

Perancangan dan Implementasi Sistem Robot Penghisap Debu Cerdas Berbasis Logika Fuzzy Untuk Navigasi Otomatis di Rumah

Design and Implementation of Fuzzy Logic Based Intelligent Vacuum Robot System for Auto Navigation at Home

Kartika*, Miftahul Jannah Br Lubis, Asran, Misriana

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Malikussaleh

Jl. Batam – Bukit Indah Kota Lhokseumawe

Email*: kartika@unimal.ac.id

Abstrak - Debu merupakan partikel kecil yang berdampak signifikan terhadap kesehatan manusia dan kualitas lingkungan, terutama di dalam ruang tertutup yang memerlukan pembersihan secara rutin. Kendala utama dari robot penghisap debu konvensional adalah terbatasnya kemampuan navigasi di ruang sempit dan lingkungan yang penuh rintangan, sehingga efektivitas dalam membersihkan area tertentu menurun. Untuk mengatasi isu tersebut, penelitian ini mengusulkan inovasi dengan mengintegrasikan algoritma Logika Fuzzy Takagi-Sugeno dan desain mekanik roda Mecanum yang memungkinkan robot memiliki kemampuan navigasi holonomik dan adaptif. Sistem elektronik yang dirancang menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai pengendali utama, sensor debu DSM501A, sensor ultrasonik HC-SR04, serta motor driver L298N, dikendalikan melalui algoritma fuzzy agar mampu melakukan penghindaran rintangan secara efisien dan mengarahkan robot secara presisi dalam berbagai kondisi lingkungan. Metodologi penelitian meliputi perancangan perangkat keras, pemrograman algoritma fuzzy, serta pengujian performa robot dalam skenario nyata di lingkungan rumah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai galat deteksi jarak rintangan berkisar antara 1,2% hingga 4,1%, yang dianggap memadai mengingat kompleksitas lingkungan dan tujuan utama navigasi otomatis. Sistem yang dikembangkan mampu bergerak omnidirectional dengan akurasi tinggi dan mengurangi risiko tabrakan selama proses pembersihan. Keberhasilan tersebut menunjukkan bahwa pendekatan inovatif ini lebih unggul dibandingkan sistem navigasi konvensional yang memiliki keterbatasan dalam manuver di ruang terbatas dan lingkungan dinamis. Kesimpulannya, integrasi algoritma fuzzy dan mekanik holonomik meningkatkan efisiensi, presisi, serta kehandalan robot pembersih otomatis, sekaligus membuka peluang pengembangan teknologi robotika rumah cerdas yang lebih adaptif dan aman. Potensi dampak praktis dari penelitian ini adalah terciptanya robot vacuum yang mampu bekerja secara optimal dalam kondisi rumah yang penuh tantangan, serta berkontribusi pada peningkatan kualitas hidup dan kesehatan masyarakat.

Kata kunci : Robot Penghisap Debu, Logika Fuzzy, Navigasi Otomatis.

Abstract – The development of technology in the 4.0 era has led to the creation of various smart devices that can ease household chores, including in the field of cleaning. This rapid innovation brings significant changes such as vacuuming robots. A vacuuming robot is an innovative design to solve cleaning automatically. This research aims to design a vacuuming robot using Takagi-Sugeno fuzzy navigation and holonomic movement mapping. This innovation in the field of automation is designed to improve efficiency and accuracy in the cleaning process. This system integrates several main components: Arduino Mega 2560 as the central controller, DSM501A dust sensor for detecting dust levels with a range of 20-150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and HC-SR04 ultrasonic sensor for obstacle avoidance at a distance of 5-60 cm. The drive system uses an L298N motor driver to control the mecanum wheel with a PWM value of 150-250, enabling precise holonomic motion with a position error of 1.2% to 4.1%. The robot can move at a speed of 0.5 m/s in the no-obstacle condition and adjusts to 0.3 m/s when detecting obstacles, with a system response time of 1.5 seconds. Test results showed consistent performance, with maximum speed reaching 873.2 RPM without load and 714.4 RPM with load at PWM 250, while in holonomic motion testing, the robot demonstrated high accuracy in diagonal motion and 360° rotation with a position standard deviation of only 0.7 - 1.5 cm. The Takagi-Sugeno fuzzy system successfully classified the obstacle distance into three categories (near, medium, far) and regulated the motor

speed between 350-1100 RPM according to the environmental conditions, proving that the integration between TakagiSugeno fuzzy algorithm and holonomic design resulted in an efficient and adaptive vacuum robot system, capable of effective navigation and cleaning while maintaining high precision in obstacle avoidance.

Keywords : *Use 3-5 keywords specific and relevant to your research findings. Keywords should not be too general.*

I. PENDAHULUAN

Debu adalah campuran partikel kecil yang terdiri dari berbagai bahan, termasuk serbuk sari, serpihan kulit, dan serbuk logam yang terbentuk dari berbagai sumber, seperti aktivitas manusia, proses industri, dan polusi udara. Debu dapat ditemukan di berbagai tempat, baik di lingkungan luar seperti jalanan dan tempat konstruksi, maupun di dalam rumah atau bangunan, terutama pada permukaan yang jarang dibersihkan seperti sudut ruangan dan bawah perabotan [1]. Debu rumah merupakan masalah kesehatan yang serius dan menyebabkan dampak signifikan terhadap masyarakat. Menurut data Kementerian Kesehatan Indonesia tahun 2022, sekitar 70% dari populasi mengalami gangguan pernapasan akibat paparan debu dan polutan udara di lingkungan domestik dan sekitar tempat tinggal mereka. Selain itu, prevalensi tungau debu di rumah tangga mencapai lebih dari 55% di wilayah perkotaan, yang berkontribusi terhadap meningkatnya kasus alergi dan asma [2]. Selain itu, debu juga dapat mengandung bahan-bahan berbahaya seperti polutan udara, bakteri, dan virus yang meningkatkan risiko infeksi dan penyakit. Debu memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan seperti gangguan terhadap fungsi paru pada pekerja industri rumahan [3].

