

IMPLEMENTASI METODE FUZZY LOGIC MAMDANI UNTUK PERGERAKAN *MOBILE ROBOT PLANT AIR PURIFIER* BERDASARKAN KUALITAS UDARA

Baruna Putra Pratama^{1*}, Niksen Alfarizal², Yeni Irdayanti³

^{1,2,3}Politeknik Negeri Sriwijaya; Jalan Srijaya Negara, Bukit Besar, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30139 ; Telpon : +620711353414 Fax: +62711355918

Keywords: Mobile Robot; Fuzzy Mamdani; Air Quality; Indoor Air Purifier; ESP32.

Correspondent Email:
barunaputra1234@gmail.com

Abstrak. Kualitas udara dalam ruangan (*indoor air quality*) merupakan faktor penting yang memengaruhi kesehatan dan kenyamanan manusia. Air purifier konvensional umumnya bersifat statis sehingga kurang efektif menjangkau seluruh area ruangan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan metode Fuzzy Mamdani pada *Mobile Robot Plant Air Purifier* dalam menentukan pergerakan robot berdasarkan kondisi kualitas udara dan keberadaan rintangan. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor MH-Z19C untuk mendeteksi CO₂, sensor Sharp GP2Y1010AU0F untuk mendeteksi PM2.5, sensor MS1100 untuk mendeteksi VOC/HCHO, serta tiga sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mendeteksi rintangan. Metode Fuzzy Mamdani diterapkan melalui proses fuzzifikasi, inferensi berbasis aturan (*rule base*), dan defuzzifikasi metode *Centroid* untuk menentukan pergerakan robot serta aktivasi kipas. Robot bergerak secara acak sambil memantau kualitas udara dan menghindari rintangan secara otomatis. Ketika kualitas udara berada pada kondisi buruk, robot berhenti dan mengaktifkan kipas untuk menghisap udara serta mendukung proses pemurnian udara menggunakan tanaman lidah mertua. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pemantauan kualitas udara, navigasi otonom, dan pengambilan keputusan berdasarkan kondisi lingkungan sehingga meningkatkan efektivitas pemurnian udara dalam ruangan serta mendukung terciptanya lingkungan yang lebih sehat.



Copyright © 2026 The Author(s), Published by Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

Abstract. *Indoor air quality is an important factor affecting human health and comfort. Conventional air purifiers are generally static, making them less effective in covering the entire indoor environment. This study aims to analyze the implementation of the Fuzzy Mamdani method in a Mobile Robot Plant Air Purifier to determine the robot's movement based on indoor air quality conditions and the presence of obstacles. The system uses an ESP32 microcontroller integrated with an MH-Z19C sensor for CO₂ detection, a Sharp GP2Y1010AU0F sensor for PM2.5 detection, an MS1100 sensor for VOC/HCHO detection, and three HC-SR04 ultrasonic sensors for obstacle detection. The Fuzzy Mamdani method is implemented through fuzzification, rule-based inference, and Centroid defuzzification to determine the robot's movement and fan activation. The robot moves randomly while continuously monitoring air quality and automatically avoiding obstacles. When poor air quality is detected, the robot stops and activates a fan to draw in polluted air and support the air purification process using a snake plant (*Sansevieria trifasciata*). The results show that the proposed system is capable of adaptive indoor air quality monitoring, autonomous navigation, and environmental decision-making, thereby improving the effectiveness of indoor air purification and supporting a healthier indoor environment.*

1. PENDAHULUAN

Kualitas udara dalam ruangan (*indoor air quality*) merupakan faktor penting yang mempengaruhi kesehatan dan kenyamanan manusia. Berbagai aktivitas sehari-hari seperti memasak, penggunaan alat elektronik, serta keberadaan penghuni dapat menghasilkan polutan yang menurunkan kualitas udara. Paparan polusi udara dalam jangka panjang dapat menyebabkan gangguan kesehatan serius seperti iritasi saluran pernapasan, sakit kepala, hingga penyakit paru-paru [1].

Salah satu solusi yang umum digunakan untuk meningkatkan kualitas udara adalah penggunaan air purifier. Namun, perangkat air purifier konvensional bersifat statis sehingga hanya mampu membersihkan udara pada area tertentu dan kurang efektif dalam menjangkau seluruh ruangan, terutama pada ruangan yang luas atau memiliki sekat. Oleh karena itu, dikembangkan mobile robot plant air purifier yang mampu bergerak secara otomatis untuk menjangkau berbagai area dalam ruangan [2]. Beberapa penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi mobile robot untuk purifikasi udara dan navigasi otomatis. Penelitian [3] mengembangkan robot purifikasi udara dengan algoritma Gaussian Process Model dan Hybrid Artificial Potential Field (HAPF) yang mampu mengarahkan robot ke area polusi tinggi di lingkungan simulasi dan nyata. Penelitian [4] mengusulkan metode DV-SOATT untuk multiple mobile robot yang menggabungkan jarak dan kecepatan relatif untuk menghindari tabrakan. Penelitian [5] mengimplementasikan algoritma Maze Wall Following pada mobile robot beroda dan berhasil meningkatkan tingkat keberhasilan navigasi dari 0% menjadi 81%.

Dalam penelitian ini, digunakan metode Fuzzy Mamdani sebagai pendekatan pengambilan keputusan pergerakan robot. Metode ini mampu menangani ketidakpastian dan memberikan keputusan yang lebih fleksibel dibandingkan metode konvensional berbasis threshold [6]. Sensor yang digunakan meliputi MH-Z19C untuk konsentrasi CO₂ [7], PM2.5 Sharp GP2Y1014AU0F untuk partikel debu [8], dan MS1100 untuk gas VOC/formaldehida [9]. Data dari ketiga sensor tersebut diolah menggunakan Fuzzy Mamdani untuk menentukan kecepatan dan arah pergerakan mobile robot secara adaptif.

Tanaman lidah mertua (*Sansevieria trifasciata*) diintegrasikan sebagai penyaring alami karena kemampuannya menyerap CO₂, CO, dan senyawa berbahaya lainnya bahkan pada malam hari melalui metabolisme CAM (Crassulacean Acid Metabolism) [10]. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pergerakan mobile robot plant air purifier berdasarkan kualitas udara menggunakan metode Fuzzy Mamdani, sehingga robot dapat bergerak lebih halus dan efektif dalam meningkatkan kualitas udara dalam ruangan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mobile Robot Plant Air Purifier

Mobile Robot Plant Air Purifier merupakan sistem pemurni udara bergerak yang menggabungkan teknologi robotika, sensor kualitas udara, dan tanaman sebagai media pemurnian udara alami. Berbeda dengan *air purifier* konvensional yang bersifat statis, sistem ini mampu berpindah lokasi secara otomatis sehingga dapat menjangkau berbagai area dalam ruangan yang memiliki tingkat pencemaran udara berbeda.

