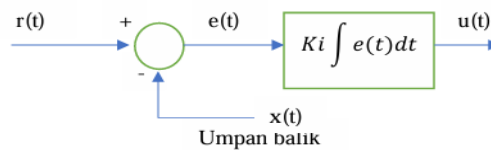
Kendali proporsional menghasilkan output yang sebanding dengan *error* (selisih antara *setpoint* dan nilai aktual), berguna untuk memperbaiki respon sistem dengan cepat namun tetap meninggalkan *error steady-state*.



Gambar 1. Diagram Blok Kendali Proporsional (P).

Dengan keterangan: K_p = Penguatan proporsional, $r(t)$ = Referensi, $e(t)$ = Sinyal galat/error, $x(t)$ = Umpan balik, $u(t)$ = Sinyal keluaran (*Manipulated Variable*).

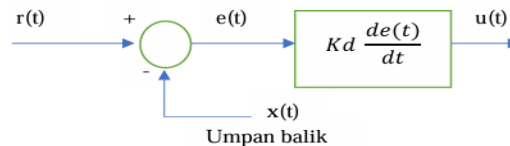
Kendali integral mengintegrasikan *error* dari waktu ke waktu, membantu menghilangkan *error steady-state* dengan menambah aksi koreksi selama *error* masih ada.



Gambar 2. Diagram Blok Kendali Integral (I).

Dengan keterangan: K_i = Penguatan integral $r(t)$ = Referensi, $e(t)$ = Sinyal galat/error, $x(t)$ = Umpan balik, $u(t)$ = Sinyal keluaran (*Manipulated Variable*).

Kendali diferensial mengantisipasi perubahan error berdasarkan laju perubahan *error* itu sendiri, membantu mencegah *overshoot* dan osilasi pada sistem.

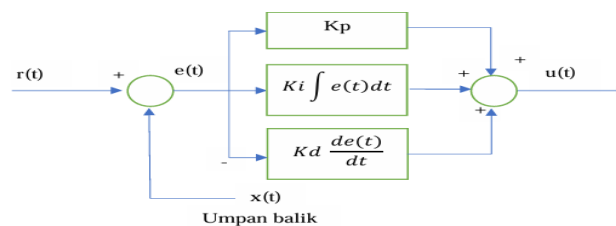


Gambar 3. Diagram Blok Kendali Diferensial (D).

Dengan keterangan: K_d = Penguatan Diferensial, $r(t)$ = Referensi, $e(t)$ = Sinyal galat/error, $x(t)$ = Umpan balik, $u(t)$ = Sinyal keluaran (*Manipulated Variable*).

Kendali PID

Gabungan kendali P, I, dan D menjadikan sistem lebih responsif dan stabil dengan cepat memperbaiki *error*, menghilangkan *error steady state*, dan mengurangi osilasi. Parameter K_p , K_i , dan K_d harus dituning dengan tepat untuk kecepatan dan kestabilan.

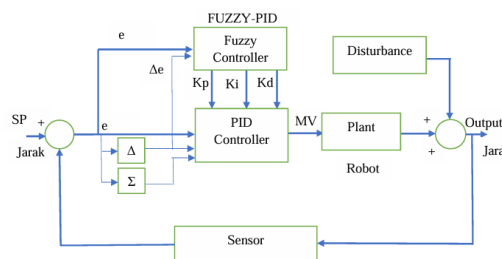


Gambar 4. Diagram Blok Kendali PID.

Dengan keterangan: K_p = Penguatan proporsional, K_i = Penguatan Integral, K_d = Penguatan Diferensial, $r(t)$ = Referensi, $e(t)$ = Sinyal galat/error, $x(t)$ = Umpan balik, $u(t)$ = Sinyal keluaran (*Manipulated Variable*).

Kendali Fuzzy-PID

Kendali Fuzzy-PID menggabungkan kekuatan Fuzzy logic untuk adaptasi parameter K_p , K_i , dan K_d secara *real-time* berdasarkan besarnya error dan perubahan error. Pendekatan ini menghasilkan sistem kendali lebih fleksibel dan stabil, mampu menyesuaikan diri dengan kondisi lingkungan yang berubah-ubah, terutama pada robot *Wall follower* yang harus merespons belokan tajam dan tekstur tidak rata. Diagram blok Fuzzy-PID memperlihatkan gabungan fuzzifikasi error, inferensi Fuzzy untuk penyesuaian parameter PID, dan defuzzifikasi output sebagai sinyal kendali.

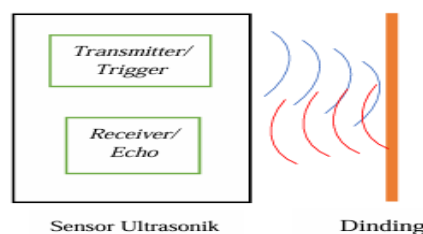


Gambar 5. Diagram Blok Kendali Fuzzy-PID.