Rumah yang seharusnya menjadi tempat perlindungan yang nyaman dan aman, sering kali rumah menyimpan partikel debu di setiap sudut ruangan. Berbagai jenis tungau debu rumah yang menunjukkan prevalensi masalah debu di lingkungan perumahan. Temuan tentang tungau debu rumah memperkuat kebutuhan akan teknologi pembersih yang efektif di lingkungan perumahan [4]. Karena ukurannya yang kecil dan terlihat tidak mengganggu, debu ini sering kali terabaikan. Permukaan yang tidak terjangkau oleh pembersihan rutin, seperti di bawah perabotan, di balik pintu, dan sudut ruangan, menjadi tempat akumulasi debu yang signifikan. Partikel debu yang berukuran lebih kecil dari 10 μm sangat

memprihatinkan karena memiliki kemungkinan besar untuk masuk ke dalam paru-paru, yang dapat berdampak serius pada kesehatan jika terus dihirup dalam jangka waktu yang lama. Oleh karena itu, rumah sebagai lingkungan sehari-hari menjadi tempat yang penting untuk diperhatikan dalam upaya mengelola debu secara efektif [5].

Alat pembersih konvensional saat ini telah diperkenalkan sebagai solusi untuk membersihkan debu di rumah. Salah satu metode yang dipakai adalah Metode QFD digunakan dalam perancangan pengembangan produk sapu rumah tangga untuk meningkatkan efisiensi pembersihan [6]. Namun, kekurangan alat konvensional ini terletak pada keterbatasan efisiensi dan ketidakmampuannya mencapai area yang sulit dijangkau. Penggunaan alat konvensional juga memerlukan waktu dan tenaga yang cukup besar, terutama untuk membersihkan area yang luas atau sulit dijangkau [7].

Kendala utama dalam pengelolaan debu secara manual adalah keterbatasan tenaga dan waktu, sehingga banyak rumah yang tidak mampu melakukan pembersihan secara optimal, khususnya di area sempit dan sulit dijangkau seperti bawah perabotan dan sudut ruangan. Berdasarkan data Survei Nasional Kebersihan 2021, hanya 25% rumah di Indonesia yang rutin melakukan pembersihan mendalam, yang menunjukkan perlunya solusi otomatis yang efisien dan adaptif [8].

Kurangnya kesadaran masyarakat Indonesia dalam menjaga kebersihan juga turut memperburuk kondisi ini. Berdasarkan riset dari Kementerian Kesehatan, hanya 20% atau sekitar 25 juta dari 262 juta masyarakat Indonesia yang peduli terhadap kesehatan dan kebersihan [9]. Faktor waktu dan tenaga yang diperlukan untuk membersihkan debu secara manual sering kali membuat masyarakat enggan melakukannya [10]. Untuk mengatasi tantangan ini, perusahaan di industri kebersihan telah mengembangkan teknologi pembersih debu otomatis [11].

Salah satu inovasi terbaru dalam teknologi pembersih debu adalah pengembangan robot penghisap debu, yang dirancang untuk mengoptimalkan proses pembersihan debu di rumah. Integrasi robot pembersih dalam ekosistem rumah tangga yang dapat menjadi pertimbangan dalam desain robot. Salah satu yang pernah diterapkan ialah merancang sistem penyedot debu berbasis *Internet of Things* yang menunjukkan perkembangan teknologi pembersih debu [12]. Meskipun teknologi ini menawarkan berbagai keunggulan dalam otomatisasi pembersihan, masih ada beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan terkait pergerakan robot ini. Pengembangan robot *vacuum cleaner* dengan beberapa fitur inovatif yang telah dilakukan menjadi rujukan dalam penelitian robot pembersih. Salah satu masalah utama adalah keterbatasan kemampuan navigasi, terutama di lingkungan yang kompleks atau penuh dengan hambatan. Sistem navigasi untuk robot mobile di lingkungan yang tidak menentu telah dikaji menggunakan pendekatan *behavior based control*. Robot penghisap debu sering kali kesulitan dalam mengenali dan menavigasi rintangan seperti perabotan rendah, kabel listrik, atau perbedaan tinggi permukaan lantai, yang dapat menyebabkan robot terjebak atau tersendat [13]. Kondisi tersebut tentunya akan memberikan dampak negatif terhadap kinerja dari robot seperti membatasi cakupan area yang dapat dibersihkan secara efisien [14].

Selain itu, beberapa model robot penghisap debu juga mengalami kesulitan dalam menjangkau sudut-sudut sempit atau daerah di bawah perabotan yang tinggi. Keterbatasan ini mengurangi efektivitas pembersihan secara keseluruhan, sehingga memerlukan intervensi manusia untuk membersihkan area yang tidak dapat dijangkau oleh robot. Oleh karena itu, pengembangan teknologi navigasi yang lebih canggih dan adaptif menjadi kunci dalam meningkatkan kinerja dan keterampilan pergerakan robot penghisap debu untuk mengatasi tantangan tersebut [15].

Penelitian sebelumnya mengenai robot *vacuum cleaner* telah mengimplementasikan logika proposisional untuk navigasi. Selain itu peneliti sebelumnya juga mengimplementasikan sistem positioning pada robot dengan roda omnidirectional dapat dioptimalkan menggunakan MPU6050 dan encoder berbasis PD-Fuzzy Controller [16]. Namun, banyak dari penelitian tersebut masih menghadapi kendala dalam hal

navigasi yang efisien dan adaptif, terutama di lingkungan rumah yang kompleks dan beragam. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan baru yang mampu meningkatkan kinerja dan kecerdasan robot penghisap debu, salah satunya dengan menggunakan algoritma logika fuzzy dalam navigasinya [17]. Logika fuzzy telah terbukti efektif untuk sistem kendali suhu pada beberapa aplikasi, termasuk pengering ikan sehingga menunjukkan efektivitas logika fuzzy dalam sistem kontrol, yang dapat diadaptasi pada berbagai aplikasi termasuk robot penghisap debu [18]. Kemudian, logika fuzzy Takagi-Sugeno yang digunakan pada penelitian ini merupakan sistem inferensi fuzzy tipe 3 yang dalam metode ini output akhirnya adalah rata-rata tertimbang dari output semua aturan dan output aturan adalah kombinasi linear dari variabel input dan konstanta [19].

