

IMPLEMENTASI LOGIKA FUZZY PADA SISTEM PENGEREMAN OTOMATIS (AUTOMATIC BRAKING SYSTEM) ROBOT MOBIL BERDASARKAN JARAK OBJEK

Tazkiya Nafsila¹, Adit Lusandi², Imadudin Harjanto³

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang ^{1,2,3}
Jl. Sidodadi Timur 24, Semarang Indonesia

E-mail: aditlusandi1@gmail.com

Abstrak

Perancangan sistem keselamatan aktif pada kendaraan merupakan aspek krusial untuk meminimalkan risiko kecelakaan lalu lintas yang sering disebabkan oleh kelalaian pengemudi. Penelitian ini mengusulkan pengembangan prototipe robot mobil yang dilengkapi dengan Sistem Pengereman Otomatis (Automatic Braking System). Metode yang diimplementasikan untuk sistem pengambilan keputusan adalah Logika Fuzzy (Fuzzy Logic), yang dipilih karena efektivitasnya dalam memodelkan sistem kontrol tanpa memerlukan model matematis yang kompleks serta kemampuannya menangani ketidakpastian data sensor. Prototipe ini dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit kendali utama, dengan sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai masukan untuk mendeteksi jarak objek di depan robot secara real-time. Output dari kontroler fuzzy berupa perintah pengaturan Pulse Width Modulation (PWM) pada motor DC, yang berfungsi mengatur tingkat deselerasi (perlambatan) kecepatan motor hingga pengereman penuh saat jarak objek mendekati batas tidak aman. Dengan Logika Fuzzy, robot dapat meniru penalaran manusia dalam menentukan intensitas pengereman yang tepat berdasarkan jarak terukur. Hasil pengujian menunjukkan bahwa robot mampu melakukan pengereman secara otomatis dan berhenti pada jarak aman ketika mendeteksi objek di lintasannya, sehingga sistem ini layak diimplementasikan sebagai sarana pembelajaran dan pengembangan teknologi keselamatan cerdas.

Kata Kunci: Logika Fuzzy, Sistem Pengereman Otomatis, Robot Mobil, ESP32, Sensor Ultrasonik, PWM.

I. PENDAHULUAN

Keselamatan berkendara merupakan aspek penting dalam pengembangan teknologi kendaraan cerdas. Salah satu penyebab utama terjadinya kecelakaan lalu lintas adalah keterlambatan pengemudi dalam merespons kondisi di depan kendaraan, khususnya ketika jarak dengan objek penghalang semakin dekat. Kondisi ini menunjukkan perlunya sistem keselamatan aktif yang mampu membantu proses pengereman secara otomatis untuk meminimalkan risiko tabrakan [1].

Perkembangan teknologi robotika dan sistem kendali memungkinkan penerapan Sistem Pengereman Otomatis (*Automatic Braking System*) berbasis sensor jarak. Sensor ultrasonik banyak digunakan dalam sistem keselamatan kendaraan dan robot karena kemampuannya dalam mendeteksi jarak objek secara non-kontak dan real-time. Informasi jarak yang diperoleh dari sensor ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar pengambilan keputusan untuk mengatur tingkat perlambatan kendaraan secara adaptif [4].

Metode pengambilan keputusan memiliki peranan penting dalam menentukan kualitas respon sistem pengereman otomatis. Penggunaan metode logika tegas (*crisp logic*) sering menghasilkan respon pengereman yang kaku dan tidak bertahap. Sebagai alternatif, Logika Fuzzy banyak diterapkan karena mampu menangani ketidakpastian data sensor dan menghasilkan respon kendali yang lebih halus serta

menyerupai cara berpikir manusia [2], [3]. Metode *Fuzzy Logic Controller* (FLC) Mamdani khususnya sering digunakan karena struktur aturan yang sederhana dan mudah diimplementasikan pada sistem kendali berbasis mikrokontroler.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penerapan logika fuzzy pada sistem pengereman dan pengendalian robot mampu menghasilkan respon perlambatan yang lebih stabil dan aman dibandingkan metode konvensional [4], [5]. Dengan keluaran berupa sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM), sistem kendali fuzzy dapat mengatur kecepatan motor DC secara bertahap hingga kendaraan berhenti pada jarak yang aman dari objek penghalang.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan prototipe robot mobil yang dilengkapi dengan Sistem Pengereman Otomatis berbasis logika fuzzy Mamdani. Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit kendali utama dan sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai masukan untuk mendeteksi jarak objek di depan robot secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan dan mengevaluasi kinerja sistem kendali fuzzy dalam menentukan intensitas pengereman berdasarkan jarak objek, sehingga sistem dapat berfungsi sebagai sarana pembelajaran dan pengembangan teknologi keselamatan cerdas [6].