Dengan keterangan: K_p = Penguatan proporsional, K_i = Penguatan Integral, K_d = Penguatan Diferensial

Sensor Ultrasonik dalam Navigasi Robot

Sensor ultrasonik, khususnya HC-SR04, adalah sensor jarak yang umum digunakan dalam robotika karena akurasi tinggi dan biaya rendah. Sensor ini bekerja dengan memancarkan gelombang suara ultrasonik dan mengukur waktu pantulan suara untuk menentukan jarak objek. Kecepatan suara di udara sekitar 343 m/s digunakan untuk kalkulasi jarak. Sensor ultrasonik dipasang pada beberapa posisi strategis robot untuk deteksi jarak menyeluruh, termasuk depan, kiri, kanan, dan serong, sehingga memungkinkan kendali adaptif melalui sistem Fuzzy-PID untuk menjaga jarak optimal terhadap dinding dan menghindari tabrakan.



Gambar 6. Prinsip Kerja Sensor Ultrasonik.

HC-SR04 merupakan modul sensor ultrasonik dengan jangkauan 2 cm hingga 400 cm, arus operasi sekitar 15 mA, frekuensi operasi 40 kHz, dan resolusi 0.3 cm. Sensor ini memiliki pin *trigger* untuk memancarkan gelombang dan pin *echo* untuk menerima pantulan serta mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler seperti Arduino Mega. Karena ukurannya kecil dan konsumsi daya yang rendah, sensor ini sangat cocok untuk aplikasi robot *Wall follower*.

3. METODE PENELITIAN

Rancangan Sistem

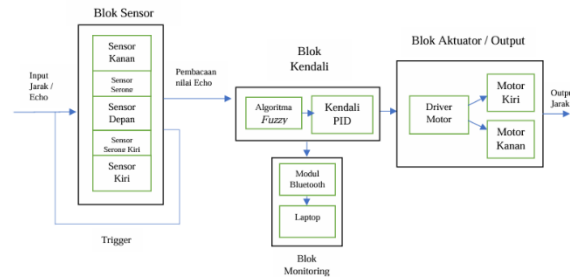
Sistem robot terdiri atas beberapa komponen utama: mikrokontroler Arduino Mega sebagai pusat kendali, lima sensor ultrasonik HC-SR04 yang ditempatkan di posisi strategis untuk pembacaan jarak dinding dan halangan, driver motor L298N untuk mengontrol motor DC encoder, sumber daya berupa baterai LiPo 12V yang disuplai melalui buck converter LM2596, serta modul Bluetooth HC-05 untuk komunikasi dan monitoring. Sistem kendali mengintegrasikan algoritma *Fuzzy*-PID yang mengkombinasikan fuzzifikasi pembacaan sensor, aturan *Fuzzy* dalam inferensi kendali, defuzzifikasi, dan pengolahan *output* melalui *PID controller* untuk menghasilkan sinyal PWM ke motor.

Penentuan Spesifikasi Alat

Pemilihan bahan konstruksi yang ringan dan kokoh seperti akrilik dan PLA, serta pemilihan sensor ultrasonik karena akurasi dan biaya rendah, mendukung kestabilan operasional robot. Mikrokontroler Arduino Mega dipilih karena kelengkapan pin *input/output* yang memungkinkan pengendalian banyak sensor dan perangkat dengan mudah. Sensor ultrasonik ditempatkan pada posisi depan, serong kanan/kiri, dan samping kanan/kiri untuk cakupan lingkungan yang luas. Motor DC dengan encoder digunakan untuk akurasi pengukuran posisi robot.

Perancangan Kendali *Fuzzy*-PID

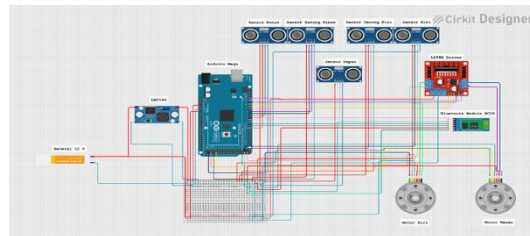
Algoritma *Fuzzy* mendefinisikan fungsi keanggotaan untuk parameter *error* dan perubahan *error* (*delta error*) pada jarak sensor, menerapkan aturan-aturan IF-THEN yang dirancang secara linguistik, seperti “Jika *error* besar, maka kurangi kecepatan motor secara drastis.” *Output Fuzzy* kemudian di-defuzzifikasi menggunakan metode *centroid* menjadi nilai koreksi numerik. Koreksi ini diteruskan sebagai parameter PID (K_p , K_i , K_d) yang secara adaptif mengatur aksi kendali motor untuk menjaga robot bergerak stabil pada jarak *setpoint*. Alur kerja secara keseluruhan dari robot *wall-follower* terdiri dari tiga bagian utama, yaitu blok sensor, blok kendali, dan blok aktuator/*output*. Diagram blok keseluruhan sistem ditunjukkan pada gambar berikut ini:



Gambar 7. Diagram Blok Sistem Keseluruhan.

