

Simulasi Pengendalian Kecepatan Putar Motor DC Menggunakan Metode Logika Fuzzy

Duma Kristina Yanti Hutapea^{1*}, Haenuki Sachi², Willy Kusmanto², David Herianto², Nico Fernanto², Karel Octavianus Bachri¹

¹Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya
Jalan Jend. Sudirman No.51, Karet Semanggi, Setiabudi, Jakarta Selatan, DKI Jakarta 12930

²Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya
Jalan Raya Cisauk, Sampora, Cisauk, Tangerang, Banten 15345

Article Info

Abstract

Article history:

Received
6 September 2023

Accepted
7 September 2023

Keywords:

Kecepatan Putar, Motor DC, Fuzzy Logic, Mamdani, Sensor Ultrasonik, PWM

This paper discusses DC motor rotational speed control using fuzzy logic method. The system works by utilizing ultrasonic sensors to detect distance. The detected distance affects the rotational speed of the DC motor which is controlled by the Arduino UNO microcontroller. Fuzzy logic is applied to the Arduino UNO microcontroller in which distance as the input, and the rotational speed of the DC motor in the form of Pulse Width Modulation as the output. There are several classifications of distance: very close, close, normal, far and very far. In addition, there are several classifications in the motor rotational speed response: slow, very slow, medium, fast, and very fast. The design of the fuzzy logic system is carried out in the Arduino IDE application and MATLAB using the Mamdani method at the inference stage. Fuzzy logic system is run on the Arduino UNO microcontroller in which the simulation is carried out through Proteus application. The test results show that the largest percentage of errors/discrepancies between the Proteus system design and the MATLAB is 1.55%. In the future, this simulation can be applied to systems such as self-driving cars.

1. LATAR BELAKANG

Self-driving car merupakan suatu teknologi berupa mobil yang dapat beroperasi sendiri tanpa adanya kemudi manual yang dilakukan oleh manusia. Teknologi ini berkembang seiring semakin padatnya transportasi di jalan raya serta tingginya angka kecelakaan yang disebabkan oleh kesalahan manu-sia/human error. Dalam beberapa tahun terakhir, *self-driving car* telah dilengkapi oleh teknologi seperti *computer vision*, *artificial intelligence*, *sensor fusion*, *localization*, *path planning*, dan *control* (Ondruš et al., 2020).

Aplikasi *self-driving car* sendiri dapat diimplementasikan melalui sebuah simulasi sederhana dengan menggunakan motor DC sebagai penggerakannya. Dikarenakan sifatnya hanya simulasi, maka penerapannya cenderung terbatas seperti hanya mengontrol kecepatan berdasarkan jarak dengan obyek di depannya. Dengan menggunakan logika biasa pada program (*if-else*), simulasi *self-driving car* dapat dilakukan dengan mengambil nilai jarak yang dibaca sensor ultrasonik sebagai masukan sehingga dapat mengontrol nilai kecepatan pada motor DC. Akan tetapi, logika ini cenderung sederhana dan tidak memiliki toleransi

terhadap data-data yang kurang bersesuaian. Akibatnya, penggunaan daya pada motor DC relatif boros.

Berdasarkan permasalahan di atas, muncul suatu ide untuk membuat simulasi sistem *self-driving car* menggunakan logika lain yang lebih baik dibandingkan dengan hanya menggunakan logika biasa. Logika itu dikenal dengan logika fuzzy. Logika fuzzy cenderung mudah dimengerti dan sangat fleksibel. Selain itu, logika ini memiliki toleransi terhadap data-data yang tidak tepat (Nugroho et al., 2014). Alhasil, pengontrolan kecepatan motor DC dapat dilakukan lebih baik dan memungkinkan penghematan daya.

2. LANDASAN TEORI

a. Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah sebuah board elektronik yang memiliki beberapa mikroprosesor dan memori yang digabungkan menjadi suatu sistem untuk menjalankan suatu sistem otomatis atau sistem kontrol. Sistem yang menggunakan mikrokontroler sering disebut sebagai *embedded system* atau *dedicated system* (Wahyuni, 2015).

*Corresponding author. Duma Kristina Yanti Hutapea
Email address: duma.kristina@atmajaya.ac.id

Mikrokontroler yang digunakan pada simulasi kali ini adalah Arduino UNO. Arduino UNO adalah mikro-kontroler yang menggunakan basis IC ATmega328. Arduino ini terdiri dari 14 pin input-output dengan 6 pin yang dapat berfungsi sebagai output PWM, 6 input analog (16 MHz osilator kristal), koneksi USB, input power, dan tombol reset. Pin-pin ini merupakan pin yang umum digunakan untuk operasi mikro-kontroler, baik membaca nilai dari sen-sor, ataupun memberikan perintah pada aktuator. Mikrokontroler terhubung ke komputer dengan kabel USB. Sumber-sumber tegangan bisa didapat dari adap-tor AC-DC atau baterai (Components101.com, 2011).