Penelitian oleh Holis dkk. Penggunaan *omni wheel* dan logika fuzzy menawarkan solusi yang menarik dalam meningkatkan navigasi pergerakan robot penghisap debu [18]. *Omni wheel* dengan kemampuannya untuk bergerak dalam berbagai arah tanpa perlu mengubah orientasi, memberikan fleksibilitas yang sangat dibutuhkan dalam mengatasi rintangan dan mengelilingi sudut-sudut sempit dengan lebih efisien [20]. Dengan kata lain, *omni wheel* memungkinkan robot untuk bermanuver dengan lebih leluasa dan adaptif di lingkungan rumah yang kompleks [21]. Penggunaan roda *mecanum* dalam perancangan robot penghisap debu memungkinkan pergerakan holonomik [22]. Logika fuzzy memperkuat kemampuan adaptasi robot terhadap kondisi lingkungan yang tidak pasti atau kabur. Dengan memanfaatkan data sensor dan informasi lingkungan untuk menghasilkan keputusan yang lebih cerdas dan adaptif, robot dapat menyesuaikan pergerakan dan jalurnya secara dinamis sesuai dengan situasi yang dihadapi [23].

Penelitian ini menghadirkan inovasi melalui integrasi algoritma Logika Fuzzy Takagi-Sugeno dengan desain robot berbasis roda Mecanum yang mampu bergerak secara omnidirectional. Pendekatan ini menawarkan peningkatan signifikan dibanding sistem navigasi konvensional atau logika proposisional yang digunakan dalam studi sebelumnya, khususnya dalam hal fleksibilitas dan adaptabilitas robot di lingkungan rumah yang kompleks. Kombinasi ini secara efektif mengatasi kendala umum pada robot vacuum terdahulu, seperti kesulitan menghadapi

rintangan rendah, kabel listrik, dan perbedaan tinggi permukaan lantai. Hasilnya, robot mampu menavigasi area semi-tertutup dan berbelit secara efisien, memperluas cakupan pembersihan serta meningkatkan performa secara keseluruhan.

II. METODOLOGI

A. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem robot penghisap debu ini dirancang untuk mendukung navigasi otomatis dan penghindaran rintangan menggunakan pendekatan logika fuzzy Takagi-Sugeno. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terintegrasi, termasuk unit pengendali, sensor pendeteksi, aktuator, dan sistem pembersih, seperti pada **Gambar 1**.

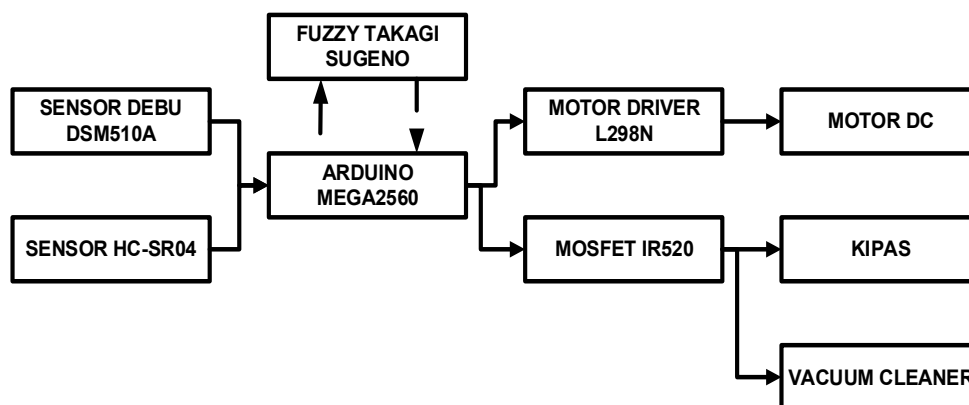
Robot penghisap debu merupakan solusi inovatif untuk menjaga kebersihan rumah secara otomatis [24]. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan robot penghisap debu yang efisien dan adaptif dalam menavigasi lingkungan rumah. Sistem ini memanfaatkan sensor debu DSM501A dan sensor jarak HC-SR04 sebagai input utama yang diolah menggunakan Arduino Mega [25]. Algoritma Fuzzy Takagi Sugeno digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan berdasarkan data sensor. Output dari sistem ini dikendalikan melalui motor driver L298N yang mengatur motor DC untuk pergerakan roda serta MOSFET IRF520 untuk mengontrol kipas dan perangkat vacuum cleaner [26].

Dengan inovasi penerapan Logika Fuzzy Takagi-Sugeno yang dikombinasikan dengan roda Mecanum sehingga menghasilkan sistem navigasi robot yang mampu bergerak secara holonomik dan adaptif untuk beberapa kondisi dengan rintangan yang berbeda-beda. Roda Mecanum memberikan kemampuan gerak omnidirectional yang fleksibel, sementara logika fuzzy memungkinkan

pengambilan keputusan yang cerdas dan responsif terhadap perubahan lingkungan. Integrasi kedua teknologi ini menghasilkan pengaturan kecepatan dan arah pergerakan yang presisi, bahkan dalam kondisi lingkungan yang kompleks dan penuh rintangan. Sistem ini juga didukung oleh komponen elektronik yang dirancang khusus untuk mendukung navigasi dinamis dan penghindaran rintangan secara efisien, menjadikannya solusi unggul dibandingkan pendekatan navigasi tradisional yang masih terbatas dalam hal fleksibilitas dan adaptivitas.