Wiring Diagram

Robot terdiri dari 5 komponen sensor ultrasonik (sensor kiri, sensor serong kiri, sensor depan, sensor serong kanan, sensor kanan), buck converter LM 2596, modul bluetooth, baterai 12V LiPo, motor driver L298N, dan 2 buah motor (motor kiri dan motor kanan). Seluruh komponen akan dihubungkan ke pin-pin arduino mega sebagai mikrontroller pada robot. Wiring Diagram pada robot ditunjukkan pada gambar berikut ini:



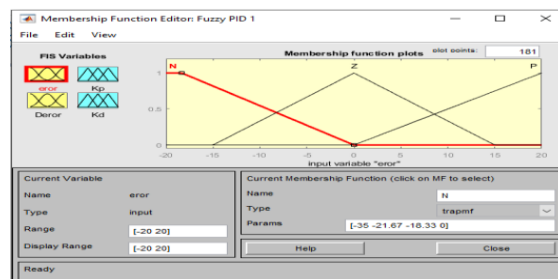
Gambar 8. Wiring Diagram.

Perancangan Aturan Fuzzy

Aturan Fuzzy pada robot ini menggunakan *Error* dan *dError* dari pembacaan sensor ultrasonik terhadap *setpoint* untuk mengatur *output* K_p dan K_d . Masing – masing memiliki fungsi keanggotaannya sebagai berikut.

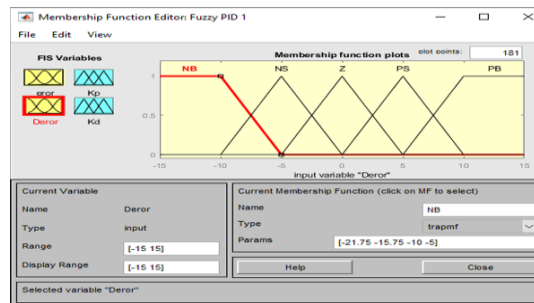
a. Input *Error*

Dengan keanggotaan: *Negative* : -20 sampai 0 cm. *Zero (Z)*: -15 sampai 15 cm. *Positive* : 0 sampai 20 cm



Gambar 9. Fungsi Keanggotaan *Error*.

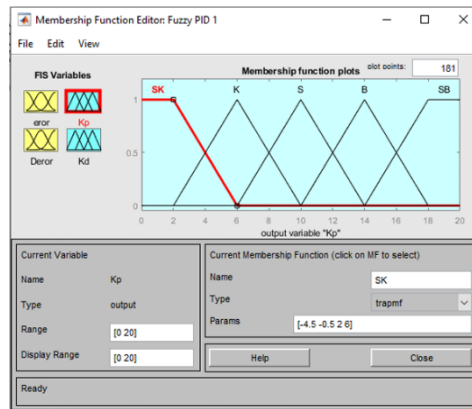
b. Input $dError$



Gambar 10. Fungsi Keanggotaan Delta Error.

Dengan Keanggotaan: *Negative Big* (NB): -15 sampai -5 cm. *Negative Small* (NS): -10 sampai 0 cm. *Zero* (Z): -5 sampai 5 cm. *Positive Small* (PS): 0 sampai 10 cm. *Positive Big* (PB): 5 sampai 15 cm.

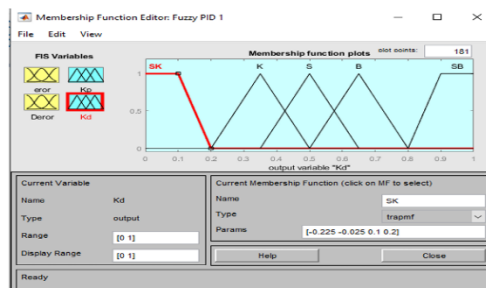
c. Output K_p



Gambar 11. Fungsi Keanggotaan Delta Error.

Output K_p memiliki keanggotaan sebagai berikut: Sangat Kecil (SK): 0 sampai 6. Kecil (K): 2 sampai 10. Sedang (S): 6 sampai 14. B (Besarnya): 10 sampai 18. Sangat Besar (SB): 14 sampai 20.

d. Output K_d



Gambar 12. Fungsi Keanggotaan Output K_d .