Gambar 1.
Arduino UNO

b. Motor DC

Motor DC merupakan salah satu jenis motor yang mengubah gaya listrik menjadi gaya gerak listrik dengan menggunakan arus searah atau DC (Wahyuni, 2015).

Motor DC dapat menghasilkan putaran atau biasa dapat disebut dengan Revolutions Per Minute (RPM). Arah putaran dari motor DC dapat diubah dengan cara membalikan polaritas yang diberikan pada motor DC tersebut (Aprilyani et al., 2019).



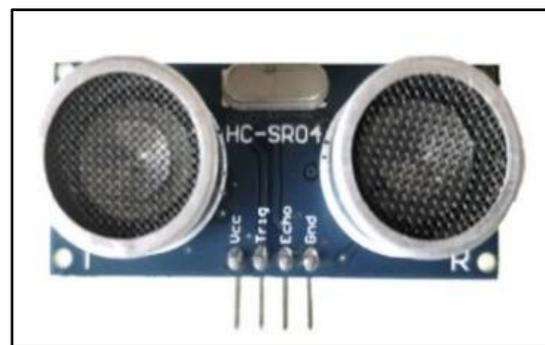
Gambar 1.
Motor DC

Motor DC memiliki prinsip kerja dengan mengikuti kaidah pada Gaya Lorentz, yang

berbunyi “Jika sebatang penghantar listrik yang dialiri arus berada di dalam medan magnet, maka pada kawat penghantar tersebut akan terbentuk suatu gaya” (Bagia dan Parsa, 2020). Penghantar listrik tersebut akan bergerak di dalam medan magnet dan menyebabkan terjadinya gaya gerak listrik induksi (Bagia dan Parsa, 2020).

c. Sensor Ultrasonik

Dalam perancangan proyek ini, sensor ultrasonik yang digunakan adalah sensor HC-SR04. Sensor HC-SR04 merupakan sensor yang dapat mengu-bah besaran listrik menjadi gelombang ultrasonik, dimana gelombang ini di-manfaatkan untuk melakukan penguku-ran jarak objek terhadap sensor (Purwanto et al., 2019). Sensor HC-SR04 memiliki dua unit, yaitu transmitter dan receiver (Purwanto et al., 2019).



Gambar 3.
Sensor HC-SR04

Dalam penggunaan sensor HC-SR04, dibutuhkan tegangan DC sebesar 5 V dan arus sebesar 15 mA . Selain itu, sensor HC-SR04 dapat melakukan pengukuran jarak berkisar 2 cm sampai dengan 4 m dengan sudut deteksi maksimal sebesar 15° (Purwanto et al., 2019).

Sensor HC-SR04 memiliki em-pat pin, yang diantaranya terdiri dari pin Vcc, pin Trig, pin Echo, dan pin Ground. Fungsi-fungsi dari masing-masing pin dari sensor HC-SR04 dapat ditunjukkan oleh Tabel 1.

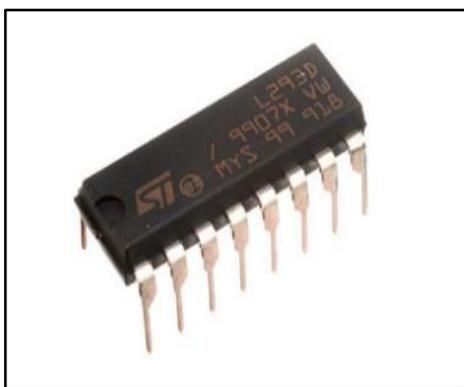
Tabel 1.
Pin-pin sensor HC-SR04

Nama Pin	Fungsi
Vcc	Sebagai sumber tegangan kerja dari sensor HC-SR04, berkisar 5 V.
Trig	Mengirimkan gelombang ultrasonik.
Echo	Menerima pantulan gelombang ultrasonik.
Ground	Menghubungkan ke ground dari suatu rangkaian.