II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Engineering Design Process* (EDP) dalam perancangan dan implementasi Sistem Pengereman Otomatis (*Automatic Braking System*) pada robot mobil. Proses pengembangan produk meliputi tahapan perumusan masalah, perancangan sistem, simulasi, implementasi, serta pengujian dan evaluasi. Sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama, sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai pendeksi jarak objek, dan logika fuzzy metode Mamdani sebagai sistem pengambil keputusan. Pendekatan ini dipilih karena logika fuzzy mampu menangani ketidakpastian data sensor dan menghasilkan respon pengereman yang lebih halus dibandingkan metode logika tegas [2], [3].

2.1 Perumusan Masalah

Pada tahapan perumusan masalah telah ditetapkan permasalahan yang dihadapi, yaitu bagaimana merancang sistem pengereman otomatis pada robot mobil yang mampu menyesuaikan tingkat pengereman berdasarkan jarak objek di depan robot secara bertahap dan aman. Permasalahan ini muncul karena sistem pengereman konvensional tanpa pengendalian cerdas cenderung menghasilkan respon yang mendadak dan kurang stabil [2], [3].

Tujuan dari penelitian ini adalah mengimplementasikan sistem pengereman otomatis berbasis logika fuzzy Mamdani pada robot mobil. Implementasi sistem dilakukan dalam bentuk penggunaan sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai pendeksi jarak objek, mikrokontroler ESP32 sebagai sistem kendali utama (controller), dan motor DC sebagai aktuator penggerak yang dikendalikan melalui sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) [2], [4].

a. Perumusan Masalah

Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah belum tersedianya sistem pengereman otomatis pada mobil robot yang mampu menyesuaikan tingkat perlambatan secara adaptif berdasarkan jarak objek di depannya. Pada sistem konvensional, pengereman umumnya masih bergantung pada perintah manual atau

logika tegas, sehingga respon yang dihasilkan cenderung kaku dan kurang efektif ketika jarak objek berubah secara bertahap [2], [3].

Kondisi tersebut dapat meningkatkan risiko terjadinya tabrakan, khususnya ketika mobil robot bergerak mendekati objek dengan jarak yang semakin dekat. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem kendali yang mampu memproses informasi jarak secara kontinu dan menghasilkan keputusan pengereman yang halus serta bertahap[3], [4].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini difokuskan pada pengembangan Sistem Pengereman Otomatis (*Automatic Braking System*) pada mobil robot dengan memanfaatkan sensor ultrasonik sebagai pendekripsi jarak, motor DC sebagai aktuator, serta Logika Fuzzy Mamdani sebagai metode pengambilan keputusan. Sistem yang dikembangkan diharapkan mampu memberikan respon pengereman yang lebih adaptif, stabil, dan aman sesuai dengan kondisi jarak objek[2], [5].

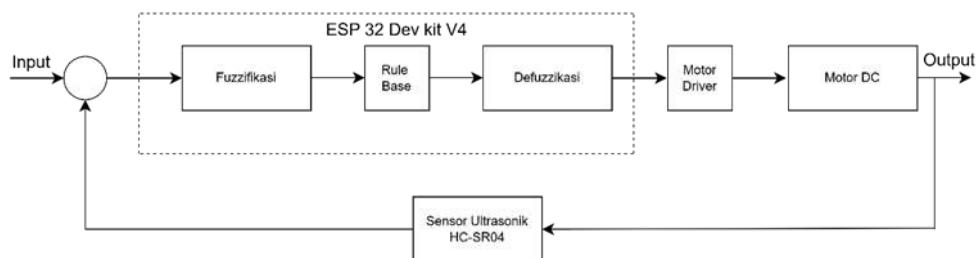
b. Tahapan Perancangan Sistem

Tahapan perancangan dilakukan untuk menentukan spesifikasi dan konsep sistem kendali pengereman otomatis pada mobil robot. Pada tahap ini disusun arsitektur sistem melalui dekomposisi fungsi serta penentuan komponen yang digunakan pada setiap fungsi, sehingga alur kerja sistem dapat berjalan secara terintegrasi dan terkontrol [2], [3].

Berdasarkan dekomposisi fungsi, sistem kendali pengereman otomatis terdiri dari tiga bagian utama, yaitu:

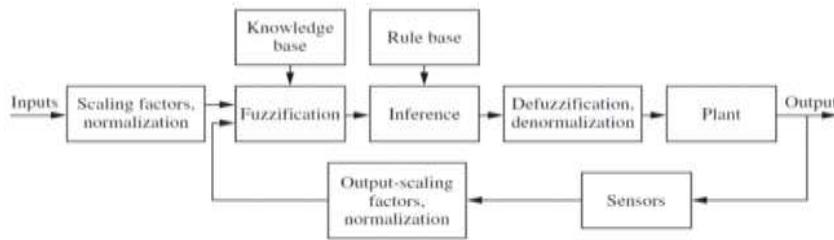
1. **Controller:** Logika fuzzy metode Mamdani yang diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32 sebagai pengambil keputusan pengereman. [2], [3].
2. **Sensor:** Sensor ultrasonik HC-SR04 yang berfungsi mendekripsi jarak objek di depan mobil robot sebagai masukan sistem kendali. [4].
3. **Actuator:** Motor DC yang dikendalikan melalui motor driver untuk mengatur kecepatan gerak robot dan menghasilkan efek pengereman [4].