Output K_d memiliki keanggotaan sebagai berikut: Sangat Kecil (SK): 0 sampai 0,2. Keci (K): 0,2 sampai 0,5. Sedang (S): 0,35 sampai 0,65. B (Besarnya): 0,5 sampai 0,8. Sangat Besar (SB) : 0,8 sampai 1.

e. Aturan *Fuzzy* Nilai Konstanta Kp

dError \ Error	NB	NS	Z	PS	PB
N	SK	SK	SK	K	K
Z	K	K	K	S	S
P	B	B	B	SB	SB

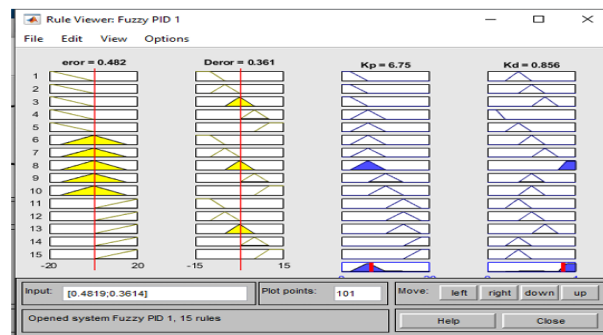
Gambar 13. Aturan *Fuzzy* Nilai Kp.

f. Aturan *Fuzzy* Nilai Konstanta Kd

dError \ Error	NB	NS	Z	PS	PB
N	K	S	B	SK	K
Z	S	B	SB	S	S
P	K	S	B	K	K

Gambar 14. Aturan *Fuzzy* Nilai Kd.

g. Output *Fuzzy*-PID



Gambar 15. Output Rule *Fuzzy*-PID.

Algoritma Sistem

Pada saat robot diaktifkan, sensor ultrasonik secara periodik memancarkan dan menerima sinyal untuk menghitung jarak. Data jarak diproses untuk menentukan *error* dan delta *error* yang kemudian difuzzifikasi. Berdasarkan nilai *Fuzzy* dan aturan inferensi, sistem menghasilkan sinyal kendali numerik yang diproses PID untuk mengatur motor sehingga robot dapat mengikuti dinding secara stabil dan adaptif. Proses ini berulang secara *real-time* dalam siklus dengan frekuensi yang cukup cepat (misal 10 Hz) untuk responsif terhadap kondisi lingkungan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Pembacaan Sensor Jarak

Pengujian sensor ultrasonik dilakukan pada berbagai posisi dan kondisi jarak dinding. Sensor mampu membaca jarak secara akurat dalam rentang 7 cm hingga 25 cm dengan rata-

rata jarak optimal 16 cm sebagai *setpoint*. Fungsi keanggotaan *Fuzzy* untuk jarak dan *error* dibuat berdasarkan data sensor ini, dengan kategori linguistik seperti dekat, normal, dan jauh.

No	SENSOR	Set	SPL	SPU	N	e	Z	e	P	e
1	Sensor Jarak Depan	15	12	18	7	-8	16	1	23	8
2	Sensor Jarak Kanan	15	12	18	7	-8	15	0	25	10
3	Sensor Jarak Kiri	15	12	18	7	-8	17	2	25	10
4	Sensor Jarak Kanan Depan	15	12	18	7	-8	16	1	23	8
5	Sensor Jarak Kiri Depan	15	12	18	7	-8	15	0	25	10
Jarak Rata-Rata		15	12	18	7	-8	16	0	24	9
Jarak terdekat		15	12	18	7	-8	15	-1	23	8
Jarak terjauh		15	12	18	7	-8	17	1	25	10

Gambar 16. Hasil Pembacaan Sensor Jarak.

Keterangan Tabel N (NEGATIF): Dekat (jarak minimal sensor), Z (ZERO): Sedang (jarak robot ditengah), P (POSTIF): Jauh (jarak terjauh robot), SP: *Setpoint*, SPU : *Setpoint* Atas, SPL : *Setpoint* Bawah

Penentuan Parameter PID

Parameter awal PID ditentukan menggunakan metode Ziegler-Nichols. Parameter ini selanjutnya diadaptasi secara *real-time* dengan logika *Fuzzy* untuk menyesuaikan perubahan kondisi lingkungan seperti belokan tajam atau permukaan dinding tidak rata.