Pada penelitian ini, *Mobile Robot Plant Air Purifier* menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali yang mengintegrasikan beberapa sensor, yaitu sensor MH-Z19C untuk mendeteksi konsentrasi karbon dioksida (CO₂), sensor Sharp GP2Y1014AU0F untuk mendeteksi konsentrasi partikel PM2.5, sensor MS1100 untuk mendeteksi senyawa organik volatil (*Volatile Organic Compounds* atau VOC/HCHO), serta tiga sensor ultrasonik HC-SR04 yang berfungsi mendeteksi rintangan selama proses navigasi. Data dari seluruh sensor diproses menggunakan metode Fuzzy Mamdani untuk menentukan keputusan pergerakan robot dan aktivasi kipas berdasarkan kondisi kualitas udara yang terdeteksi.

Robot bergerak secara acak (*random*) sambil melakukan pemantauan kualitas udara secara kontinu. Selama bergerak, sensor ultrasonik memungkinkan robot menghindari rintangan secara otomatis sehingga navigasi dapat berlangsung dengan aman. Ketika sistem mendeteksi kualitas udara yang berada pada kategori buruk, robot akan berhenti pada lokasi tersebut dan mengaktifkan kipas untuk mengalirkan udara tercemar menuju tanaman lidah mertua (*Sansevieria trifasciata*) sebagai

media pemurnian udara alami. Setelah kualitas udara kembali membaik, robot dapat melanjutkan proses pemantauan ke area lain.

Penggunaan tanaman lidah mertua dipilih karena tanaman ini dikenal memiliki kemampuan menyerap karbon dioksida (CO_2) serta beberapa polutan udara seperti senyawa organik volatil (VOC), sehingga dapat membantu meningkatkan kualitas udara dalam ruangan. Integrasi antara sistem robot bergerak, sensor kualitas udara, metode Fuzzy Mamdani, dan tanaman sebagai media pemurnian menghasilkan suatu sistem yang mampu melakukan pemantauan dan pemurnian udara secara adaptif sesuai dengan kondisi lingkungan.

Dengan konsep tersebut, *Mobile Robot Plant Air Purifier* diharapkan mampu meningkatkan efektivitas pemantauan dan pemurnian udara dibandingkan *air purifier* konvensional, karena robot dapat berpindah menuju berbagai area dalam ruangan tanpa memerlukan perpindahan secara manual oleh pengguna.

2.2 Sensor Kualitas Udara

Sistem pemantauan kualitas udara pada penelitian ini menggunakan tiga jenis sensor yang berfungsi mendeteksi parameter kualitas udara, yaitu konsentrasi karbon dioksida (CO_2), partikel debu $\text{PM}_{2.5}$, dan senyawa organik volatil (VOC). Ketiga sensor tersebut dipilih karena mampu memberikan informasi kondisi kualitas udara secara real-time sebagai masukan bagi metode Fuzzy Mamdani dalam menentukan pergerakan robot.

Sensor MH-Z19C merupakan sensor CO_2 berbasis teknologi Non-Dispersive Infrared (NDIR) dengan rentang pengukuran 0–5000 ppm dan akurasi $\pm(50 \text{ ppm} + 5\% \text{ nilai pembacaan})$. Sensor ini mendukung komunikasi UART dan PWM serta beroperasi pada suhu 0–50°C [7].

Sensor $\text{PM}_{2.5}$ Sharp GP2Y1014AU0F bekerja menggunakan kombinasi LED inframerah dan fototransistor untuk mendeteksi konsentrasi partikel halus ($\text{PM}_{2.5}$) di udara dengan rentang 0–500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Penelitian menunjukkan akurasi sensor ini mencapai 96,54% dengan waktu respons kurang dari 2 detik [8].

Sensor MS1100 merupakan sensor gas semikonduktor yang digunakan untuk mendeteksi konsentrasi VOC/formaldehida

(HCHO) dengan waktu respons kurang dari 10 detik dan akurasi sekitar 91% dalam kondisi operasional normal [9].

2.3 Sensor Ultrasonik HC-SR04

Sensor HC-SR04 menggunakan metode Time of Flight dengan memancarkan gelombang ultrasonik pada frekuensi 40 kHz untuk mendeteksi jarak objek dalam rentang 2–400 cm dengan akurasi $\pm 3 \text{ mm}$ dan sudut deteksi $\pm 15^\circ$ [12]. Sensor ini digunakan untuk navigasi dan obstacle avoidance pada mobile robot [13].

Pada penelitian ini, tiga sensor HC-SR04 ditempatkan pada bagian depan, kiri, dan kanan robot untuk mendeteksi keberadaan rintangan dari berbagai arah. Informasi jarak yang diperoleh dari ketiga sensor diproses oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan metode Fuzzy Mamdani sebagai dasar pengambilan keputusan arah pergerakan robot. Dengan konfigurasi tersebut, robot mampu menghindari rintangan secara otomatis selama bergerak melakukan pemantauan kualitas udara di dalam ruangan.

2.4 ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler dual-core Xtensa LX6 32-bit dengan frekuensi 240 MHz yang dilengkapi Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, mendukung berbagai antarmuka (UART, SPI, I2C, PWM, ADC) dan cocok untuk aplikasi IoT dan robotika [14].

Motor Driver BTS7960 menggunakan dua IC BTS7960 dalam konfigurasi H-Bridge yang mampu menangani arus hingga 43 A dengan kontrol kecepatan PWM frekuensi hingga 25 kHz, dilengkapi proteksi suhu, tegangan, dan arus berlebih [15].

Pada sistem mobile robot plant air purifier, ESP32 berfungsi sebagai pusat pengendali yang menerima data dari sensor kualitas udara dan sensor ultrasonik, kemudian memprosesnya menggunakan metode Fuzzy Mamdani untuk menghasilkan keputusan pergerakan robot. Selanjutnya, hasil keputusan tersebut dikirimkan ke motor driver BTS7960 untuk mengatur arah dan kecepatan putaran motor DC sehingga robot dapat bergerak sesuai dengan kondisi lingkungan yang terdeteksi, serta mampu menghindari rintangan secara otomatis dengan baik.