Dalam merancang sebuah robot, terdapat beberapa faktor umum yang perlu diperhatikan agar robot dapat berfungsi secara optimal sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Pertama, tentukan terlebih dahulu fungsi utama robot, apakah untuk navigasi otomatis, pengambilan objek, pemantauan lingkungan, atau tugas lainnya, karena hal ini akan menentukan jenis sensor, aktuator, dan sistem kendali yang dibutuhkan. Kedua, perhatikan kondisi lingkungan tempat robot akan beroperasi, seperti medan permukaan, suhu, dan kelembapan, yang akan memengaruhi desain mekanik dan pilihan material. Ketiga, pertimbangkan sumber daya listrik yang tersedia dan efisiensi penggunaan energinya agar robot dapat beroperasi dalam durasi yang cukup [27]. Selain itu, aspek integrasi perangkat keras dan perangkat lunak, kemudahan pemrograman, serta keterbatasan anggaran dan ketersediaan komponen juga menjadi pertimbangan penting dalam proses penentuan spesifikasi robot [28].

Spesifikasi robot yang digunakan terdiri dari ukuran, berat, fungsi utama, dan lingkungan operasi. Spesifikasi robot sendiri ditentukan berdasarkan penggunaan komponen utama dan pendukung yang memiliki berat serta dimensinya sebagaimana yang dapat dilihat pada **Tabel I**.



Gambar 1. Diagram Blok Perancangan Robot

Tabel I. Tabel Spesifikasi Robot

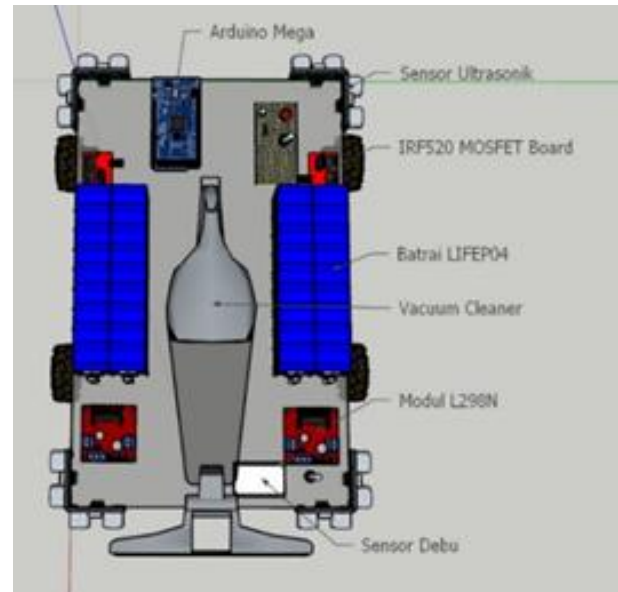
No	Komponen	Jumlah (@)	Dimensi (mm)	Berat (@) (kg)	Total Berat (kg)
1	DSM501A	1	59 x 45	0.1	0.1
2	HC-SR04	8	42 x 20	0.01	0.04
3	Driver L298N	2	20 x 10	0.01	0.02
4	Motor DC	4	82 x 32	0.4	1.6
5	Arduino Mega	1	101.5 x 53	0.03	0.03
6	Roda Mecanum	4	79 x 38	0.469	1.876
7	Baterai	4	150 x 65 x 100	0.72 x 4	2.88
8	Holder Baterai	1	155 x 65.5 x 105	0.001	0.001
9	Spacer PCB	20	6 x 10	0.0015	0.03
10	Akrilik	2	437.5 x 327.5 x 3	0.16	0.32
11	Kabel Jumper	2	100 x 10	0.02	0.04
12	Vacuum	1	420 x 110 x 110	1.35	1.35
Total Berat (kg)					8.311

B. Desain Perangkat Keras

Perancangan perangkat Keras melibatkan beberapa langkah penting untuk memastikan integrasi komponen yang mendukung fungsi robot penghisap debu berbasis navigasi fuzzy. Proses ini mencakup desain Mekanik dan desain elektronik.

Perancangan kerangka ini mempertimbangkan pula aspek efisiensi ruang dan kestabilan selama navigasi. Komponen-komponen disusun agar tidak saling mengganggu dan mudah diakses saat proses perawatan.

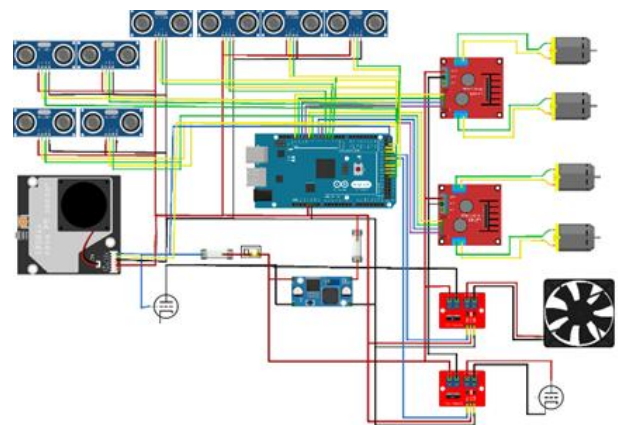
Kerangka merupakan struktur utama robot yang menopang semua komponen dalam sistem robot penghisap debu berbasis navigasi fuzzy. Kerangka yang dirancang harus cukup kuat untuk menahan beban robot dan tahan terhadap gaya-gaya dinamis selama operasi. Bahan kerangka yang digunakan terdiri dari akrilik dengan ketebalan 5 mm, yang ringan namun kokoh untuk mendukung mobilitas robot. Pada kerangka ini terdapat wadah untuk peletakan komponen penting seperti motor DC, sensor ultrasonik HC-SR04, sensor partikulat DSM501A, dan baterai LiFePO4, yang semuanya terintegrasi secara presisi. Desain kerangka ini juga memperhatikan tata letak optimal untuk mendukung peletakan komponen lainnya untuk dimensi kerangka Keseluruhan desain fisik dari kerangka dan tata letak komponen utama dalam sistem ini ditampilkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Rancangan Kerangka Robot Penghisap Debu

Dengan perancangan perangkat keras seperti ini, sistem robot vacuum memiliki kestabilan mekanik yang baik, fleksibilitas pergerakan yang tinggi, serta kemampuan integrasi komponen yang optimal untuk mendukung operasi pembersihan cerdas berbasis logika fuzzy.