Control Type	Kp	Ki	Kd
PID (classic)	0.78	1.56	0.074538
P	0.65	0	0
PI	0.585	0.918247	0
PD	1.04	0	0.099385
Pessen Integration	0.91	2.275	0.104354
Some Overshoot	0.433333	0.666667	0.183939

Gambar 17. Parameter untuk berbagi tipe kontrol

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa setiap tipe kontrol menghasilkan nilai parameter yang berbeda. Tipe PID classic memberikan kombinasi Kp, Ki, dan Kd yang seimbang untuk memperbaiki kesalahan *steady-state* sekaligus mengendalikan *overshoot*. Sementara itu, tipe *No Overshoot* memiliki Kp yang relatif kecil untuk meminimalkan *overshoot*, meskipun respons sistem menjadi lebih lambat. Pemilihan tipe kontrol yang akan digunakan pada implementasi robot mempertimbangkan kebutuhan antara kecepatan respons dan kestabilan sistem

Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian terdiri atas navigasi pada lintasan lurus, lintasan lurus dengan gangguan, dan lintasan berbelok kanan/kiri. Robot dengan kendali *Fuzzy*-PID berhasil menjaga jarak konstan

dengan *error* kecil dan merespon perubahan rute dengan cepat dan stabil tanpa *overshoot* signifikan.



Gambar 18. Foto Robot.

Pada pengujian pada lintasan yang berbentuk lurus dapat terlihat robot mampu memberikan aksi kontrol sehingga robot berada di sekitar nilai *setpoint*, dimana terlihat ketika respons nilai *error* mendekati nilai *setpoint*, maka aksi kontrol diturunkan, lalu ketika terjadi fluktuasi dimana nilai berkurang dari nilai *setpoint* maka aksi kontrol juga mengalami fluktuasi yang sama, dengan persen *error* 2,997%.

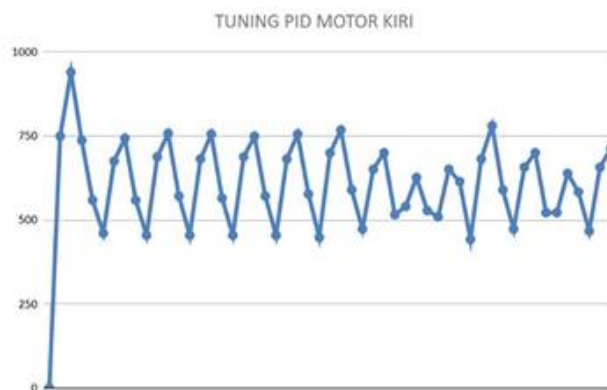
Pada pengujian sistem yang dilakukan pada lintasan lurus dengan gangguan eksternal, seperti yang ditampilkan pada Gambar, terlihat bahwa sistem kendali *Fuzzy-PID* mampu memberikan respon kontrol yang efektif untuk menjaga posisi robot tetap berada di sekitar nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil pengukuran, sistem menghasilkan persentase *error* sebesar 3,472%, yang masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi navigasi robot berbasis sensor. Pola respons sistem menunjukkan bahwa ketika nilai *error* (selisih antara jarak aktual dan *setpoint*) mendekati nol, intensitas aksi kontrol akan secara otomatis menurun.

Ketika robot menghadapi gangguan mendadak, seperti adanya perubahan jalur atau sudut belokan yang tajam, sistem menghasilkan aksi kontrol yang lebih agresif untuk segera mengembalikan posisi robot ke jalur optimal. Hal ini membuktikan bahwa metode *Fuzzy* mampu memberikan respons adaptif dan dinamis terhadap kondisi lingkungan yang tidak stabil, serta memiliki kemampuan dalam menyeimbangkan antara akurasi dan kestabilan sistem selama proses navigasi berlangsung.

Evaluasi dan Perbandingan Kendali PID vs *Fuzzy-PID*

Hasil pengujian respons kecepatan motor kiri pada tahap *tuning* PID menggunakan pendekatan Ziegler–Nichols metode kedua. Pada tahap ini, pengujian dilakukan dengan cara menonaktifkan komponen integral (K_i) dan turunan (K_d) pada kontroler, sehingga hanya parameter proporsional (K_p) yang memengaruhi sistem. Nilai K_p kemudian dinaikkan secara

bertahap hingga sistem menampilkan osilasi berkelanjutan dengan amplitudo yang relatif konstan, yang dikenal sebagai kondisi *ultimate gain*.

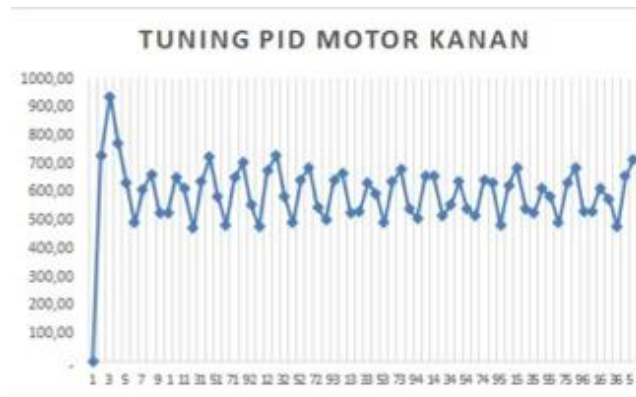


Gambar 19. *Tuning* PID motor kiri.