Proses perancangan sistem kendali menggunakan konsep sistem kendali tertutup (*closed-loop system*), di mana keluaran sistem berupa kecepatan motor dipengaruhi secara langsung oleh masukan jarak objek yang terdeteksi sensor. Skema sistem kendali tertutup ditunjukkan pada Gambar 1, yang memperlihatkan hubungan antara masukan jarak, pemrosesan oleh kontroler fuzzy, dan keluaran kecepatan motor.



Gambar 1. System kendali kalan tertutup

Alur kerja sistem secara keseluruhan digambarkan dalam diagram blok sistem pada Gambar 2. Diagram tersebut menunjukkan bahwa data jarak hasil pembacaan sensor ultrasonik HC-SR04 dikirimkan ke mikrokontroler ESP32 untuk diproses menggunakan sistem kendali logika fuzzy metode Mamdani. Proses fuzzy meliputi tahap fuzzifikasi, evaluasi basis aturan (rule base), dan defuzzifikasi, sebelum menghasilkan keluaran berupa nilai PWM yang digunakan sebagai sinyal kendali kecepatan motor DC.



Gambar 2. Implementasi controller logika fuzzy dalam sistem kendali

Berdasarkan Gambar 2, proses kerja controller logika fuzzy dalam sistem kendali terdiri dari beberapa tahapan utama sebagai berikut:

1. Normalisasi dan Scaling Input

Data jarak hasil pembacaan sensor dinormalisasi untuk menyesuaikan rentang nilai masukan sistem fuzzy.

2. Fuzzifikasi

Nilai input jarak diubah menjadi derajat keanggotaan pada masing-masing himpunan fuzzy sesuai fungsi keanggotaan yang telah ditentukan.

3. Inferensi (Rule Base)

Proses inferensi dilakukan dengan mengevaluasi aturan fuzzy (*IF-THEN*) yang terdapat pada basis aturan untuk menentukan respon sistem.

4. Defuzzifikasi

Hasil inferensi fuzzy diubah menjadi nilai tegas berupa *Pulse Width Modulation* (PWM) menggunakan metode defuzzifikasi yang telah ditetapkan.

5. Plant dan Sensor (Umpulan Balik)

Nilai PWM digunakan untuk mengatur kecepatan motor DC (plant), sementara sensor memberikan umpan balik ke sistem sehingga membentuk sistem kendali tertutup.

Sistem kendali fuzzy pada penelitian ini dirancang menggunakan metode Mamdani untuk menentukan tingkat penggeraman otomatis pada mobil robot. Metode Mamdani dipilih karena mampu menghasilkan respon kendali yang halus dan stabil serta mudah diimplementasikan pada sistem berbasis mikrokontroler [2], [3]. Perancangan sistem fuzzy dilakukan dengan bantuan perangkat lunak MATLAB sebagai acuan dalam menentukan struktur sistem, fungsi keanggotaan, dan basis aturan sebelum diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32 [5].

Langkah Design Fuzzy:

- a) Identifikasi Variabel (Input, State, Output).

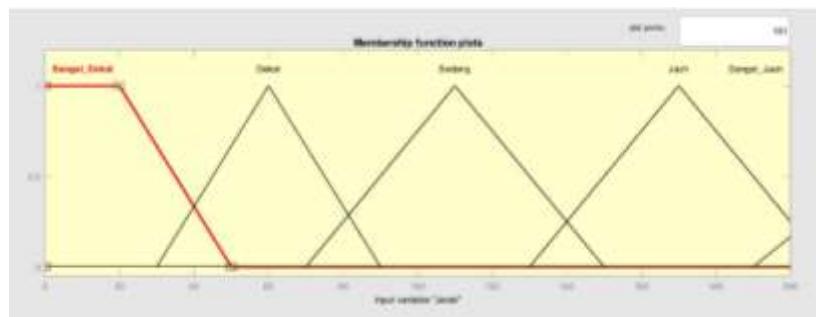
Struktur sistem logika fuzzy yang digunakan terdiri dari satu variabel input berupa jarak dan satu variabel output berupa nilai PWM kecepatan motor, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Variabel input jarak dibagi ke dalam beberapa himpunan fuzzy, sedangkan variabel output PWM merepresentasikan tingkat kecepatan motor. Fungsi keanggotaan untuk variabel input dan output ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Basis aturan fuzzy disusun dalam bentuk aturan *IF-THEN* sebagai acuan pengambilan keputusan sistem, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6, yang sesuai dengan karakteristik sistem kendali fuzzy pada robot bergerak [3], [4].