Sensor HC-SR04 bekerja dengan memanfaatkan *transmitter* dan *receiver* melalui pin Trig dan pin Echo. Mula-mula, pin Trig yang berperan sebagai transmitter akan memancarkan sinyal ultrasonik dan kemudian sinyal tersebut akan merambat sebagai sinyal atau gelombang bunyi (Sukmawati et al., 2020). Ketika gelombang tersebut mengenai objek, maka gelombang ini akan dipantulkan dan diterima oleh pin Echo yang berperan sebagai *receiver* (Sukmawati et al., 2020).

d. Driver Motor L293D

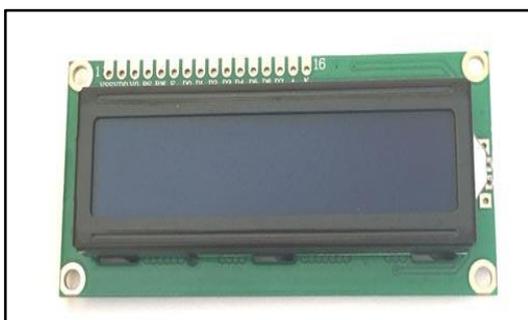
Driver Motor L293D adalah driver quadruple half-H arus tinggi yang dapat menyediakan arus sampai dengan 600 mA pada tegangan yang berkisar 4.5 V sampai 36 V. Driver atau pengendali ini dibuat untuk mengendalikan beban induktif seperti solenoida, motor stepper, serta beban arus tinggi atau tegangan tinggi lainnya dalam aplikasi suplai positif (Syaiful, 2007).



Gambar 4.
Driver L293D

e. Liquid Crystal Display (LCD)

LCD 16x2 display adalah layar yang tersusun dari Liquid Crystal Display yang dapat memiliki 2 baris dan mampu menampilkan 16 karakter dalam tiap baris. Hal tersebutlah yang membuat LCD tipe ini disebut 16x2. Ukuran setiap karakter adalah sebesar 5x8 = 40 piksel, sehingga total terdapat 1280 piksel dalam LCD Display 16x2 (Sparkfun.com).



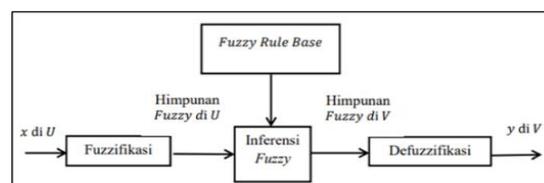
Gambar 2.
LCD display 16x2

f. Logika Fuzzy

Logika fuzzy merupakan salah satu logika yang digunakan untuk pengambilan keputusan berdasarkan input yang diberikan. Tidak seperti logika boolean, logika ini mempertimbangkan nilai-nilai yang terletak pada range 0 hingga 1. Sesuatu dapat bernilai “baik” maupun “buruk” sekaligus, tergantung besar nilai keanggotaannya. Logika fuzzy ini memiliki kelebihan di antaranya memiliki toleransi terhadap data-data yang tidak tepat, konsep matematis yang mudah dimengerti, dan penggunaan bahasa alami/bahasa sehari-hari (Hasanah dan Widiastuti, 2014).

Suatu sistem fuzzy terdiri atas beberapa tahapan seperti fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi. Tahap fuzzifikasi merupakan proses mengubah nilai tegas menjadi nilai fuzzy, dengan menggunakan beberapa bentuk fungsi keanggotaan seperti segitiga, trapesium, sigmoid, dan lain-lain. Nilai fuzzy dari hasil fuzzifikasi akan digunakan dalam tahapan inferensi. Di tahapan ini, terjadi pengaplikasian beberapa aturan (*rule base*) sesuai dengan pengalaman para pakar maupun peneliti. Terdapat beberapa metode yang digunakan dalam proses inferensi yakni metode Sugeno, Mamdani, dan Tsukamoto.

Tahapan terakhir dari sistem fuzzy ialah defuzzifikasi. Pada defuzzifikasi, terjadi perubahan kembali dari nilai fuzzy ke nilai tegas. Defuzzifikasi dapat dilakukan dengan metode Mean of Maximum (MOM), Largest of Maximum (LOM), Smallest of Maximum (SOM), Center of Area (CoA), dan bisector (Sujarwata, 2014). Adapun skema sistem fuzzy secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar berikut:



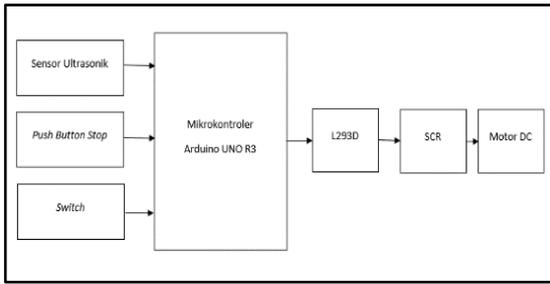
Gambar 6.
Skema sistem fuzzy

3. METODOLOGI PENELITIAN DAN PENGUJIAN

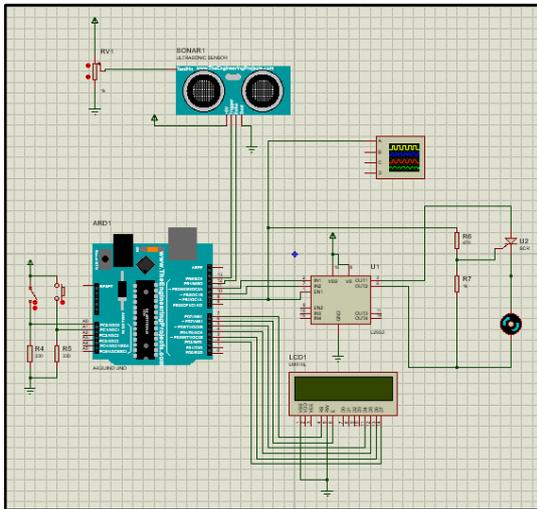
a. Blok Diagram

Penelitian ini menggunakan software Proteus dan Arduino IDE untuk merancang sistem pengendalian motor DC menggunakan logika fuzzy. Software Proteus berisikan rangkaian sistem. Arduino IDE sendiri merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk membuat program logika fuzzy yang nantinya akan diinjeksi ke Proteus.

Berikut adalah blok diagram dan rangkaian skematik dari rancangan sistem.



Gambar 7.
Blok diagram rancangan sistem



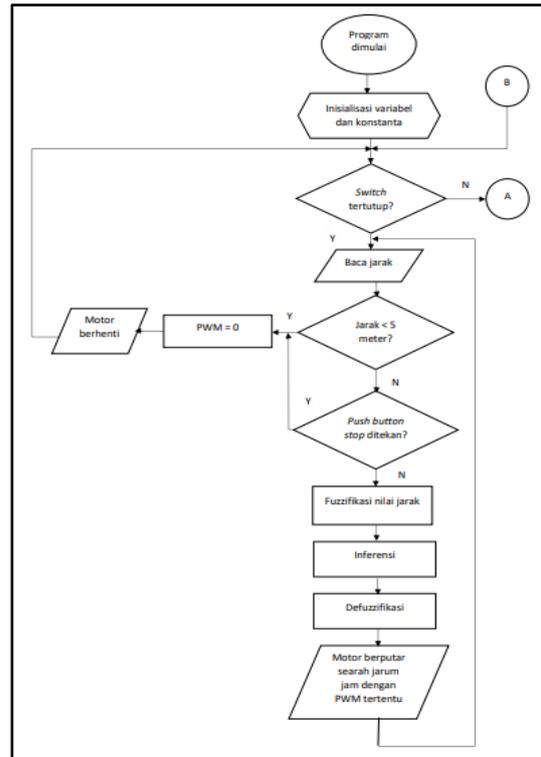
Gambar 8.
Rangkaian skematik

Adapun penjelasan dari diagram blok tersebut yaitu:

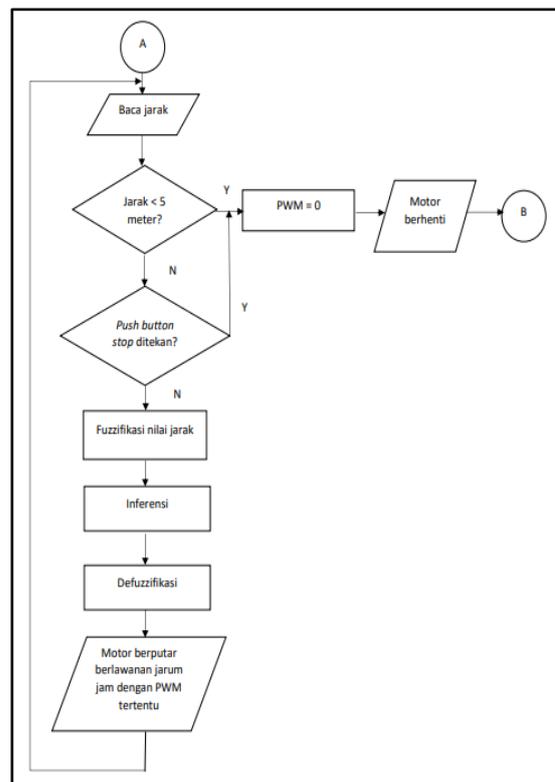
- Sensor ultrasonik berfungsi untuk membaca jarak. Nilai jarak akan menjadi input bagi sistem fuzzy.
- Push button stop berguna untuk memberhentikan motor secara darurat.
- Switch berfungsi untuk mengindikasikan arah putaran motor.
- Mikrokontroler yang digunakan yakni Arduino UNO R3. Mikrokontroler ini berfungsi untuk mengatur masukan (dari sensor) dan keluaran berupa PWM untuk mengatur kecepatan motor DC.
- IC L293D merupakan suatu motor driver yang mampu mengatur arah putaran dan kecepatan motor. IC ini nantinya memperoleh sinyal dari mikrokontroler.
- Silicon Controlled Rectifier (SCR) digunakan sebagai pemicu pengaktifan motor DC.

b. Flowchart dan Cara Kerja

Dalam merancang suatu sistem, diperlukan suatu diagram alir kegiatan/flowchart. Flowchart sendiri juga berfungsi untuk menjelaskan cara kerja sistem. Adapun flowchart perancangan sistem ini ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.