Pada pengujian ini, nilai K_p sebesar 3,5 menghasilkan respons berupa gelombang osilasi stabil sebagaimana terlihat pada grafik. Gelombang tersebut menunjukkan bahwa sistem telah mencapai batas kestabilan kritis, di mana tambahan kenaikan K_p akan menyebabkan sistem menjadi tidak stabil, sedangkan penurunan K_p akan menghilangkan osilasi. Dari pola gelombang yang berulang secara periodik, diperoleh periode osilasi (T_u) sebesar 0,5 detik, sedangkan *ultimate gain* (K_u) ditetapkan sama dengan K_p pada kondisi ini, yaitu 3,5.

Nilai K_u dan T_u ini kemudian digunakan sebagai acuan untuk menghitung konstanta kontroler pada konfigurasi P, PI, dan PID menggunakan rumus *tuning* Ziegler–Nichols. Dengan metode ini, diharapkan sistem dapat memperoleh parameter kontroler yang menghasilkan respons lebih cepat, tingkat *overshoot* yang terkendali, serta kestabilan yang lebih baik pada motor kiri. Proses ini menjadi langkah awal penting sebelum melakukan penyesuaian lanjutan (*fine tuning*) untuk mengoptimalkan kinerja keseluruhan sistem kendali pada robot.

Hasil pengujian respons kecepatan motor kanan pada tahap *tuning* PID dengan metode Ziegler–Nichols kedua. Sama seperti pada motor kiri, pengujian ini dilakukan dengan menonaktifkan parameter integral (K_i) dan turunan (K_d), sehingga sistem hanya dikendalikan oleh komponen proporsional (K_p). Nilai K_p dinaikkan secara bertahap hingga respon sistem menunjukkan osilasi berkelanjutan dengan amplitudo yang relatif konstan, menandakan tercapainya batas kestabilan kritis (*ultimate gain*).



Gambar 20. Tuning PID motor kanan.

Berdasarkan pengujian, nilai $K_p = 3,5$ menghasilkan pola osilasi stabil seperti yang terlihat pada grafik. Karakteristik gelombang yang berulang ini menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kondisi kritis di mana penambahan nilai K_p akan menyebabkan ketidakstabilan, sedangkan pengurangan nilai K_p akan menghilangkan sifat osilasi tersebut. Dari grafik ini diperoleh nilai *ultimate gain* (K_u) sebesar 3,5 dan periode osilasi (T_u) sebesar 0,5 detik. Nilai K_u dan T_u ini digunakan sebagai acuan perhitungan parameter kontroler P, PI, dan PID menggunakan formula *tuning* Ziegler–Nichols. Langkah ini bertujuan untuk memperoleh parameter kendali yang dapat meningkatkan respons motor kanan, mengurangi *overshoot*, serta menjaga kestabilan sistem pada saat robot beroperasi. Dengan parameter awal ini, proses selanjutnya adalah melakukan *fine tuning* untuk memastikan kedua motor baik kiri maupun kanan memiliki karakteristik respons yang seimbang, sehingga sistem kendali robot dapat bekerja secara optimal.

Motor	Kontrol	K_p	K_i	K_d
Kanan	P	0.65	-	-
	PI	0.585	0.918	-
	PD	1.04	-	0.099
	PID	0.78	2.041	0.075
Kiri	P	0.65	-	-
	PI	0.585	1.031	-
	PD	1.04	-	0.088
	PID	0.78	2.292	0.066

Gambar 21. Parameter hasil *tuning* berdasarkan metode Ziegler-Nichols.

Parameter awal pengendali diperoleh melalui metode Ziegler–Nichols dengan menggunakan nilai *ultimate gain* ($K_u = 1.3$) dan *ultimate period* (T_u) yang diidentifikasi dari hasil eksperimen pada sistem kendali motor. Proses penentuan K_u dilakukan dengan menaikkan nilai K_p secara bertahap pada konfigurasi kontroler proporsional murni hingga sistem menunjukkan osilasi berkelanjutan yang stabil. Nilai K_p pada titik ini ditetapkan sebagai K_u , sedangkan periode osilasi yang terjadi diukur sebagai T_u . Kedua parameter ini menjadi

dasar perhitungan konstanta kontrol untuk setiap jenis pengendali, yaitu P, PI, PD, dan PID, menggunakan formula standar yang telah didefinisikan dalam metode Ziegler Nichols.