- b) Penentuan Membership Function

Penentuan *membership function* dilakukan untuk merepresentasikan hubungan antara variabel input dan variabel output pada sistem kendali fuzzy. *Membership function* digunakan untuk mengubah nilai tegas (*crisp*) menjadi derajat keanggotaan pada masing-masing himpunan fuzzy [2], [3].

Variabel input pada sistem kendali fuzzy adalah jarak objek pada Gambar 3, yang dinyatakan dalam satuan centimeter (cm). Variabel jarak dibagi ke dalam beberapa himpunan fuzzy, yaitu *Sangat Dekat*, *Dekat*, *Sedang*, dan *Jauh*. Fungsi keanggotaan variabel input jarak dirancang menggunakan bentuk fungsi segitiga dan trapesium untuk merepresentasikan perubahan jarak objek secara bertahap [3], [4]. Secara umum, fungsi keanggotaan variabel input jarak dapat dinyatakan sebagai berikut:

1. Pada kondisi Sangat Dekat, derajat keanggotaan bernilai maksimum pada jarak yang sangat kecil dan menurun seiring bertambahnya jarak.
2. Pada kondisi Dekat dan Sedang, fungsi keanggotaan berbentuk segitiga yang merepresentasikan transisi antar kondisi jarak.
3. Pada kondisi Jauh, derajat keanggotaan meningkat seiring bertambahnya jarak objek [2], [3].



Gambar 3. Fungsi keanggotaan input (Jarak)

Fungsi Keanggotaan Sangat Dekat:

$$\mu_{\text{SangatDekat}}(d) = \begin{cases} 1, & d \leq 20 \\ \frac{50-d}{50-20}, & 20 < d \leq 50 \\ 0, & d > 50 \end{cases}$$

Fungsi Keanggotaan Dekat:

$$\mu_{\text{Dekat}}(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 30 \text{ atau } d \geq 70 \\ \frac{d-30}{50-30}, & 30 < d \leq 50 \\ \frac{70-d}{70-50}, & 50 < d < 70 \end{cases}$$

Fungsi Keanggotaan Sedang:

$$\mu_{\text{Sedang}}(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 70 \text{ atau } d \geq 130 \\ \frac{d-70}{100-70}, & 70 < d \leq 100 \\ \frac{130-d}{130-100}, & 100 < d < 130 \end{cases}$$

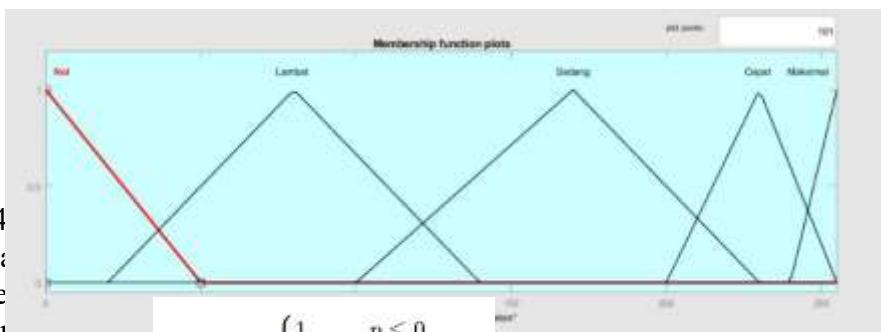
Fungsi Keanggotaan Jauh:

$$\mu_{\text{Jauh}}(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 130 \text{ atau } d \geq 180 \\ \frac{d-130}{160-130}, & 130 < d \leq 160 \\ \frac{180-d}{180-160}, & 160 < d < 180 \end{cases}$$

Fungsi Keanggotaan Sangat Jauh:

$$\mu_{\text{SangatJauh}}(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 160 \\ \frac{d-160}{200-160}, & 160 < d < 200 \\ 1, & d \geq 200 \end{cases}$$

Variabel output sistem kendali fuzzy adalah nilai *Pulse Width Modulation* (PWM) yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor DC. Gambar 4. Variabel output PWM dibagi ke dalam beberapa himpunan fuzzy yang merepresentasikan tingkat kecepatan motor, mulai dari kecepatan rendah hingga kecepatan tinggi. Fungsi keanggotaan variabel output dirancang untuk menghasilkan perubahan nilai PWM secara halus sehingga respon penggeraman tidak terjadi secara mendadak.



Gambar 4

Berdasarkan Gambar 4, variabel output PWM dibagi menjadi empat himpunan fuzzy.