2.5 Tanaman Lidah Mertua sebagai Air Purifier Alami

Tanaman lidah mertua (*Sansevieria trifasciata*) terbukti efektif sebagai penyaring udara alami melalui mekanisme fitoremediasi. Tanaman ini mampu menyerap CO₂, CO, metana (CH₄), nitrogen oksida (NO_x), dan hidrogen sulfida (H₂S). Keunggulannya adalah kemampuan menyerap CO₂ dan melepaskan O₂ bahkan pada malam hari, menjadikannya ideal untuk lingkungan ruangan tertutup [10][16].

2.6 Fuzzy Logic Mamdani

Fuzzy Mamdani merupakan salah satu implementasi Fuzzy Inference System (FIS) yang paling banyak digunakan dalam sistem kendali dan pengambilan keputusan. Diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975, metode ini menggunakan aturan linguistik berbentuk if-then untuk merepresentasikan pengetahuan manusia dalam menyelesaikan permasalahan yang bersifat tidak pasti [6].

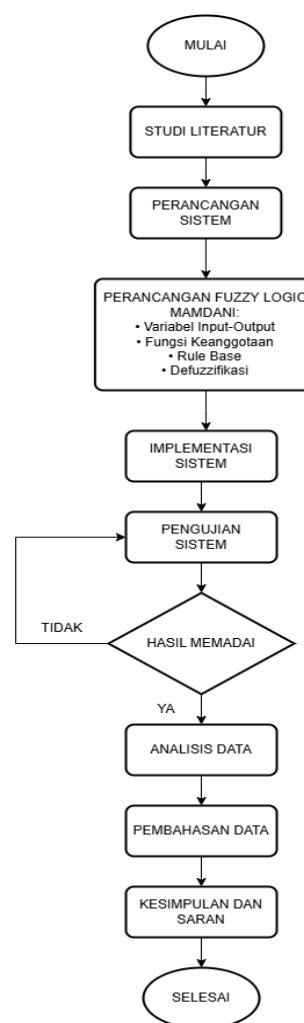
Proses kerja Fuzzy Mamdani terdiri dari empat tahap utama: (1) Fuzzifikasi, yaitu konversi nilai crisp dari sensor menjadi nilai keanggotaan linguistik berdasarkan fungsi keanggotaan (membership function); (2) Pembentukan basis aturan (rule base) berformat IF-THEN; (3) Inferensi Fuzzy menggunakan operator minimum dan maksimum; (4) Defuzzifikasi dengan metode Centroid (Center of Gravity) untuk menghasilkan nilai output crisp [6][11].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan merancang dan mengimplementasikan sistem *Mobile Robot Plant Air Purifier* berbasis metode Fuzzy Mamdani. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, implementasi sistem, pengujian, serta analisis hasil. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor MH-Z19C (CO₂), Sharp GP2Y1010AU0F (PM2.5), MS1100 (VOC/HCHO), dan tiga sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mendeteksi rintangan. Robot digerakkan menggunakan motor DC yang dikendalikan oleh motor driver BTS7960, sedangkan kipas digunakan untuk membantu

proses pemurnian udara menggunakan tanaman lidah mertua.

Data dari seluruh sensor diproses menggunakan metode Fuzzy Logic Mamdani melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi berbasis *rule base*, dan defuzzifikasi metode *Centroid* untuk menentukan arah pergerakan robot, kecepatan motor, dan aktivasi kipas. Robot bergerak secara acak (*random*) sambil memantau kualitas udara dan menghindari rintangan secara otomatis. Ketika kualitas udara berada pada kategori buruk, robot berhenti dan mengaktifkan kipas untuk membantu proses pemurnian udara. Selanjutnya, sistem diuji dan dianalisis untuk mengevaluasi kemampuan pemantauan kualitas udara, navigasi, serta pengambilan keputusan berdasarkan metode Fuzzy Mamdani.



Gambar 1. Flowchart Metode Penelitian

3.1 Metode Fuzzy Logic Mamdani

3.1.1 Penentuan Variabel Fuzzy

Penentuan variabel fuzzy dilakukan untuk menetapkan variabel masukan (*input*) dan keluaran (*output*) yang digunakan dalam metode Fuzzy Mamdani. Pada penelitian ini, variabel diperoleh dari sensor kualitas udara dan sensor ultrasonik, kemudian dikelompokkan ke dalam himpunan linguistik berdasarkan rentang nilai tertentu sebagai dasar proses fuzzifikasi.

3.1.2 Variabel Kualitas Udara

Variabel kualitas udara terdiri atas tiga parameter, yaitu konsentrasi karbon dioksida (CO₂) yang diukur menggunakan sensor MH-Z19C, konsentrasi partikel debu halus (PM2.5) yang dideteksi oleh sensor Sharp GP2Y1010AU0F, serta konsentrasi VOC yang diperoleh dari hasil kalibrasi sensor MS1100 menggunakan persamaan konversi berdasarkan nilai rasio (Rs/R0). Masing-masing variabel diklasifikasikan ke dalam dua himpunan linguistik, yaitu Baik dan Buruk, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel Kualias Udara

Variabel	Satuan	Kualitas Udara	
		Baik	Buruk
CO ₂	ppm	400–1100	900–2000
PM2.5	µg/m ³	0–35	25–100
VOC	ppm	0.10–0.35	0.25–1.00

3.1.3 Variabel Jarak

Selain parameter kualitas udara, sistem navigasi menggunakan tiga sensor ultrasonik HC-SR04 yang ditempatkan pada bagian depan, kiri, dan kanan robot untuk mendeteksi keberadaan rintangan. Setiap sensor dibagi ke dalam tiga himpunan linguistik, yaitu Dekat, Sedang, dan Jauh, sehingga robot mampu menentukan arah pergerakan sesuai kondisi lingkungan. Rentang variabel fuzzy untuk sensor ultrasonik ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Variabel Jarak

Variabel	Satuan	Jarak		
		Dekat	Sedang	Jauh
Depan	cm	2–40	30–70	60–200
Kiri	cm	2–40	30–70	60–200

Kanan	cm	2–40	30–70	60–200
-------	----	------	-------	--------

3.1.4 Variabel Output

Variabel keluaran (*output*) merupakan hasil pengolahan variabel masukan menggunakan metode Fuzzy Mamdani yang digunakan untuk menentukan aksi *Mobile Robot Plant Air Purifier*. Variabel output terdiri atas status pergerakan robot sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut.