Gambar 9.
Flowchart (bagian 1)



Gambar 10.
Flowchart (bagian 2)

Sistem ini dirancang mampu mengatur kecepatan motor DC dengan jarak maksimum 100 meter (asumsi sensor ultrasonik mampu membaca jarak hingga 100 meter). Mula-mula

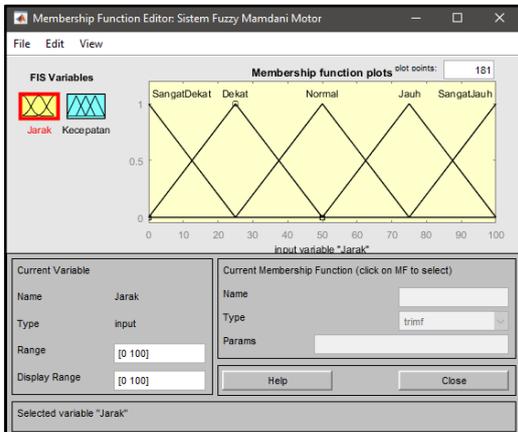
dilakukan pembacaan terhadap jarak dengan menggunakan sensor ultrasonik. Nilai dari jarak tersebut akan diinput ke sistem fuzzy. Sistem fuzzy nantinya akan menghasilkan output berupa PWM yang mampu mengatur kecepatan dari motor DC.

Selain itu, terdapat switch yang mampu mengubah arah putaran motor. Switch yang ditekan akan menghasilkan putaran searah jarum jam pada motor. Sedangkan bila terbuka, motor akan berputar berlawanan arah jarum jam. Untuk mengatur arah putaran motor melalui switch, motor DC harus dalam keadaan mati terlebih dahulu. Motor DC dapat berhenti bila push button stop ditekan atau jarak yang terbaca oleh sensor ultrasonik kurang dari 5 meter.

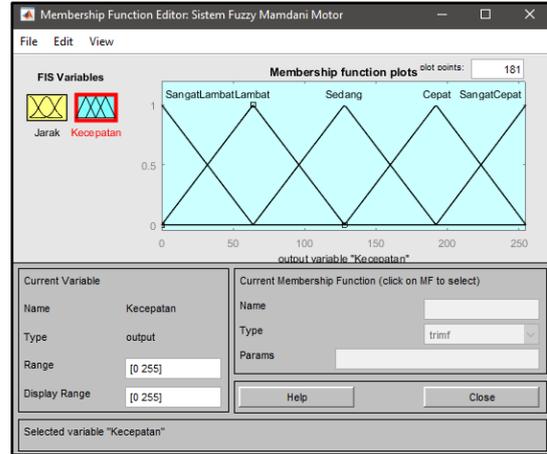
c. Perancangan Sistem Fuzzy

Arsitektur logika fuzzy yang diterapkan pada sistem ini yaitu Single Input Single Output (SISO) dengan metode Mamdani. Pemilihan metode Mamdani didasari karena terdapat library yang mampu membuat kinerja mikrokontroler lebih efisien (tidak memerlukan resources code berlebih) dan pengecekannya dapat melalui MATLAB. Input sistem fuzzy berupa nilai jarak yang diperoleh dari pembacaan sensor ultrasonik. Nilai jarak mengalami fuzzifikasi dengan menggunakan fungsi keanggotaan (Membership Function).

Fungsi keanggotaan yang digunakan bertipe segitiga. Variabel fuzzy "Jarak" terdiri atas lima himpunan fuzzy yaitu SangatDekat, Dekat, Normal, Jauh, dan SangatJauh. Sementara variabel fuzzy output (Kecepatan) terdiri dari SangatLambat, Lambat, Sedang, Cepat, dan SangatCepat. Fungsi keanggotaan untuk variabel "Jarak" dan variabel "Kecepatan" dapat dilihat pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11. Fungsi keanggotaan "Jarak"



Gambar 12. Fungsi keanggotaan pada "Kecepatan"

Proses fuzzifikasi dilakukan dengan cara menggunakan metode matematika berupa persamaan garis. Persamaan garis ini nantinya akan memperoleh nilai y (derajat keanggotaan) dari suatu titik x, dengan x merupakan jarak hasil pembacaan sensor ultrasonik. Apabila dilihat pada persamaan di atas, masing-masing himpunan pada variabel fuzzy "Jarak" dan "Kecepatan" memiliki batasnya masing-masing. Batas atau range masing-masing himpunan yaitu sebagai berikut.