Himpunan Lambat:

$$\mu_{\text{Lambat}}(p) = \begin{cases} 1, & p \leq 0 \\ \frac{50-p}{50-0}, & 0 < p \leq 50 \\ 0, & p > 50 \end{cases}$$

Himpunan Lambat:

$$\mu_{\text{Lambat}}(p) = \begin{cases} 0, & p \leq 30 \text{ atau } p \geq 100 \\ \frac{p-30}{65-30}, & 30 < p \leq 65 \\ \frac{100-p}{100-65}, & 65 < p < 100 \end{cases}$$

Himpunan Sedang:

$$\mu_{\text{Sedang}}(p) = \begin{cases} 0, & p \leq 100 \text{ atau } p \geq 180 \\ \frac{p-100}{140-100}, & 100 < p \leq 140 \\ \frac{180-p}{180-140}, & 140 < p < 180 \end{cases}$$

Himpunan Cepat:

$$\mu_{\text{Cepat}}(p) = \begin{cases} 0, & p \leq 180 \text{ atau } p \geq 230 \\ \frac{p-180}{210-180}, & 180 < p \leq 210 \\ \frac{230-p}{230-210}, & 210 < p < 230 \end{cases}$$

Himpunan Maksimal:

$$\mu_{\text{Maksimal}}(p) = \begin{cases} 0, & p \leq 210 \\ \frac{p-210}{255-210}, & 210 < p < 255 \\ 1, & p \geq 255 \end{cases}$$

Output PWM maksimal.

c) Penentuan rule base

Penentuan *rule base* dilakukan sebagai dasar pengambilan keputusan pada sistem kendali fuzzy dalam menentukan tingkat penggeraman otomatis. *Rule base* disusun dalam bentuk aturan **IF-THEN** yang menghubungkan kondisi variabel input berupa jarak objek dengan variabel output berupa nilai *Pulse Width Modulation* (PWM) kecepatan motor [2], [3].

Aturan fuzzy dirancang untuk menghasilkan respon pengereman yang halus dan bertahap sesuai dengan perubahan jarak objek. Semakin dekat jarak objek yang terdeteksi oleh sensor ultrasonik, semakin kecil nilai PWM yang dihasilkan sehingga motor mengalami perlambatan hingga berhenti. Sebaliknya, ketika jarak objek masih jauh, sistem menghasilkan nilai PWM yang lebih besar sehingga motor dapat bergerak dengan kecepatan lebih tinggi[3], [4]. Aturan fuzzy yang digunakan pada sistem ini adalah sebagai berikut:

Rule 1: Jika jarak objek *Sangat Dekat*, maka PWM *Sangat Kecil*.

Rule 2: Jika jarak objek *Dekat*, maka PWM *Kecil*.

Rule 3: Jika jarak objek *Sedang*, maka PWM *Sedang*.

Rule 4: Jika jarak objek *Jauh*, maka PWM *Besar*.

Kumpulan aturan tersebut membentuk *rule base* sistem kendali fuzzy yang digunakan sebagai acuan dalam proses inferensi. *Rule base* ini dirancang agar sistem mampu menyesuaikan tingkat pengereman secara adaptif berdasarkan jarak objek, sehingga respon pengereman yang dihasilkan lebih stabil dan tidak mendadak.

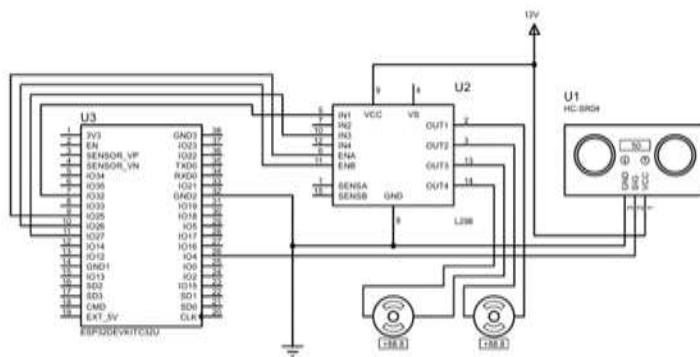
Implementasi Sensor dan Aktuator

Implementasi sensor dan aktuator dilakukan untuk merealisasikan sistem kendali pengereman otomatis pada mobil robot sesuai dengan perancangan sistem. Sensor yang digunakan pada penelitian ini adalah sensor ultrasonik HC-SR04, sedangkan aktuator sistem berupa motor DC yang dikendalikan melalui motor driver 1298n [4], [5].

Sensor ultrasonik HC-SR04 dipilih karena memiliki kemampuan mengukur jarak objek secara non-kontak dengan respon yang cepat dan tingkat akurasi yang cukup baik untuk aplikasi robot bergerak. Sensor ini juga mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 serta mampu memberikan data jarak secara real-time, sehingga sesuai digunakan sebagai masukan utama dalam sistem pengereman otomatis berbasis jarak.