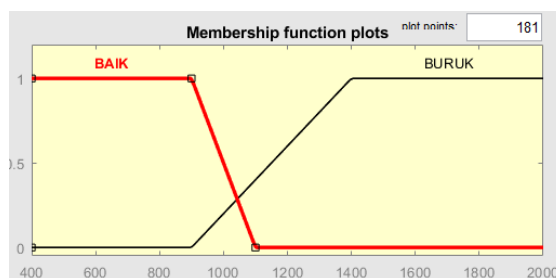
Tabel 3 Variabel Output

Variabel Output	Kualitas Udara	Aksi Robot
Status Pergerakan Robot	Baik	Bergerak.
	Buruk	Berhenti

Apabila salah satu parameter kualitas udara (CO₂, PM2.5, atau VOC) berada pada kondisi buruk, maka keluaran sistem fuzzy adalah "Berhenti" sehingga robot menghentikan pergerakan dan mengaktifkan kipas. Sebaliknya, apabila seluruh parameter berada pada kondisi baik, maka keluaran sistem adalah "Bergerak".

3.2. Perancangan Fungsi Keanggotaan (Membership Function)

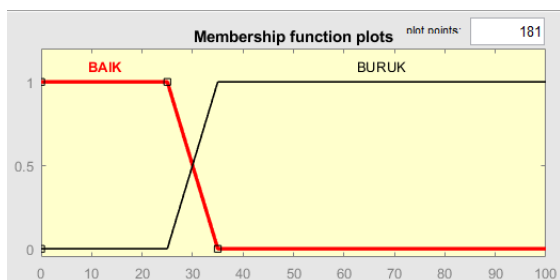
Fungsi keanggotaan (*membership function*) digunakan untuk merepresentasikan setiap variabel fuzzy ke dalam himpunan linguistik. Pada penelitian ini, terdapat empat variabel input dan dua variabel output. Variabel jarak yang diperoleh dari sensor ultrasonik dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy, yaitu Dekat, Sedang, dan Jauh, sedangkan variabel kualitas udara yang terdiri atas CO₂, PM2.5, dan VOC dibagi menjadi dua himpunan fuzzy, yaitu Baik dan Buruk.



Gambar 2. Membership Function CO₂

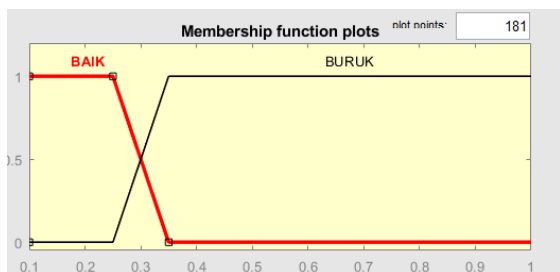
Variabel CO₂ menggunakan dua himpunan fuzzy, yaitu Baik dan Buruk, sebagaimana diperlihatkan pada **Gambar 2**. Himpunan Baik

memiliki rentang 400–1100 ppm, sedangkan himpunan Buruk berada pada rentang 900–2000 ppm. Kedua himpunan memiliki daerah irisan (*overlap*) untuk menghasilkan transisi keputusan yang lebih halus pada proses inferensi Fuzzy Mamdani.



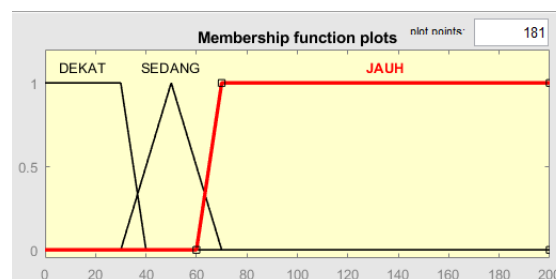
Gambar 3. Membership Function PM2.5

Fungsi keanggotaan variabel PM2.5 ditunjukkan pada **Gambar 3**. Variabel ini dibagi menjadi dua himpunan fuzzy, yaitu Baik dan Buruk. Himpunan Baik memiliki rentang nilai 0–35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan himpunan Buruk berada pada rentang 25–100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Daerah irisan (*overlap*) pada kedua himpunan digunakan untuk mendukung proses inferensi Fuzzy Mamdani.



Gambar 4. Membership Function VOC

Gambar 4. memperlihatkan fungsi keanggotaan variabel VOC yang terdiri atas dua himpunan fuzzy, yaitu Baik dan Buruk. Penentuan rentang fungsi keanggotaan didasarkan pada hasil kalibrasi sensor MS1100 sehingga nilai yang digunakan sesuai dengan karakteristik pembacaan sensor terhadap konsentrasi VOC. Rentang tersebut digunakan untuk merepresentasikan kondisi kualitas udara sebagai masukan pada sistem Fuzzy Mamdani. Dengan adanya dua himpunan fuzzy tersebut, perubahan nilai VOC dapat dipetakan secara bertahap sehingga sistem mampu menghasilkan keputusan yang lebih adaptif sesuai dengan kondisi udara yang terdeteksi.



Gambar 5 Membership Function Jarak

Fungsi keanggotaan variabel jarak ultrasonik ditunjukkan pada **Gambar 5**. Variabel ini dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy, yaitu Dekat, Sedang, dan Jauh. Fungsi keanggotaan yang sama diterapkan pada ketiga sensor ultrasonik (depan, kiri, dan kanan) untuk mendukung proses navigasi dan penghindaran rintangan secara otomatis.

3.4 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan tahapan dalam metode Fuzzy Mamdani yang mengubah data masukan (*crisp*) dari sensor menjadi nilai derajat keanggotaan pada setiap himpunan fuzzy. Nilai masukan yang diperoleh dari sensor CO₂, PM2.5, VOC, dan sensor ultrasonik dipetakan ke dalam fungsi keanggotaan yang telah dirancang sebelumnya. Hasil dari proses ini berupa derajat keanggotaan pada masing-masing himpunan fuzzy yang selanjutnya digunakan sebagai masukan pada proses inferensi berdasarkan *rule base* [20].

3.5 Rule Base

3.5.1 Rule Base Kualitas Udara

Rule base kualitas udara terdiri atas delapan aturan IF–THEN yang mengombinasikan tiga variabel masukan, yaitu CO₂, PM2.5, dan VOC, dengan satu variabel keluaran berupa status pergerakan robot. Aturan yang digunakan didasarkan pada kondisi kualitas udara, yaitu robot akan tetap bergerak apabila seluruh parameter berada pada kategori Baik. Sebaliknya, apabila salah satu atau lebih parameter berada pada kategori Buruk, maka robot akan berhenti dan kipas diaktifkan untuk mendukung proses pemurnian udara [21].