Setelah desain kerangka selesai, dilakukan perancangan rangkaian elektronik sistem. Arduino Mega 2560 sebagai pusat kendali menerima input dari sensor HC-SR04 dan DSM501A, kemudian memprosesnya untuk mengontrol aktuator melalui driver motor dan modul MOSFET. Empat motor DC dikendalikan melalui driver motor L298N untuk menggerakkan roda Mecanum secara independen. Sistem vacuum cleaner dikendalikan oleh MOSFET IRF520 berdasarkan tingkat debu yang terdeteksi. Semua komponen mendapat suplai daya dari baterai LiFePO4 12V. Rangkaian sistem ini ditampilkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Rangkaian Elektronik Sistem Robot Vacuum

C. Desain Perangkat Lunak

Desain perangkat lunak pada sistem robot penghisap debu ini berfungsi untuk mengolah data sensor secara real-time dan menghasilkan keputusan kendali yang adaptif menggunakan pendekatan logika fuzzy Takagi-Sugeno. Mikrokontroler Arduino Mega 2560 digunakan sebagai unit pemroses utama yang menjalankan algoritma fuzzy untuk mengatur pergerakan dan pengaktifan sistem vacuum cleaner berdasarkan kondisi lingkungan. Pada bagian ini, akan dijelaskan mengenai rancangan algoritma fuzzy Takagi-Sugeno yang digunakan pada sistem kendali robot penghisap debu. Sistem ini dirancang untuk mengatur pergerakan motor penggerak dan pengaktifan vacuum cleaner secara otomatis berdasarkan pembacaan sensor jarak dan sensor debu. Desain logika fuzzy ini dibagi menjadi beberapa bagian utama, yaitu definisi variabel linguistik, fungsi keanggotaan, aturan (rule base), dan metode defuzzifikasi.

Pada rancangan ini, variabel linguistik didefinisikan untuk mendeskripsikan kondisi jarak rintangan dan tingkat konsentrasi debu di sekitar robot. Setiap variabel diwakili oleh fungsi keanggotaan dengan bentuk segitiga (trimf) untuk input, serta fungsi konstan untuk output, sesuai karakteristik logika fuzzy Takagi-Sugeno.

Setelah mendefinisikan variabel linguistik, langkah berikutnya adalah menentukan fungsi keanggotaan yang digunakan untuk mendeskripsikan nilai input dan output ke dalam bentuk linguistik. Sistem fuzzy Takagi-Sugeno pada robot penghisap debu ini menggunakan fungsi keanggotaan segitiga (trimf) untuk variabel input dan fungsi keanggotaan konstan untuk variabel output.

1. Fungsi Keanggotaan Input

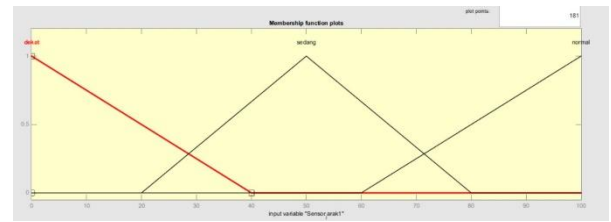
a) Sensor Jarak

Sistem menggunakan delapan sensor jarak (*Sensor_jarak1* hingga *Sensor_jarak8*) serta satu sensor tambahan (*SR10*). Masing-masing sensor memiliki tiga kategori linguistik, yaitu *Dekat*, *Sedang*, dan *Normal*. Rentang pembacaan jarak adalah 0–100 cm, dengan parameter fungsi keanggotaan segitiga (*trimf*) Bentuk fungsi keanggotaan sensor jarak ditampilkan pada **Gambar 4**.

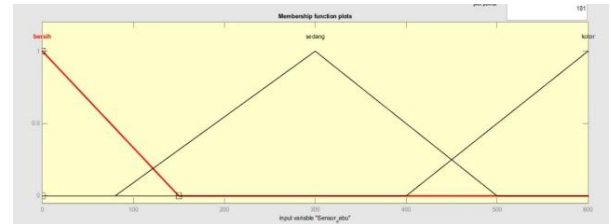
b) Sensor Debu

Variabel *Sensor_debu* digunakan untuk mendeteksi tingkat konsentrasi debu di sekitar robot, dengan rentang 0–600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Fungsi keanggotaan input ini juga menggunakan bentuk segitiga (*trimf*) dengan tiga kategori linguistik, yaitu *Bersih*, *Sedang* dan *Kotor*.

Bentuk fungsi keanggotaan sensor debu dapat dilihat pada **Gambar 5**.



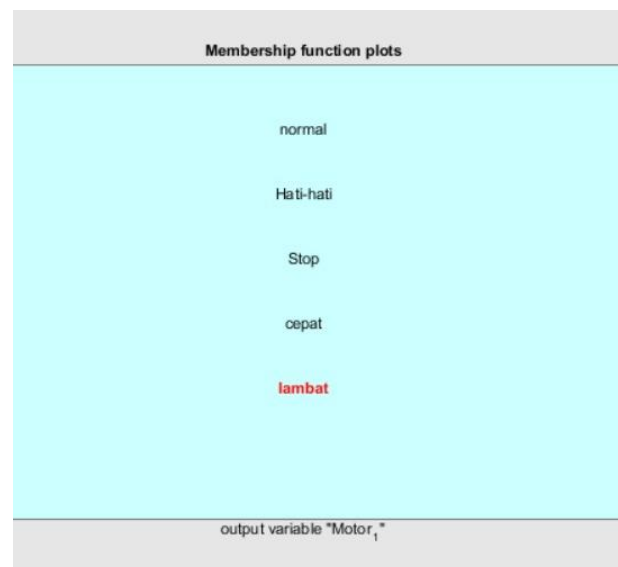
Gambar 4. Fungsi Keanggotaan Input Sensor jarak