Aktuator sistem berupa motor DC dikendalikan menggunakan rangkaian motor driver **1298n** yang berfungsi mengatur arah dan kecepatan putaran motor. Penggunaan motor driver 1298n memungkinkan motor DC dikendalikan melalui sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dihasilkan oleh mikrokontroler ESP32. Dengan konfigurasi ini, sistem dapat mengatur tingkat perlambatan motor secara bertahap sesuai dengan keputusan yang dihasilkan oleh kontroler logika fuzzy [4], [5].

Implementasi sensor HC-SR04 dan aktuator motor driver 1298n memungkinkan sistem kendali pengereman otomatis bekerja secara terintegrasi, di mana perubahan jarak objek dapat langsung mempengaruhi kecepatan motor dan menghasilkan respon pengereman yang halus dan adaptif.



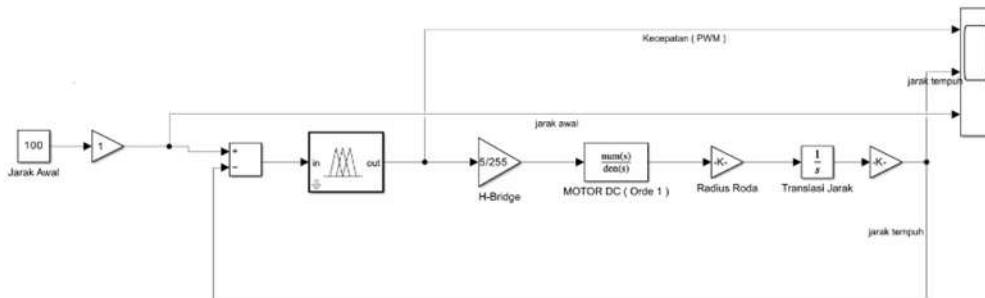
Gambar 5. Skematik rangkaian mobil

c. Simulasi Matlab

Tahap simulasi ditunjukkan pada Gambar 6 dilakukan guna memvalidasi kinerja sistem kendali penggereman otomatis sebelum diimplementasikan secara real-time pada mobil robot. Simulasi sistem dirancang menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink dengan memodelkan sistem kendali fuzzy Mamdani, motor DC, serta hubungan antara kecepatan motor dan jarak tempuh robot [3], [5].

Model simulasi terdiri dari beberapa blok utama, yaitu blok sistem kendali logika fuzzy sebagai penghasil sinyal PWM, model motor DC orde satu, serta blok perhitungan translasi jarak berdasarkan kecepatan motor. Nilai jarak awal diberikan sebagai masukan sistem, kemudian diproses oleh kontroler fuzzy untuk menghasilkan sinyal PWM yang merepresentasikan kecepatan motor. Keluaran sistem berupa perubahan kecepatan motor dan jarak tempuh diamati melalui grafik respon terhadap waktu [5].

Hasil simulasi digunakan untuk menganalisis karakteristik respon sistem, khususnya perilaku penurunan kecepatan motor seiring berkurangnya jarak objek. Dengan adanya simulasi ini, diharapkan sistem kendali fuzzy yang dirancang mampu menghasilkan respon penggereman yang halus dan stabil, serta memiliki kesesuaian dengan hasil pengujian real-time pada mobil robot [3], [5].



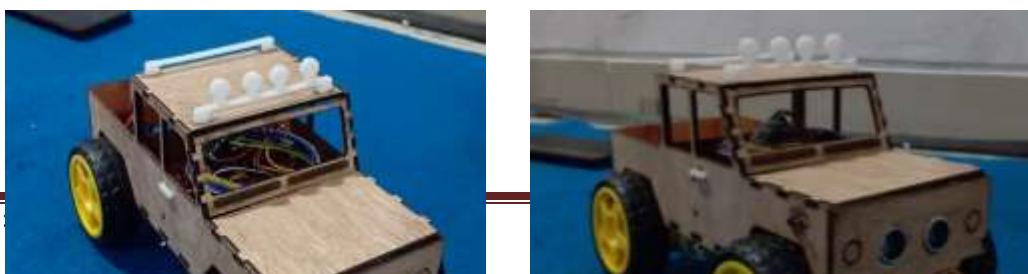
Gambar 6. Diagram Blok Simulasi Matlab (Simulink)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Perangkat Keras Mobil Robot

Realisasi perangkat keras mobil robot dilakukan dengan mengintegrasikan seluruh komponen utama sesuai dengan perancangan sistem. Sensor ultrasonik HC-SR04 ditempatkan pada bagian depan robot sebagai input jarak, sedangkan mikrokontroler ESP32 berfungsi sebagai pengendali utama sistem. Motor DC digunakan sebagai aktuator penggerak yang dikendalikan melalui motor driver.

Hasil realisasi perangkat keras mobil robot ditunjukkan pada Gambar 7. Berdasarkan hasil perakitan, seluruh komponen dapat bekerja dengan baik dan terintegrasi, sehingga sistem mampu menerima data jarak dari sensor dan mengendalikan kecepatan motor secara otomatis.