Tabel 4. Rule Base Kualitas Udara

Rule	CO ₂	PM2.5	VOC	Output
R1	Baik	Baik	Baik	Bergerak
R2	Baik	Baik	Buruk	Berhenti

R3	Baik	Buruk	Baik	Berhenti
R4	Baik	Buruk	Buruk	Berhenti
R5	Buruk	Baik	Baik	Berhenti
R6	Buruk	Baik	Buruk	Berhenti
R7	Buruk	Buruk	Baik	Berhenti
R8	Buruk	Buruk	Buruk	Berhenti

3.5.2 Rule Base Pergerakan

Rule base navigasi terdiri atas 27 aturan IF–THEN yang mengombinasikan tiga variabel masukan, yaitu jarak sensor ultrasonik depan, kiri, dan kanan, dengan satu variabel keluaran berupa arah pergerakan robot. Aturan ini dirancang agar robot mampu bergerak secara adaptif dalam menghindari rintangan. Apabila jalur di depan masih aman, robot akan bergerak maju. Sebaliknya, jika terdeteksi rintangan di depan, sistem akan menentukan arah belok ke kiri atau ke kanan berdasarkan kondisi ruang yang lebih aman menurut hasil pembacaan sensor ultrasonik.

Tabel 5. Rule Base Pergerakan

Rule	Depan	Kiri	Kanan	Output
R1	Jauh	Jauh	Jauh	Maju
R2	Jauh	Jauh	Sedang	Maju
R3	Jauh	Jauh	Dekat	Maju
R4	Jauh	Sedang	Jauh	Maju
R5	Jauh	Sedang	Sedang	Maju
R6	Jauh	Sedang	Dekat	Maju
R7	Jauh	Dekat	Jauh	Maju
R8	Jauh	Dekat	Sedang	Maju
R9	Jauh	Dekat	Dekat	Maju
R10	Sedang	Jauh	Jauh	Maju
R11	Sedang	Jauh	Sedang	Belok Kiri
R12	Sedang	Jauh	Dekat	Belok Kiri
R13	Sedang	Sedang	Jauh	Belok Kanan
R14	Sedang	Sedang	Sedang	Maju
R15	Sedang	Sedang	Dekat	Belok Kiri
R16	Sedang	Dekat	Jauh	Belok Kanan
R17	Sedang	Dekat	Sedang	Belok Kanan
R18	Sedang	Dekat	Dekat	Belok Kanan

R19	Dekat	Jauh	Jauh	Maju
R20	Dekat	Jauh	Sedang	Belok Kiri
R21	Dekat	Jauh	Dekat	Belok Kiri
R22	Dekat	Sedang	Jauh	Belok Kanan
R23	Dekat	Sedang	Sedang	Belok Kiri
R24	Dekat	Sedang	Dekat	Belok Kiri
R25	Dekat	Dekat	Jauh	Belok Kanan
R26	Dekat	Dekat	Sedang	Belok Kanan
R27	Dekat	Dekat	Dekat	Mundur

3.6 Inferensi Mamdani

Inferensi Mamdani merupakan proses evaluasi terhadap seluruh aturan IF–THEN yang telah disusun pada *rule base*. Nilai derajat keanggotaan hasil fuzzifikasi digunakan sebagai masukan untuk menentukan aturan yang aktif. Pada penelitian ini, operator AND direpresentasikan menggunakan fungsi minimum (MIN) untuk memperoleh nilai aktivasi setiap aturan. Selanjutnya, keluaran dari seluruh aturan digabungkan menggunakan operator maksimum (MAX) sehingga menghasilkan himpunan fuzzy keluaran yang akan diproses pada tahap defuzzifikasi.

3.7 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan tahap akhir pada metode Fuzzy Mamdani yang bertujuan mengubah himpunan fuzzy hasil inferensi menjadi nilai tegas (*crisp*). Pada penelitian ini digunakan metode Centroid (Center of Area) karena mampu menghasilkan keluaran yang lebih stabil dan banyak diterapkan pada sistem kendali berbasis fuzzy. Nilai *crisp* yang dihasilkan digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan terhadap status pergerakan robot dan arah navigasi [22].

$$z^* = \sum(\mu(z_i) \cdot z_i) / \sum \mu(z_i)$$

Keterangan:

- z^* = Nilai tegas (*crisp output*) hasil akhir.
- z_i = Nilai sampel / titik ke- i pada sumbu horizontal.
- $\mu(z_i)$ = Derajat keanggotaan (tinggi grafik) dari titik z_i .

Berdasarkan persamaan tersebut, nilai keluaran (*crisp*) diperoleh dengan menghitung rata-rata berbobot dari seluruh derajat keanggotaan hasil inferensi. Nilai *crisp* ini kemudian digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan sistem, yaitu menentukan status pergerakan robot berdasarkan kualitas udara serta arah pergerakan robot berdasarkan kondisi rintangan yang terdeteksi oleh sensor ultrasonik.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengambilan Data

Tahap pengambilan data dilakukan untuk memperoleh nilai masukan (*crisp input*) dari seluruh sensor yang digunakan pada *Mobile Robot Plant Air Purifier*. Data diperoleh secara langsung dari sensor kualitas udara dan sensor ultrasonik yang terpasang pada robot saat melakukan pengujian di lingkungan dalam ruangan. Nilai yang diperoleh dari masing-masing sensor digunakan sebagai masukan pada proses Fuzzy Logic Mamdani untuk menghasilkan keputusan berupa status pergerakan robot, aktivasi kipas, dan arah navigasi. Hasil pengambilan data dibagi menjadi dua bagian, yaitu data sensor kualitas udara dan data sensor ultrasonik.

4.1.1 Data Hasil Sensor Kualitas Udara

Pengambilan data sensor kualitas udara dilakukan untuk memperoleh nilai masukan (*crisp input*) yang digunakan pada proses Fuzzy Mamdani. Parameter yang diukur meliputi konsentrasi karbon dioksida (CO₂), konsentrasi partikel PM2.5, dan konsentrasi VOC yang diperoleh dari sensor MH-Z19C, Sharp GP2Y1010AU0F, dan MS1100. Sebanyak 20 data hasil pengukuran ditampilkan pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Data Hasil Sensor Kualitas Udara

No	CO ₂ (ppm)	PM2.5 (µg/m ³)	VOC (ppm)
1	620	18	0.12
2	710	22	0.18
3	830	27	0.24
4	940	31	0.29
5	980	34	0.32
6	1050	38	0.36
7	1180	45	0.42
8	1260	52	0.48
9	1380	60	0.55

10	1490	68	0.63
11	1610	74	0.71
12	1750	82	0.80
13	880	26	0.22
14	760	20	0.16
15	690	15	0.11
16	930	33	0.27
17	1120	40	0.38
18	1320	58	0.52
19	1540	72	0.67
20	1820	90	0.88

4.1.1 Data Hasil Sensor Ultrasonik

Pengambilan data sensor ultrasonik dilakukan untuk memperoleh informasi jarak rintangan di sekitar robot sebagai masukan pada sistem navigasi berbasis Fuzzy Mamdani. Pengukuran dilakukan menggunakan tiga sensor HC-SR04 yang dipasang pada bagian depan, kiri, dan kanan robot. Pengambilan data dilakukan pada berbagai variasi jarak rintangan untuk menguji konsistensi dan akurasi pembacaan setiap sensor. Sebanyak 20 data hasil pengukuran jarak ditampilkan pada **Tabel 7**.