Pada kontrol P, konstanta yang digunakan hanya K_p , sehingga pengendali ini mampu memberikan respons awal yang cepat terhadap perubahan *setpoint*. Namun, karena tidak adanya aksi integral, sistem dengan kontrol P cenderung meninggalkan *steady-state error*, di mana keluaran akhir tidak sepenuhnya mencapai nilai target. Kontrol PI menambahkan aksi integral yang berfungsi menghilangkan *steady-state error* secara bertahap, namun efeknya dapat menurunkan kecepatan respons dan meningkatkan risiko terjadinya integral *windup* jika tidak diantisipasi dengan mekanisme anti-*windup*.

Kontrol PD mengombinasikan aksi proporsional dengan aksi derivatif, yang berperan sebagai peredam osilasi dan membantu meningkatkan stabilitas sistem. Meskipun tidak secara langsung menghilangkan *steady-state error*, pengendali PD efektif dalam memperbaiki transien respons sistem. Sementara itu, kontrol PID memadukan ketiga aksi kendali proporsional, integral, dan derivatif, sehingga mampu menggabungkan kecepatan respons yang baik, kemampuan menghilangkan *error* pada keadaan tunak, dan redaman osilasi yang optimal. Dengan pemilihan parameter yang tepat melalui metode Ziegler–Nichols, kontrol PID sering kali menjadi solusi yang memberikan performa paling seimbang antara kecepatan, kestabilan, dan akurasi sistem.

Motor	Overshoot (%)	Settling time (s)	Steady-state error	Evaluasi
Kanan	-3.028	-	-425.633	Kurang baik
Kiri	-6.097	-	-381.531	Kurang baik

Gambar 22. Evaluasi Kinerja Sistem Kontrol.

Berdasarkan hasil evaluasi kinerja, kedua motor baik motor kiri maupun motor kanan menunjukkan nilai *overshoot* yang bernilai negatif serta *steady state error* yang cukup besar terhadap *setpoint* 700 rpm. Nilai *overshoot* negatif ini menunjukkan bahwa respon sistem tidak hanya gagal melewati nilai target, tetapi justru berada secara konsisten di bawah *setpoint* yang diharapkan. Kondisi ini menandakan bahwa sistem mengalami kekurangan daya dorong atau penguatan untuk mencapai target keluaran.

Interpretasi Hasil

Integrasi logika *Fuzzy* memungkinkan penyesuaian parameter kontrol yang fleksibel dan responsif secara *real-time*, yang tidak dapat dicapai oleh PID konvensional dengan parameter statis. Hal ini esensial dalam aplikasi robot *Wall follower* yang harus dinamis menanggapi kondisi lingkungan seperti belokan tajam dan permukaan dinding berubah-ubah.

Kondisi Lintasan	Metode Kendali	Rata-rata Error Jarak (cm)	Steady State Error (cm)	Overshoot (%)	Settling Time (detik)
Lurus tanpa gangguan	PID	4.5	2.0	12	2.8
	Fuzzy-PID	2.0	0.5	5	1.4
Lurus dengan gangguan (halangan)	PID	6.8	3.2	18	3.6
	Fuzzy-PID	3.1	1.0	7	1.9
Belokan tajam 90°	PID	7.5	3.5	20	4.2
	Fuzzy-PID	3.5	1.2	8	2.1

Gambar 23. Perbandingan Hasil Kendali PID vs Fuzzy-PID pada Robot Wall Follower.

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 4.5 dapat dianalisis bahwa kinerja kendali Fuzzy-PID lebih baik dibandingkan dengan PID konvensional pada robot wall follower. Pada lintasan lurus tanpa gangguan, kendali PID menghasilkan rata-rata error sebesar 4,5 cm dengan steady state error sekitar 2 cm dan waktu stabilisasi (settling time) 2,8 detik. Sebaliknya, dengan kendali Fuzzy-PID, error rata-rata menurun menjadi 2 cm, steady state error 0,5 cm, serta settling time lebih singkat yaitu 1,4 detik. Hal ini menunjukkan bahwa Fuzzy-PID mampu memperbaiki akurasi dan kecepatan respons sistem.

Pada lintasan lurus dengan gangguan berupa halangan, kendali PID menunjukkan rata-rata error lebih tinggi (6,8 cm) dan overshoot mencapai 18%, sedangkan Fuzzy-PID menurunkan error menjadi 3,1 cm dengan overshoot hanya 7%. Artinya, sistem Fuzzy-PID memiliki kemampuan adaptif yang lebih baik dalam menghadapi perubahan lingkungan secara tiba-tiba.