Gambar 7. Realisasi Perangkat Keras Mobil Robot

3.2 Hasil Pengujian Sistem Kendali Mobil Robot

Pengujian sistem kendali dilakukan untuk mengetahui respon sistem penggereman otomatis terhadap perubahan jarak objek yang terdeteksi oleh sensor ultrasonik. Pengujian dilakukan secara real-time dengan menjalankan mobil robot mendekati objek penghalang, kemudian mencatat nilai jarak, PWM, dan tegangan motor.

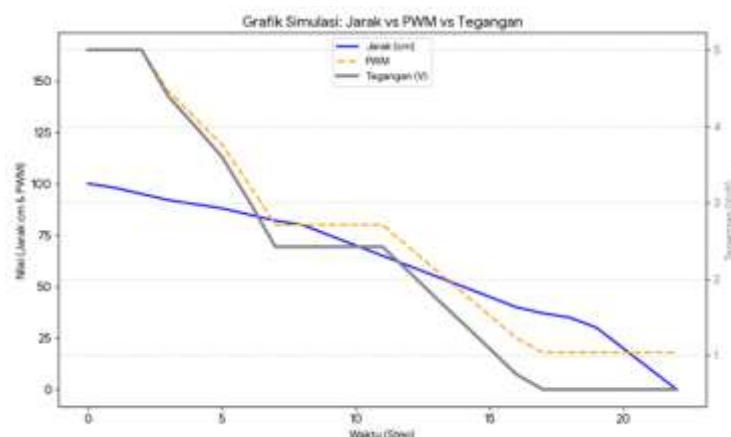
Hasil pengujian sistem kendali mobil robot ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa ketika jarak objek masih jauh, sistem menghasilkan nilai PWM yang relatif besar sehingga motor berputar dengan kecepatan tinggi. Sebaliknya, ketika jarak objek semakin dekat, nilai PWM dan tegangan motor menurun secara bertahap hingga motor berhenti.

Tabel 10. Hasil Pengujian Sistem Kendali Mobil Robot

Waktu	Jarak	PWM	Tegangan (Volt)
19:50:00	100	165	5.00
19:50:01	98	165	5.00
19:50:02	95	165	5.00
19:50:03	92	145	4.39
19:50:04	90	132	4.00
19:50:05	88	119	3.60
19:50:06	85	100	3.03
19:50:07	82	80	2.42
19:50:08	80	80	2.42
19:50:09	75	80	2.42
19:50:10	70	80	2.42
19:50:00	100	165	5.00
19:50:11	65	80	2.42
19:50:12	60	69	2.09
19:50:13	55	58	1.75
19:50:14	50	47	1.42
19:50:15	45	36	1.09
19:50:16	40	25	0.75

Waktu	Jarak	PWM	Tegangan (Volt)
19:50:17	37	18	0.55
19:50:18	35	18	0.55
19:50:19	30	18	0.55
19:50:20	20	18	0.55
19:50:21	10	18	0.55
19:50:22	0	18	0.55

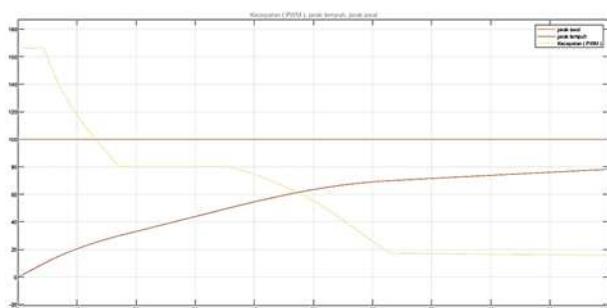
Berikut adalah visualisasi grafik dari Data hasil pengujian pada Tabel:



Gambar 8. GRAFIK *real-time* (Excel)

3.3 Hasil Respon Sistem Kendali Fuzzy dan Simulasi MATLAB/Simulink

Simulasi sistem kendali menggunakan MATLAB/Simulink dilakukan untuk memvalidasi perilaku sistem sebelum dan sesudah implementasi secara real-time. Hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 9 memperlihatkan perubahan nilai Pulse Width Modulation (PWM) dan jarak tempuh terhadap waktu, di mana nilai PWM berubah secara gradual mengikuti dinamika jarak tempuh sehingga motor mengalami perlambatan yang halus tanpa perubahan kecepatan yang mendadak. Berdasarkan hasil tersebut, sistem kendali fuzzy Mamdani yang dirancang dapat menghasilkan respon penggeraman otomatis yang sesuai dengan perancangan serta menunjukkan konsistensi kinerja pada simulasi maupun implementasi nyata [5], [6].