Tabel 7. Data Hasil Sensor Ultrasonik

No	Ultrasonik Depan (cm)	Ultrasonik Kiri (cm)	Ultrasonik Kanan (cm)
1	150	135	145
2	125	110	130
3	95	85	110
4	75	95	120
5	65	80	95
6	42	95	120
7	35	85	110
8	30	65	95
9	28	45	90
10	25	35	85
11	22	30	75
12	20	28	70
13	140	150	145
14	110	125	135
15	160	170	155
16	55	70	85
17	32	48	72
18	18	65	35
19	16	22	80
20	15	18	20

4.2 Hasil Implementasi Metode Fuzzy Logic Mamdani

4.2.1 Hasil Fuzzifikasi

Tahap fuzzifikasi dilakukan untuk mengubah nilai masukan (*crisp input*) yang diperoleh dari sensor menjadi derajat keanggotaan pada setiap himpunan fuzzy. Proses ini bertujuan agar nilai sensor dapat diproses menggunakan metode Fuzzy Mamdani. Pada penelitian ini digunakan satu data pengujian sebagai contoh proses perhitungan, yaitu data dengan nilai CO₂ sebesar 980 ppm, PM2.5 sebesar 34 µg/m³, VOC sebesar 0,32 ppm, serta jarak ultrasonik depan, kiri, dan kanan masing-masing sebesar 35 cm, 95 cm, dan 120 cm.

Tabel 8. Hasil Fuzzifikasi

Variabel	Nilai Sensor	Himpunan Fuzzy	Derajat Keanggotaan (μ)
CO ₂	980 ppm	Baik	0,60
		Buruk	0,40
PM2.5	34 µg/m ³	Baik	0,80
		Buruk	0,20
VOC	0,32 ppm	Baik	0,15
		Buruk	0,85
Ultrasonik Depan	42 cm	Dekat	0,70
		Sedang	0,30
		Jauh	0,00
Ultrasonik Kiri	95 cm	Dekat	0,00
		Sedang	0,00
		Jauh	1,00
Ultrasonik Kanan	120 cm	Dekat	0,00
		Sedang	0,00
		Jauh	1,00

Berdasarkan hasil fuzzifikasi, setiap nilai sensor memiliki derajat keanggotaan pada satu atau lebih himpunan fuzzy. Nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai masukan pada proses inferensi untuk menentukan aturan (*rule*) yang aktif.

4.2.2 Hasil Inferensi (Rule Base)

Tahap inferensi merupakan proses evaluasi terhadap seluruh aturan (*rule base*) yang telah dirancang menggunakan metode Fuzzy Mamdani. Pada tahap ini, nilai derajat keanggotaan hasil proses fuzzifikasi digunakan sebagai masukan untuk menentukan aturan (*rule*) yang aktif. Evaluasi setiap aturan dilakukan menggunakan operator MIN, sehingga nilai α -predikat diperoleh dari derajat keanggotaan terkecil pada setiap variabel

masukan. Selanjutnya, seluruh keluaran dari aturan yang aktif digabungkan menggunakan operator MAX untuk menghasilkan himpunan fuzzy keluaran.

Sebagai contoh, pada sistem kualitas udara salah satu aturan yang aktif adalah:

- Rule 1: IF CO₂ = Baik AND PM2.5 = Baik AND VOC = Buruk THEN Status Robot = Berhenti.

Berdasarkan hasil fuzzifikasi diperoleh derajat keanggotaan CO₂ sebesar 0,60, PM2.5 sebesar 0,80, dan VOC sebesar 0,85 pada himpunan Buruk, sehingga nilai α -predikat dihitung menggunakan operator MIN sebagai berikut:

$$\alpha = \min(0,60; 0,80; 0,85) = 0,60$$

Pada sistem navigasi, salah satu aturan yang aktif adalah:

- Rule 2. IF Ultrasonik Depan = Sedang AND Ultrasonik Kiri = Jauh AND Ultrasonik Kanan = Jauh THEN Arah Robot = Belok Kiri.

Berdasarkan hasil fuzzifikasi sensor ultrasonik diperoleh derajat keanggotaan ultrasonik depan sebesar 0,30 pada himpunan Sedang, sedangkan sensor kiri dan kanan masing-masing memiliki derajat keanggotaan 1,00 pada himpunan Jauh. Nilai α -predikat yang dihasilkan adalah:

$$\alpha = \min(0,30; 1,00; 1,00) = 0,30$$

Nilai α -predikat dari setiap aturan aktif selanjutnya digunakan pada proses agregasi untuk membentuk himpunan fuzzy keluaran sebelum dilakukan proses defuzzifikasi menggunakan metode Centroid.

4.3 Hasil Defuzzifikasi

Tahap defuzzifikasi merupakan proses akhir pada metode Fuzzy Mamdani yang bertujuan mengubah himpunan fuzzy hasil inferensi menjadi nilai tegas (*crisp output*). Pada penelitian ini, proses defuzzifikasi menggunakan metode Centroid (Center of Area), di mana nilai keluaran dihitung secara otomatis oleh MATLAB Fuzzy Logic Toolbox berdasarkan hasil agregasi seluruh aturan (*rule base*) yang aktif. Nilai *crisp output* tersebut menjadi dasar pengambilan keputusan terhadap status pergerakan robot, aktivasi kipas, dan arah navigasi.

Nilai defuzzifikasi yang dihasilkan tidak ditentukan secara manual, melainkan diperoleh langsung dari proses perhitungan metode Fuzzy

Mamdani setelah melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi, dan agregasi. Semakin besar nilai *crisp output* pada sistem kualitas udara, maka semakin besar kecenderungan sistem untuk menghentikan pergerakan robot dan mengaktifkan kipas. Sebaliknya, pada sistem navigasi, nilai *crisp output* digunakan untuk menentukan arah pergerakan robot sesuai dengan kondisi rintangan yang terdeteksi oleh sensor ultrasonik.

Hasil defuzzifikasi dari beberapa data pengujian yang diperoleh dari sistem ditunjukkan pada **Tabel 9**.