Gambar 5. Fungsi Keanggotaan Sensor Debu

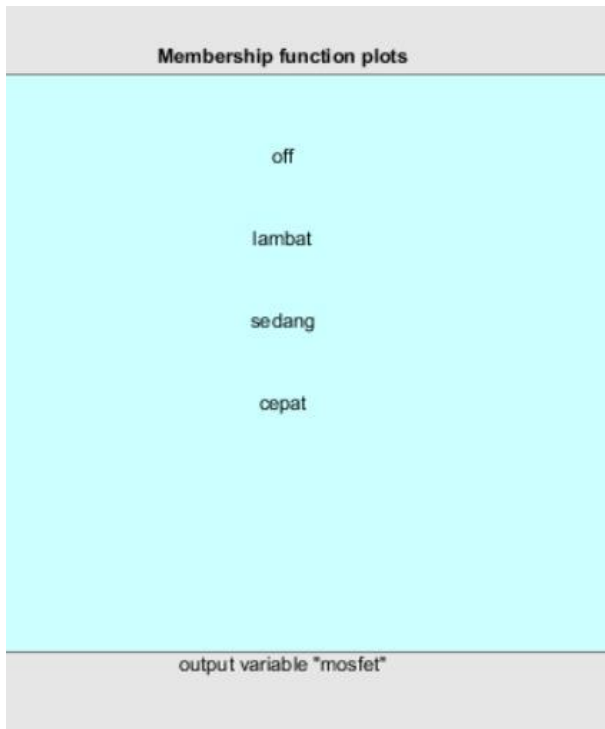
2. Fungsi Keanggotaan Output

Output fuzzy terdiri dari lima variabel, yaitu empat motor penggerak (Motor_1 hingga Motor_4) dan satu pengendali vacuum cleaner (Mosfet). Output motor menggunakan lima kategori linguistik dengan nilai konstan (crisp) yang sesuai dengan metode Sugeno yaitu *Stop*, *Lambat*, *Hati-hati*, *Cepat* dan *Normal*. Bentuk fungsi keanggotaan output Motor_1 diperlihatkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Fungsi Keanggotaan Motor.

Untuk variabel Mosfet, fungsi keanggotaan output juga berbentuk konstan, dengan kategori sebagai berikut *Off*, *Lambat*, *Sedang* dan *Cepat*. Bentuk fungsi keanggotaan Mosfet dapat dilihat pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Fungsi Keanggotaan Mosfet

Dengan rancangan fungsi keanggotaan ini, nilai input dari sensor dapat diterjemahkan ke dalam bentuk linguistik dan diolah melalui aturan fuzzy untuk menghasilkan output kendali yang sesuai.

Bagian berikutnya menjelaskan aturan fuzzy (*Rule Base*) yang digunakan dalam proses pengambilan keputusan. Aturan fuzzy (*Rule Base*) digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pada sistem fuzzy Takagi–Sugeno. Aturan ini dibentuk dalam bentuk logika IF–THEN, yang mendeskripsikan hubungan antara kondisi input dan aksi output.

Dalam sistem ini, aturan fuzzy memproses data sensor jarak (Sensor_jarak1–8), sensor tambahan (SR10), serta sensor debu (Sensor_debu). Berdasarkan kombinasi kondisi tersebut, sistem akan menentukan kecepatan masing-masing motor penggerak dan status pengendali vacuum cleaner. Aturan fuzzy menggunakan metode $AND = prod$,

$OR = probor$, dengan metode $implication = prod$, $aggregation = sum$, dan $defuzzifikasi = weighted average$. Tabel II memperlihatkan aturan fuzzy yang digunakan pada sistem robot penghisap debu ini.

Aturan pada Tabel II menunjukkan logika pengendalian. jika semua sensor jarak mendeteksi kondisi *Dekat*, maka semua motor akan berhenti (*Stop*) dan vacuum cleaner diaktifkan secara perlahan (*Lambat*). Sebaliknya, jika jarak *Normal* dan debu *Bersih*, maka motor beroperasi cepat dan vacuum aktif pada kecepatan sedang. Dengan adanya aturan fuzzy ini, sistem dapat menghasilkan keputusan pengendalian yang adaptif berdasarkan kondisi lingkungan secara real-time.

Tahap akhir dari proses inferensi fuzzy adalah defuzzifikasi, yaitu tahap untuk mengubah output fuzzy menjadi output crisp (*crisp output*) yang dapat diimplementasikan langsung oleh aktuatur. Pada sistem fuzzy Takagi–Sugeno ini digunakan metode defuzzifikasi *Weighted Average* (*wtaver*).

Metode *wtaver* atau rata-rata tertimbang (*weighted average*) bekerja dengan menghitung rata-rata nilai output crisp dari setiap aturan fuzzy yang aktif. Nilai rata-rata tersebut diperoleh dengan mempertimbangkan bobot kekuatan aturan (*firing strength*) dari setiap aturan. Metode defuzzifikasi *wtaver* dipilih karena sederhana, cepat, dan sangat sesuai diterapkan pada sistem kendali berbasis mikrokontroler dengan proses inferensi real-time. Dengan metode ini, nilai output dapat dihasilkan secara tegas dan stabil sesuai kondisi input yang terdeteksi oleh sensor.

Rancangan aturan fuzzy (*Rule Base*) yang telah dibuat kemudian diimplementasikan ke dalam bentuk logika terstruktur agar dapat diolah oleh mikrokontroler. Logika ini disusun dalam bentuk pseudocode sebagai gambaran alur kerja sistem pengambilan keputusan berdasarkan kombinasi input dari sensor jarak dan sensor debu. Dapat dilihat pada Gambar 8 sebagai berikut.