Gambar 9. Grafik visualisasi simulink

3.4 Analisis Hasil Sistem Pengereman Mobil Robot

Analisa kinerja sistem kendali mobil robot dilakukan dengan mengaitkan hasil pengujian real-time, respon sistem kendali fuzzy, serta hasil simulasi menggunakan MATLAB/Simulink. Data pengujian real-time yang disajikan dalam bentuk tabel dan grafik menunjukkan bahwa nilai *Pulse Width Modulation* (PWM) menurun secara bertahap seiring dengan berkurangnya jarak objek, sehingga kecepatan motor mengalami perlambatan hingga berhenti pada jarak yang aman. Pola ini menunjukkan bahwa sistem mampu merespon perubahan jarak secara konsisten dan stabil [2], [3].

Respon sistem kendali fuzzy yang ditunjukkan melalui proses fuzzifikasi dan defuzzifikasi memperlihatkan bahwa basis aturan fuzzy Mamdani bekerja sesuai dengan perancangan. Aktivasi himpunan fuzzy pada variabel input jarak menghasilkan keluaran PWM yang proporsional, sehingga respon pengereman yang dihasilkan bersifat halus dan tidak mendadak. Hal ini menunjukkan kemampuan logika fuzzy dalam menangani ketidakpastian data sensor dan menghasilkan keputusan kendali yang adaptif [3], [4].

Hasil simulasi MATLAB/Simulink menunjukkan karakteristik respon yang serupa dengan hasil pengujian real-time, terutama pada tren penurunan nilai PWM terhadap jarak. Kesesuaian antara simulasi dan implementasi nyata menunjukkan bahwa model simulasi yang digunakan telah merepresentasikan perilaku sistem secara akurat. Berdasarkan perbandingan tersebut, sistem kendali fuzzy Mamdani yang diterapkan memiliki tingkat kesalahan relatif kecil, yaitu berada pada rentang 1–4%, sehingga sistem dinilai memiliki akurasi dan keandalan yang baik untuk diterapkan sebagai sistem pengereman otomatis berbasis jarak [5], [6].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian sistem kendali mobil robot, respon sistem kendali fuzzy, serta hasil simulasi menggunakan MATLAB/Simulink, dapat disimpulkan bahwa sistem kendali pengereman otomatis yang dirancang telah bekerja sesuai dengan perancangan. Penurunan nilai *Pulse Width Modulation* (PWM) yang sebanding dengan berkurangnya jarak objek menunjukkan bahwa sistem kendali fuzzy Mamdani mampu menghasilkan respon pengereman yang halus dan bertahap.

Respon sistem kendali fuzzy pada kondisi jarak tertentu menunjukkan kemampuan sistem dalam mengambil keputusan pengereman yang tepat sesuai dengan basis aturan yang diterapkan. Selain itu, kesesuaian pola respon antara hasil simulasi MATLAB/Simulink dan pengujian real-time menunjukkan bahwa model simulasi yang digunakan telah merepresentasikan perilaku sistem secara akurat.

Dengan demikian, sistem kendali fuzzy Mamdani yang diimplementasikan pada mobil robot terbukti mampu bekerja secara konsisten baik pada simulasi maupun implementasi nyata, sehingga layak digunakan sebagai solusi pengendalian pengereman otomatis berbasis jarak objek.

V. REFERENSI

- [1] M. Khairudin, R. Refalda, S. Yatmono, H. S. Pramono, dan A. K. Triatmaja, “The Mobile Robot Control in Obstacle Avoidance Using Fuzzy Logic Controller,” Indonesian Journal of Science and Technology, vol. 5, no. 3, pp. 334–351, 2020.

- [2] H. S. Nasution, A. Jayadi, dan Rikendry, "Implementasi Metode Fuzzy Logic untuk Sistem Penggereman Robot Mobile Berdasarkan Jarak dan Kecepatan," *Jurnal Teknik dan Sistem Komputer (JTIKOM)*, vol. 3, no. 1, pp. 15–24, 2022.
- [3] D. Darwison, M. Ilhamdi Rusydi, dan R. Fajri, "Kontrol Posisi Robot Mobil Menggunakan Logika Fuzzy dengan Sensor Ultrasonik," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 1, no. 1, pp. 33–41, 2012.
- [4] A. K. Wibowo dan I. Triyanto, "Robot Car Arduino Ultrasonic Sensor HC-SR04 dengan Metode Fuzzy Logic Controller," *IKRAM: Jurnal Ilmu Komputer Al Muslim*, vol. 3, no. 2, pp. 68–76, 2024.
- [5] M. Wattu, "Pengendali Ketinggian Air Menggunakan Sensor Ultrasonik dengan Metode Fuzzy Logic," *Jurnal Teknik Elektro Universitas Widya Kartika*, pp. 76–86, 2011.
- [6] T. N. Muna dan A. Lusandi, "Implementasi Logika Fuzzy pada Sistem Penggereman Otomatis (Automatic Braking System) Robot Mobil Berdasarkan Jarak Objek," *Science and Engineering National Seminar (SENS)*, Universitas PGRI Semarang, 2025.