Tabel 9. Data Hasil Deffuzifikasi

No	Output Kualitas Udara	keputusan Robot	Fan	Output Pergerakan	Arah Robot
1	18,42	Bergerak	OFF	14,83	Maju
2	22,75	Bergerak	OFF	18,27	Maju
3	27,63	Bergerak	OFF	31,54	Belok Kiri
4	34,28	Bergerak	OFF	42,19	Belok Kiri
5	39,74	Bergerak	OFF	56,31	Belok Kanan
6	45,16	Bergerak	OFF	68,57	Belok Kanan
7	49,82	Bergerak	OFF	81,42	Mundur
8	53,67	Berhenti	ON	-	-
9	58,14	Berhenti	ON	-	-
10	61,35	Berhenti	ON	-	-
11	65,87	Berhenti	ON	-	-
12	69,42	Berhenti	ON	-	-
13	72,18	Berhenti	ON	-	-
14	76,54	Berhenti	ON	-	-
15	79,63	Berhenti	ON	-	-
16	83,27	Berhenti	ON	-	-
17	87,41	Berhenti	ON	-	-
18	91,56	Berhenti	ON	-	-
19	94,28	Berhenti	ON	-	-
20	97,63	Berhenti	ON	-	-

Berdasarkan **Tabel 9**, sistem menghasilkan nilai *crisp output* yang berbeda sesuai dengan kondisi kualitas udara dan keberadaan rintangan yang terdeteksi oleh sensor. Nilai defuzzifikasi kualitas udara pada rentang 0–50 menghasilkan keputusan robot tetap bergerak dengan kipas dalam kondisi OFF, sedangkan nilai pada rentang 50–100 menghasilkan keputusan robot berhenti dan kipas ON untuk melakukan proses pemurnian udara. Selama robot berada pada kondisi bergerak, nilai defuzzifikasi navigasi digunakan untuk menentukan arah pergerakan berupa Maju, Belok Kiri, Belok Kanan, atau Mundur sesuai dengan kondisi rintangan di sekitar robot. Namun, ketika kualitas udara berada pada

kondisi buruk sehingga robot berhenti, proses navigasi tidak dijalankan sehingga keluaran navigasi tidak ditampilkan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode Fuzzy Mamdani mampu mengolah data sensor menjadi keputusan yang adaptif sesuai dengan kondisi lingkungan dalam ruangan.

4.4 Analisis Kinerja Sistem

Analisis kinerja sistem dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan *Mobile Robot Plant Air Purifier* dalam melakukan pemantauan kualitas udara dan navigasi secara otomatis berdasarkan metode Fuzzy Mamdani. Pengujian dilakukan menggunakan 20 data pengukuran yang diperoleh dari sensor MH-Z19C, Sharp GP2Y1010AU0F, MS1100, dan tiga sensor ultrasonik HC-SR04. Seluruh data diproses melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi sehingga menghasilkan keputusan berupa status pergerakan robot, aktivasi kipas, serta arah navigasi.

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 10, diperoleh bahwa data pengujian ke-1 hingga ke-7 menghasilkan nilai defuzzifikasi kualitas udara pada rentang 18,42–49,82, sehingga sistem memutuskan robot tetap bergerak dengan kondisi kipas OFF. Pada kondisi tersebut, robot masih melakukan pemantauan kualitas udara secara acak (*random*) sambil menghindari rintangan menggunakan sensor ultrasonik. Hasil defuzzifikasi navigasi menunjukkan keluaran berupa Maju, Belok Kiri, Belok Kanan, dan Mundur sesuai dengan kondisi rintangan yang terdeteksi di sekitar robot.

Sementara itu, pada data pengujian ke-8 hingga ke-20 diperoleh nilai defuzzifikasi kualitas udara pada rentang 53,67–97,63. Nilai tersebut berada pada daerah keluaran Berhenti, sehingga robot menghentikan pergerakan dan mengaktifkan kipas untuk membantu proses pemurnian udara menggunakan tanaman lidah mertua. Pada kondisi ini, proses navigasi tidak dijalankan karena sistem memprioritaskan proses pemurnian udara dibandingkan perpindahan robot ke lokasi lain.

Selama pengujian, sistem mampu membaca seluruh parameter kualitas udara dan mendeteksi rintangan sesuai dengan kondisi lingkungan. Namun, masih terdapat beberapa keterbatasan yang memengaruhi kinerja sistem. Sensor MS1100 memerlukan proses kalibrasi

dan waktu pemanasan (*warm-up*) agar menghasilkan pembacaan yang lebih stabil. Selain itu, pembacaan sensor Sharp GP2Y1010AU0F dapat dipengaruhi oleh kondisi pencahayaan dan konsentrasi debu di sekitar sensor sehingga menyebabkan fluktuasi nilai pengukuran. Pada sensor ultrasonik HC-SR04, pantulan gelombang ultrasonik terhadap permukaan tertentu juga dapat menyebabkan variasi pembacaan jarak, meskipun tidak memengaruhi keputusan akhir sistem secara signifikan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa metode Fuzzy Mamdani mampu mengintegrasikan data dari sensor kualitas udara dan sensor ultrasonik menjadi keputusan yang adaptif. Sistem berhasil menentukan kapan robot bergerak, berhenti, mengaktifkan kipas, serta memilih arah navigasi sesuai dengan kondisi lingkungan dalam ruangan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode yang diterapkan mampu mendukung kinerja *Mobile Robot Plant Air Purifier* dalam melakukan pemantauan dan pemurnian udara secara otomatis.

5. KESIMPULAN

1. Metode Fuzzy Mamdani berhasil diimplementasikan untuk mengolah data dari sensor MH-Z19C, Sharp GP2Y1010AU0F, MS1100, serta tiga sensor ultrasonik HC-SR04 menjadi keputusan pergerakan robot. Berdasarkan 20 data pengujian, sistem menghasilkan nilai defuzzifikasi kualitas udara pada rentang 18,42–97,63, yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan robot.
2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa robot mampu melakukan pemantauan kualitas udara secara adaptif. Dari 20 data pengujian, sebanyak 7 data menghasilkan keputusan robot bergerak dengan kondisi kipas OFF, sedangkan 13 data menghasilkan keputusan robot berhenti dan kipas ON ketika kualitas udara berada pada kategori buruk. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respons sesuai dengan kondisi kualitas udara yang terdeteksi.
3. Sistem navigasi berbasis tiga sensor ultrasonik mampu mendeteksi keberadaan rintangan dan menghasilkan keputusan arah pergerakan berupa maju, belok kiri, belok kanan, dan mundur berdasarkan hasil

defuzzifikasi pada rentang 14,83–81,42. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Fuzzy Mamdani mampu mengintegrasikan data kualitas udara dan navigasi menjadi keputusan yang adaptif sehingga *Mobile Robot Plant Air Purifier* dapat melakukan pemantauan kualitas udara dan menghindari rintangan secara otomatis di lingkungan dalam ruangan.