Tabel II. Rule Base

No	Sensor_jarak (1–8)	Sensor_debu	Motor_1	Motor_2	Motor_3	Motor_4	Mosfet
1	dekat	-	Stop	Stop	Stop	Stop	Off
2	sedang	-	Hati-hati	Hati-hati	Hati-hati	Stop	Off
3	normal	bersih	Cepat	Cepat	Cepat	Cepat	Lambat
4	normal	sedang	Hati-hati	Hati-hati	Hati-hati	Hati-hati	Sedang
5	normal	kotor	Lambat	Lambat	Lambat	Lambat	Cepat

BEGIN

INPUT:

Sensor_jarak1, Sensor_jarak2, Sensor_jarak3, Sensor_jarak4,
Sensor_jarak5, Sensor_jarak6, Sensor_jarak7, Sensor_jarak8,
Sensor_debu

OUTPUT:

Motor_1, Motor_2, Motor_3, Motor_4, Mosfet

```
IF Sensor_jarak1 == "dekat" AND Sensor_jarak2 == "dekat" AND  
Sensor_jarak3 == "dekat" AND Sensor_jarak4 == "dekat" AND  
Sensor_jarak5 == "dekat" AND Sensor_jarak6 == "dekat" AND  
Sensor_jarak7 == "dekat" AND Sensor_jarak8 == "dekat" THEN
```

```
Motor_1 = "Stop"  
Motor_2 = "Stop"  
Motor_3 = "Stop"  
Motor_4 = "Stop"  
Mosfet = "off"
```

```
ELSE IF Sensor_jarak1 == "sedang" AND Sensor_jarak2 == "sedang" AND  
Sensor_jarak3 == "sedang" AND Sensor_jarak4 == "sedang" AND  
Sensor_jarak5 == "sedang" AND Sensor_jarak6 == "sedang" AND  
Sensor_jarak7 == "sedang" AND Sensor_jarak8 == "sedang" THEN
```

Gambar 8. Potongan Pseudocode Algoritma Fuzzy Takagi–Sugeno

Potongan pseudocode berikut memperlihatkan langkah-langkah utama yang dilakukan sistem, mulai dari pembacaan input sensor, proses inferensi aturan fuzzy, hingga keluaran kendali pada motor penggerak dan modul vacuum cleaner. Pseudocode ini dibuat untuk mempermudah pemahaman proses inferensi fuzzy Takagi–Sugeno pada sistem robot penghisap debu yang dirancang.

D. Pengujian Sistem

Untuk memastikan bahwa algoritma fuzzy Takagi–Sugeno yang dirancang dapat berfungsi secara optimal pada sistem robot penghisap debu, maka dilakukan pengujian dengan protokol yang telah disusun secara terencana. Protokol pengujian ini mencakup skenario uji, metrik evaluasi, serta jumlah replikasi untuk memperoleh hasil data yang akurat dan dapat dipertanggungjawabkan.

Skenario pengujian disusun dengan mempertimbangkan kondisi nyata yang mungkin terjadi di lingkungan kerja robot. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan jarak rintangan yang terdeteksi sensor jarak pada kondisi dekat, sedang, dan jauh. Selain itu, tingkat konsentrasi debu di lingkungan juga divariasikan dalam kondisi bersih, sedang, dan kotor untuk mengevaluasi respon sistem terhadap perbedaan tingkat kebersihan. Sistem diuji untuk memastikan motor penggerak dapat merespons perubahan jarak rintangan dengan kecepatan yang sesuai, sedangkan vacuum cleaner diatur melalui modul Mosfet agar dapat menyesuaikan kecepatan kerja berdasarkan tingkat debu yang terdeteksi.

Metrik evaluasi yang digunakan dalam pengujian meliputi akurasi pembacaan sensor dibandingkan dengan alat ukur pembanding, kecepatan waktu respon sistem terhadap perubahan input sensor, serta kestabilan output kendali yang dihasilkan. Selain itu, konsistensi hasil inferensi

fuzzy dibandingkan dengan rule base yang telah dirancang juga menjadi salah satu parameter evaluasi.

Untuk menjamin keandalan hasil, setiap skenario pengujian akan diulang atau direplikasi minimal tiga kali. Hasil rata-rata dari setiap replikasi akan digunakan sebagai dasar evaluasi performa sistem. Dengan pelaksanaan protokol pengujian ini, diharapkan sistem kendali fuzzy Takagi–Sugeno pada robot penghisap debu dapat divalidasi kinerjanya dan dikembangkan lebih lanjut agar mampu bekerja secara adaptif, efisien, dan sesuai tujuan perancangan.

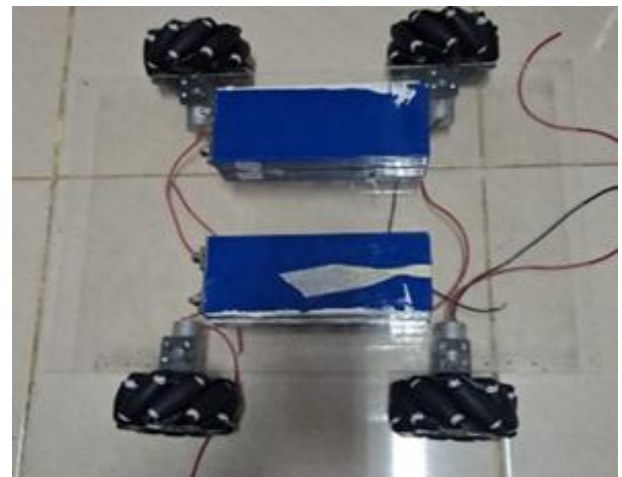
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Rancangan Mekanik

Rancangan mekanik dari robot penghisap debu ini melibatkan beberapa komponen penting yang saling terintegrasi. Setiap bagian dirancang dengan tujuan untuk mendukung mobilitas, stabilitas, serta fungsionalitas robot saat beroperasi di berbagai medan. Komponen-komponen mekanik seperti kerangka, sistem roda, aktuator, dan penyangga memiliki peran penting dalam mendukung keseluruhan kinerja robot.

B. Kerangka

Kerangka pada **Gambar 9** merupakan struktur dasar yang menopang seluruh komponen robot penghisap debu. Desain kerangka dibuat sedemikian rupa agar kokoh dan mampu menahan beban komponen lain seperti motor, baterai, dan sensor. Bahan yang digunakan dalam pembuatan kerangka harus ringan namun cukup kuat untuk mendukung mobilitas robot. Selain itu, bentuk kerangka juga dioptimalkan agar robot dapat bergerak dengan lancar di berbagai jenis permukaan.