$$\mu_{\text{Jarak}} \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ \frac{25-x}{25}, & 0 \leq x \leq 25 \\ 0, & x \geq 25 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

$$\mu_{\text{Dekat}}[\text{Jarak}] \begin{cases} 0, & x \leq 0 \text{ atau } x \geq 50 \\ \frac{50-x}{50-25}, & 25 \leq x \leq 50 \\ \frac{x-0}{25-0}, & 0 \leq x \leq 25 \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

$$\mu_{\text{Normal}}[\text{Jarak}] \begin{cases} 0, & x \leq 25 \text{ atau } x \geq 75 \\ \frac{75-x}{75-50}, & 50 \leq x \leq 75 \\ \frac{x-25}{50-25}, & 25 \leq x \leq 50 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

$$\mu_{\text{Jauh}}[\text{Jarak}] \begin{cases} 0, & x \leq 50 \text{ atau } x \geq 100 \\ \frac{100-x}{100-75}, & 75 \leq x \leq 100 \\ \frac{x-50}{75-50}, & 50 \leq x \leq 75 \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

$$\mu_{\text{SangatJauh}}[\text{Jarak}] \begin{cases} 0, x \leq 75 \\ \frac{x-75}{100-75}, 75 \leq x \leq 100 \\ 1, x \geq 100 \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

$$\mu_{\text{SangatLambat}}[\text{Kecepatan}] \begin{cases} 1, x \leq 64 \\ \frac{64-x}{64}, 0 \leq x \leq 64 \\ 0, x \geq 64 \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

$$\mu_{\text{Lambat}}[\text{Kecepatan}] \begin{cases} 0, x \leq 0 \text{ atau } x \geq 128 \\ \frac{128-x}{128-64}, 64 \leq x \leq 128 \\ \frac{x-0}{64-0}, 0 \leq x \leq 64 \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

$$\mu_{\text{Sedang}}[\text{Kecepatan}] \begin{cases} 0, x \leq 64 \text{ atau } x \geq 192 \\ \frac{192-x}{192-128}, 128 \leq x \leq 192 \\ \frac{x-64}{128-64}, 64 \leq x \leq 128 \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

$$\mu_{\text{Cepat}}[\text{Kecepatan}] \begin{cases} 0, x \leq 128 \text{ atau } x \geq 255 \\ \frac{255-x}{255-192}, 192 \leq x \leq 255 \\ \frac{x-128}{192-128}, 128 \leq x \leq 192 \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

$$\mu_{\text{SangatCepat}}[\text{Kecepatan}] \begin{cases} 0, x \leq 192 \\ \frac{x-192}{255-192}, 192 \leq x \leq 255 \\ 1, x \geq 255 \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

Berdasarkan metode matematis tersebut, range masing-masing himpunan dapat disederhanakan seperti yang terlihat pada tabel 2 dan tabel 3.

Table 2.
Range Himpunan Fuzzy Variabel "Jarak"

Variabel Linguistik	Range (m)
Sangat Dekat	0-25
Dekat	0-50
Normal	25-75
Jauh	50-100
Sangat Jauh	75-100

Table 3.
Range Himpunan Fuzzy Variabel "Kecepatan"

Variabel Linguistik	Range (PWM)
SangatLambat	0-64
Lambat	0-128
Sedang	64-192
Cepat	128-255
SangatCepat	192-255

Hasil dari fuzzifikasi selanjutnya akan diproses kembali, dengan tahapan yang dikenal sebagai inferensi. Pada tahap ini, terjadi penerapan aturan-aturan (rule base) yang telah dibuat sesuai dengan pemikiran logis dan akal manusia. Adapun rule base yang disusun dapat dilihat dari tabel berikut ini.

Table 4.
Range Himpunan Fuzzy Variabel "Kecepatan"

If	Jarak	Then	Kecepatan
	Sangat Dekat		Sangat Lambat
	Dekat		Lambat
	Normal		Sedang
	Jauh		Cepat
	Sangat Jauh		Sangat Cepat

Tahap selanjutnya setelah melakukan inferensi ialah defuzzifikasi. Input dari defuzzifikasi adalah himpunan fuzzy yang didapat dari komposisi aturan yang telah diberikan sebelumnya. Output dari defuzzifikasi ini berupa nilai pada domain himpunan fuzzy tersebut. Pada perancangan sistem ini, digunakan metode Center of Area (COA) seperti yang dirumuskan pada persamaan berikut.

$$Z^* = \frac{\int_z z \mu(z) dz}{\int_z \mu(z) dz} \dots\dots\dots (11)$$

Ultrasonik yaitu sebesar 60 m, sehingga menghasilkan kecepatan sebesar 154 PWM. Langkah pertama yang harus dilakukan untuk mengubah nilai tersebut adalah dengan melakukan fuzzifikasi terhadap nilai 60 m. Hasil fuzzifikasi akan berupa nilai derajat keanggotaannya terhadap masing-masing himpunan. Berikut adalah perhitungan yang dilakukan dengan menggunakan persamaan matematika yang telah dirumuskan sebelumnya.