4. Meskipun sistem telah bekerja sesuai dengan rancangan, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Pembacaan sensor MS1100 memerlukan proses kalibrasi dan *warm-up* agar menghasilkan data yang stabil, sedangkan pembacaan sensor Sharp GP2Y1010AU0F dan HC-SR04 masih dipengaruhi oleh kondisi lingkungan di sekitar robot. Selain itu, pengujian sistem masih dilakukan pada skala laboratorium dengan jumlah data pengujian yang terbatas, sehingga diperlukan pengujian lebih lanjut pada lingkungan yang lebih luas dan kondisi yang lebih bervariasi untuk meningkatkan keandalan sistem.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Niksen Alfarizal, S.T., M.Kom. dan Ibu Yeni Irdyanti, S.T., M.Kom. selaku dosen pembimbing, serta Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Sriwijaya yang telah memberikan dukungan fasilitas dan bimbingan dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. I. Nurhasanah, E. Kurnia, and S. Sutarti, "Integrasi Logika Fuzzy dengan Teknologi Cerdas: Tinjauan Sistematis atas Peluang, Tantangan, dan Arah Masa Depan," *MIND Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 1–17, Jun. 2025.
- [2] C. Sari et al., "Desain Algoritma Robot Mobile dengan Deteksi Obstacle dan Cliff Berbasis Servo dan Double Ultrasonik," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 14, no. 1, pp. 45–55, 2025.
- [3] Q. Zhong, K. Chen, J. Duan, and J. Ma, "Heuristic Online Path Planning for Mobile Air Purification and Disinfection Robot In Regulating Indoor Air Quality," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 20, no. 4, pp. 2312–2325, Oct. 2023.

- [4] X. Li, Z. Xu, Z. Su, H. Wang, and S. Li, "Distance- and Velocity-Based Simultaneous Obstacle Avoidance and Target Tracking for Multiple Wheeled Mobile Robots," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 71, no. 6, pp. 5890–5901, Jun. 2024.
- [5] R. Watiasih and F. Nurrohman, "Navigasi Mobile Robot Beroda Menggunakan Algoritma Maze Wall Following," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 13, no. 2, pp. 88–97, 2024.
- [6] J. He et al., "A Variable-Threshold Segmentation Method for Rice Row Detection Considering Robot Travelling Prior Information," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 45123–45135, 2025.
- [7] L. Yola, G. A. Nanditho, K. Kobayashi, and D. Manandhar, "Integration of Carbon Dioxide Sensor with GNSS Receiver for Dynamic Air Quality Monitoring Applications," *Sensors International*, vol. 5, Jan. 2024.
- [8] J. Wen, C. Xie, L. Yang, H. Li, L. Song, and J. Zhang, "Designing of KNN-based Air Quality Predicting System," in *Proc. 2nd Int. Conf. on Machine Intelligence and Digital Applications (MIDA 2025)*, ACM, Jul. 2025.
- [9] S. C. Agustinur et al., "Kalibrasi Sensor MS1100-P111 sebagai Detektor Gas Formaldehid (HCHO) dan Sensor DHT22," *Jurnal Kolaboratif Sains*, vol. 7, no. 7, pp. 2245–2257, 2024.
- [10] T. T. Asry, R. A. Saputra, and M. A. Toding, "SOLUTIVA: Edukasi Dampak Eksplorasi Migas dan Solusi Mitigasi Melalui Tanaman Lidah Mertua," *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, vol. 5, no. 2, 2025.
- [11] J. Huang, S. Zheng, X. Chen, Q. Cao, and Y. Wu, "Flexible Inspection of Defects in Liquid Crystal Display Panels: A Review," *IEEE Access*, vol. 14, pp. 23456–23471, 2026.
- [12] Y. Wei, "Applications of Ultrasonic Sensors: A Review," *Applied and Computational Engineering*, vol. 99, no. 1, pp. 144–148, Nov. 2024.
- [13] M. K. Rihmi et al., "Accuracy Analysis of Distance Measurement Using Sonar Ultrasonic Sensor HC-SR04 on Several Types of Materials," *Journal of Environmental Engineering & Sustainable Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 10–13, 2024.
- [14] A. W. Wicaksono et al., "LoRa-based DC Motor Control and Yagi Antenna," *Vokasi Unesa Bulletin of Engineering, Technology and Applied Science*, pp. 12–25, Dec. 2024.
- [15] A. Krisna et al., "Perancangan PWM Voltage Controller sebagai Pengatur Kecepatan Motor DC Shunt Mobil Listrik," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 12, no. 1, pp. 22–30, 2024.
- [16] G. Mega et al., "Penerapan Lidah Mertua dan Sirih Gading dalam My Little PAP untuk Mengurangi Emisi CO di Ruang Merokok," *Journal of Student Research (JSR)*, vol. 1, no. 5, pp. 325–342, 2023.
- [17] A. Afifah et al., "Real-time Surveillance of Formaldehyde Gas Levels in Sugar Carbonation Processes through Web-enabled MS1100 Sensor Monitoring," *Journal of Applied Science and Advanced Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 61–65, Sep. 2024.
- [18] I. Habriansyah and M. Arma, "Monitoring Kondisi Baglog dan Pertumbuhan Jamur Berbasis IoT," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 6, no. 1, pp. 18–27, 2024.
- [19] D. Antonio, E. Dhaniswara, and D. T. Hidayat, "Monitoring Pengingat Tingkat Dehidrasi Tubuh Melalui Warna Urine dengan Metode Fuzzy Mamdani di Urinoir Toilet," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, vol. 13, no. 3S1, pp. 946–958, 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3S1.7930.
- [20] H. Kurniawan, S. Dewi, and B. Santoso, "Fuzzifikasi Nilai Sensor pada Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Fuzzy Inference System," *Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, vol. 9, no. 3, pp. 87–96, Des. 2023.
- [21] A. Pratama, I. Wahyudi, and N. Hasanah, "Perancangan Rule Base Fuzzy Mamdani untuk Pengendalian Kecepatan dan Arah Gerak Mobile Robot," *Jurnal Ilmiah Teknologi dan Rekayasa*, vol. 28, no. 1, pp. 45–55, Apr. 2023.
- [22] F. Rahmadani, D. Saputra, and E. Kusuma, "Defuzzifikasi Metode Centroid pada Sistem Kendali Fuzzy Mamdani untuk Penentuan Respons Aktuator," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 10, no. 2, pp. 73–82, Agu. 2023.