Pengujian pada lintasan belokan 90° juga memperlihatkan hasil serupa. Kendali PID cenderung menghasilkan rata-rata error besar (7,5 cm) dengan settling time lebih lama (4,2 detik). Sebaliknya, Fuzzy-PID mampu menjaga jarak dengan error lebih kecil (3,5 cm) dan settling time yang lebih cepat (2,1 detik). Hasil ini membuktikan bahwa kendali Fuzzy-PID lebih efektif dalam menjaga kestabilan robot saat menghadapi lintasan kompleks.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dan analisis penelitian mengenai pengendalian robot Wall follower dengan kendali Fuzzy-PID, dapat disimpulkan bahwa penggunaan kendali Fuzzy-PID secara signifikan meningkatkan kestabilan dan akurasi navigasi robot dibandingkan dengan kendali PID konvensional. Logika Fuzzy memungkinkan sistem untuk menangani ketidakpastian dan variasi lingkungan secara adaptif, sehingga robot mampu mempertahankan jarak optimal dari

dinding dengan *error* yang rendah dan respons yang halus terhadap perubahan lintasan, termasuk pada belokan tajam dan dinding tidak rata. Meskipun waktu respons puncak kendali *Fuzzy-PID* sedikit lebih lambat dibandingkan *PID* tradisional, keuntungan berupa pengurangan *overshoot* serta kestabilan pergerakan membuat *Fuzzy-PID* lebih efektif untuk aplikasi robot navigasi otonom. Implementasi sensor ultrasonik HC-SR04 terbukti handal dalam memberikan data jarak yang akurat untuk input sistem kendali adaptif ini. Oleh karena itu, kendali *Fuzzy-PID* merupakan metode yang tepat untuk meningkatkan kinerja robot *Wall follower* dalam menavigasi lingkungan yang dinamis dan kompleks. Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan dengan integrasi sensor tambahan dan optimasi algoritma untuk meningkatkan kemampuan adaptasi dan efisiensi energi robot.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan dan penyusunan penelitian ini. Ucapan terima kasih secara khusus disampaikan kepada dosen pembimbing atas arahan, bimbingan, dan masukan yang diberikan selama proses penelitian dan penulisan naskah. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada pihak institusi dan fasilitas pendukung yang telah membantu kelancaran penelitian ini.

Jurnal ini merupakan bagian dari hasil penelitian skripsi penulis yang disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar sarjana pada program studi Teknik Elektro.

DAFTAR REFERENSI

- Akmal Arista, A., Paradifta, K. A., Nugraha, Z., & Priambodo, A. S. (2024). Implementasi fuzzy logic pada kendali robot e-puck wall following. *JEECAE: Journal of Electrical, Electronic, Control and Automotive Engineering*, 9(1), 16–21. <http://journal.pnm.ac.id/>
- Biswas, H. A. (2022). *Fuzzy PID based navigation of autonomous mobile robot* (Master's thesis). Universiti Teknologi Malaysia.
- Chen, C.-H., Jeng, S.-Y., & Lin, C.-J. (2020). Mobile robot wall-following control using fuzzy logic controller with improved differential search and reinforcement learning. *Mathematics*, 8(8), 1254. <https://doi.org/10.3390/math8081254>
- Dash, T. (2015). Automatic navigation of wall-following mobile robot using adaptive resonance theory of type-1. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, 12, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.bica.2015.04.008>
- Dormino, S. (2006). Advanced PID control—[Book review]. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(1), 98–101. <https://doi.org/10.1109/MCS.2006.1580160>
- Jantzen, J. (2008). *Design of fuzzy controllers*. Department of Automation, Technical University of Denmark.

- Misaroş, M., Stan, O.-P., Donca, I.-C., & Miclea, L.-C. (2023). Autonomous robots for services—State of the art, challenges, and research areas. *Sensors*, 23(10), 4962. <https://doi.org/10.3390/s23104962>
- Nirmala, I., & Hidayati, R. (2024). Sistem navigasi otonom robot mobil berbasis ROS pada robot penggerak diferensial. *INFOTECH Journal*, 10(2), 288–296. <https://doi.org/10.31949/infotech.v10i2.11219>
- Sobirin, M., & Hidayat, A. S. (2025). Rancang bangun robot wall follower dengan kendali PID berbasis sensor ultrasonik. *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, 10(1), 79–87. <https://doi.org/10.52447/jkte.v10i1.7839>
- Solekha, R., & Latifa, U. (2024). Sistem kendali proportional integral derivative (PID) menggunakan mikrokontroler Arduino pada Tinkercad. *ELECTRON: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 5(1), 89–97. <https://doi.org/10.33019/electron.v5i1.108>
- Sukardi, S., & Zain, S. G. (2021). *Pengembangan algoritme gerak robot hexapod menggunakan logika fuzzy*.
- Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (1999). *Probabilistic robotics*. MIT Press.
- Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263–2278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>
- Zadeh, L. A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(1), 28–44. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.5408575>
- Zaki, A. A. (2021). *Rancang bangun wall tracer robot menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04 berbasis fuzzy logic control*.