$$\mu_{\text{SangatDekat}}[60] = 0 \dots\dots\dots (12)$$

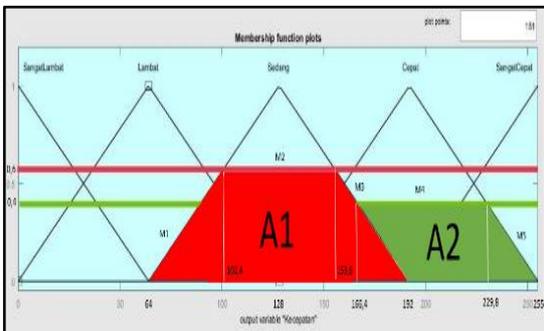
$$\mu_{\text{Dekat}}[60] = 0 \dots\dots\dots (13)$$

$$\mu_{\text{Normal}}[60] = \frac{75-x}{75-50} = 0,6 \dots\dots\dots (14)$$

$$\mu_{\text{Jauh}}[60] = \frac{x-50}{75-50} = 0,4 \dots\dots\dots (15)$$

$$\mu_{\text{SangatJauh}}[60] = 0 \dots\dots\dots (16)$$

Setelah proses fuzzifikasi selesai, akan diterapkan rule base (penerapan fungsi implikasi) pada nilai-nilai derajat keanggotaan yang telah diperoleh. Dikarenakan arsitektur sistem fuzzy ini bersifat SISO, maka dapat diketahui nilai $\mu_{Normal}[60]$ akan memotong kurva $\mu_{Sedang}[Kecepatan]$ dan nilai $\mu_{Jauh}[60]$ memotong kurva $\mu_{SangatCepat} [Kecepatan]$. Berikut adalah gambar perpotongan masing-masing nilai tersebut.



Gambar 13.
Hasil komposisi antar aturan

Selanjutnya dilakukan defuzzifikasi pada tahap akhir. Langkah yang harus dilakukan adalah menghitung momen dan luas dari grafik hasil komposisi antar aturan. Perhitungan luas A1 dan A2 ditunjukkan pada persamaan berikut ini:

$$\mu_{Sedang}[Kecepatan] = \frac{x-64}{128-64} \dots\dots\dots (17)$$

$$0,6 = \frac{x-64}{128-64} \dots\dots\dots (18)$$

$$x = 102,4 \dots\dots\dots (19)$$

$$\mu_{Sedang}[Kecepatan] = \frac{192-x}{192-128} \dots\dots\dots (20)$$

$$0,6 = \frac{192-x}{192-128} \dots\dots\dots (21)$$

$$x = 153,6 \dots\dots\dots (22)$$

$$a = 153,6 - 102,4 = 51,2 \dots\dots\dots (23)$$

$$b = 192 - 64 = 128 \dots\dots\dots (24)$$

$$A1 = \left(\frac{51,2+128}{2}\right) 0,6 \dots\dots\dots (25)$$

$$A1 = 53,76 \dots\dots\dots (26)$$

$$A2 = (255 - 192) 0,4 \dots\dots\dots (27)$$

$$A2 = 25,2 \dots\dots\dots (28)$$

Selain perhitungan luas, dilakukan perhitungan momen M1, M2, M3, M4, dan M5.

$$M1 = \int_{64}^{102,4} \frac{z-64}{64} z dz = 1032,192 \dots\dots\dots (29)$$

$$M2 = \int_{102,4}^{153,6} 0,6 z dz = 3932,16 \dots\dots\dots (30)$$

$$M3 = \int_{153,6}^{166,4} \frac{192-z}{64} z dz = 1021,269 \dots\dots\dots (31)$$

$$M4 = \int_{166,4}^{229,8} (0,4) z dz = 5023,816 \dots\dots\dots (32)$$

$$M5 = \int_{229,8}^{255} \frac{255-z}{63} z dz = 1200,5 \dots\dots\dots (33)$$

$$Z^* = \frac{M1+M2+M3+M4+M5}{A1+A2} \dots\dots\dots (34)$$

$$Z^* = 154,63 \dots\dots\dots (35)$$

d. Pengujian Sistem

Pengujian sistem menggunakan aplikasi MATLAB sebagai pembanding hasil keluaran program oleh Arduino IDE. Dalam melakukan pemrograman pada sistem fuzzy, digunakan library khusus metode Mamdani untuk kode program yang lebih efisien dan efektif. Adapun hasil percobaan yang dilakukan dapat ditunjukkan pada tabel 5.

Table 5.
Range Himpunan Fuzzy Variabel "Jarak"

Jarak (m)	Matlab (PWM)	Arduino (PWM)	Error (%)
10	52	52,81	1,55
20	62,5	61,61	1,42
30	79,5	80,44	1,18
40	101	101,13	0,12
50	128	128	0
60	154	154,51	0,33
70	176	175,17	0,47
80	193	194	0,5
90	203	202,63	0,18
100	235	234,65	0,14

Dari tabel hasil pengujian di atas, dapat dilihat bahwa persentase error yang diperoleh dari pengujian berkisar 0-1,55 %. Adapun perbedaan nilai PWM tersebut dapat disebabkan karena sistem pembulatan yang dilakukan oleh MATLAB maupun Arduino IDE. Sistem tersebut berhasil dijalankan mengingat semakin besar nilai jarak, maka semakin cepat putaran motor DC (PWM semakin besar). Hal itu sesuai dengan logika/penalaran manusia. Sistem fuzzy yang diterapkan juga mampu menentukan besaran PWM yang diberikan sehingga terjadi penghematan daya dibanding bila digunakan logika biasa. Selain pengujian besaran PWM, pengujian juga dilakukan pada arah putar motor DC. Pergantian arah putaran motor DC berhasil dilakukan dengan syarat kondisi motor harus berhenti terlebih dahulu, sesuai logika dimana mobil harus berhenti apabila ingin mengganti ke persneling mundur.

4. KESIMPULAN

Simulasi pengaturan kecepatan putar motor DC menggunakan metode logika fuzzy berhasil membandingkan perbedaan nilai keluaran dari logika fuzzy yang dilakukan pada simulasi aplikasi Proteus dan aplikasi MATLAB. Dari hasil pengujian pada rancangan di Proteus, error terbesar yang didapatkan senilai 1,55 %. Error disini mengacu pada perbedaan pembulatan antara rancangan sistem logika fuzzy pada MATLAB dengan penerapan pada Arduino UNO yang dilakukan melalui simulasi Proteus. Selain itu, pengujian ini membuktikan pula bahwa library logika fuzzy yang digunakan dapat bekerja dengan baik sesuai teori.

REFERENCES

1. Aprilyani, Irianto & Sunarno, E. 2019. Desain dan Komparasi Kontrol Kecepatan Motor DC. *Jurnal ECOTIPE*, 7, 127-134.
2. Bagia, I. N. & Parsa, I. M. 2020. *Motor-Motor Listrik*, Bali, CV. Rasi Terbit.
3. Components101.Com. 2011. *Datasheet HC-SR04* [Online]. Available: https://components101.com/asset/sites/default/files/component_datasheet/HCSR04%20Datasheet.pdf [Accessed 24 Oktober 2021].
4. Hasanah, S. N. & Widiastuti, N. I. 2014. Representasi Emosi Menggunakan Logika Fuzzy Pada Permainan Bonny's Tooth Booth *Jurnal Ilmiah Komputer dan Informatika (Komputa)*, 3, 68-73.
5. Nugroho, T. I., Sujanarko, B. & Hadi, W. 2014. Kontrol Kecepatan Motor DC Berbasis Logika Fuzzy. *Artikel Ilmiah Hasil Penelitian Mahasiswa Tahun 2014*, 1, 1-6.
6. Ondruš, J., Kolla, E., Vertal', P. & Šarić, Ž. 2020. How Do Autonomous Cars Work? *Transportation Research Procedia*, 44, 226-233.
7. Purwanto, H., Riyadi, M., Astuti, D. W. W. & Kusuma, I. W. a. W. 2019. Komparasi Sensor Ultrasonik HC-SR04 dan JSN-SR04T untuk Aplikasi Sistem Deteksi Ketinggian Air. *Jurnal SIMETRIS*, 10, 717-724.
8. Sparkfun.Com. *Specification of LCD Module* [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/A DM1602K-NSW-FBS 3.3v.pdf> [Accessed 25 Oktober 2021].
9. Sujarwata 2014. *Buku Ajar Sistem Fuzzy dan Aplikasinya*, Yogyakarta, Deepublish.
10. Sukmawati, N., Asti, S. & N, R. M. G. 2020. Rancang Bangun Seleksi Kendaraan Sederhana Menggunakan Sensor HC-SR04. *SAINTIFIK Jurnal Matematika, Sains, dan Pembelajarannya*, 6, 49-56.
11. Syaiful, M. 2007. *Sistem Pengendali Motor DC dengan PWM*. Universitas Mercu Buana.
12. Wahyuni, S. 2015. Rancang Bangun Prototipe Elevator Menggunakan Mikrokontroler Arduino Atmega 328P. *Jurnal Teknologi Elektro*, 4, 100-112.