Gambar 9. Hasil Perancangan Fisik

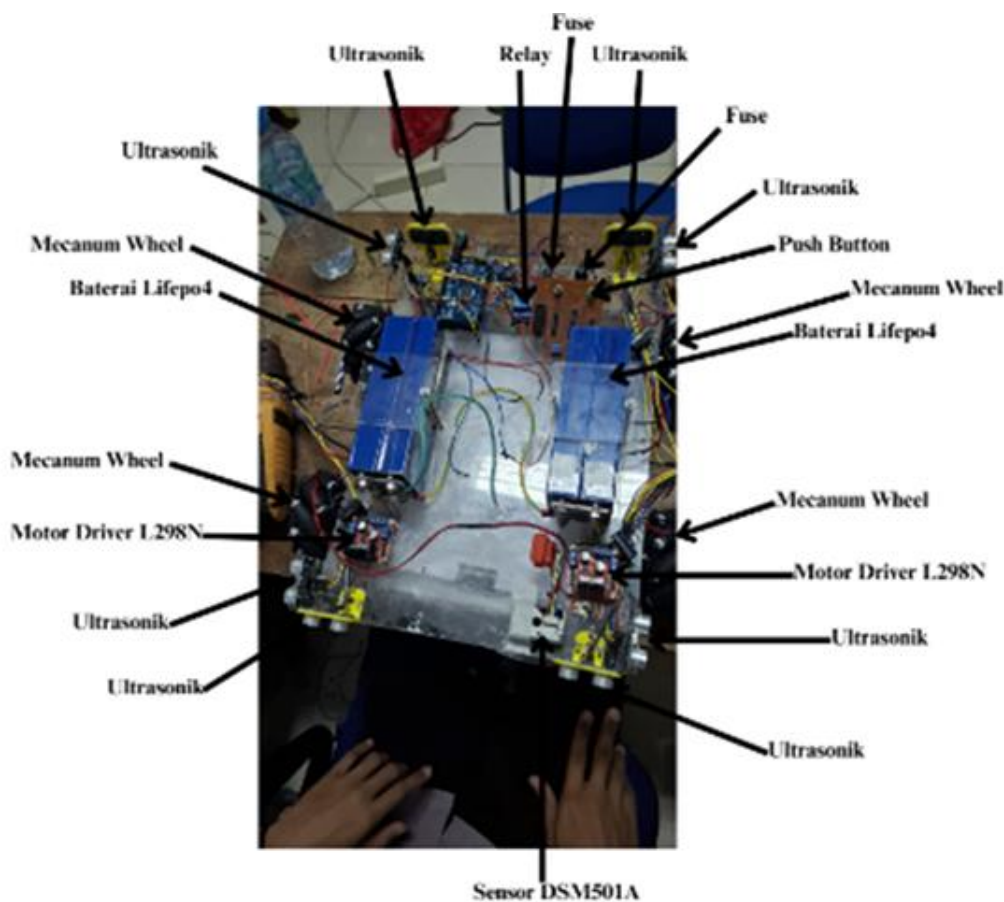
C. Hasil Perancangan Elektronik

Selain perancangan mekanik, perancangan elektronik juga merupakan elemen vital dalam pengembangan robot penghisap debu ini. Pada bagian perancangan elektronik ini akan dijelaskan hasil rancangan dari setiap rangkaian elektronik yang terhubung dengan Arduino Mega sebagai pusat kendali. Rangkaian ini meliputi penghubung dengan sensor, motor driver, dan komponen lain yang saling terhubung dan memastikan robot dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan rancangan awal. Berikut ini adalah penjelasan dari setiap hasil rancangan elektronik.

Pada **Gambar 10** menampilkan desain dan konfigurasi dari sebuah robot penghisap debu yang dirancang dengan sistem navigasi fuzzy. Robot ini menggunakan roda mekanum yang memungkinkan pergerakan omnidirectional sehingga robot dapat bergerak ke segala arah dengan presisi tinggi, bahkan di area yang sempit atau kompleks. Setiap roda dikontrol oleh motor driver L298N untuk mengatur kecepatan dan arah gerak sesuai algoritma navigasi fuzzy yang diimplementasikan.

Sistem tenaga robot ini menggunakan baterai LiFePO₄ yang handal dan efisien untuk mendukung operasional yang tahan lama. Pada bagian navigasi, sensor ultrasonik ditempatkan di berbagai sisi robot untuk mendeteksi rintangan dan mendukung pengambilan keputusan berbasis fuzzy dalam menghindari halangan selama proses pembersihan.

Fitur utama robot ini adalah kemampuannya dalam menghisap debu, yang didukung oleh sensor partikulat DSM501A untuk mendeteksi kualitas udara atau tingkat debu di lingkungan. Komponen relay dan fuse diintegrasikan untuk menjaga keamanan sistem kelistrikan, melindungi dari lonjakan arus, dan memungkinkan kontrol daya secara optimal. Dengan adanya navigasi fuzzy, robot mampu menentukan jalur pergerakan secara adaptif berdasarkan kondisi lingkungan. Robot ini dirancang sebagai solusi inovatif untuk membersihkan area secara otomatis, dengan fokus pada efisiensi, ketepatan navigasi, dan kemampuan membersihkan yang maksimal.



Gambar 10. Hasil Perancangan Elektronik

D. Hasil Pengujian Fuzzy

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja Arduino Mega dalam mengontrol sistem pergerakan robot menggunakan algoritma fuzzy Takagi-Sugeno. Fokus utama pengujian adalah memastikan bahwa variasi sinyal PWM (Pulse Width Modulation) yang dikirimkan oleh Arduino Mega dapat mengatur kecepatan dan arah pergerakan motor secara bertahap. Dengan demikian, pergerakan robot dapat dikontrol sesuai dengan keputusan yang dihasilkan oleh sistem fuzzy, untuk mendukung efisiensi dan performa pergerakan robot.

Pengujian ini melibatkan pengukuran kecepatan motor, posisi robot, dan respons terhadap perintah yang diberikan oleh algoritma fuzzy. Berikut adalah hasil pengujian sistem menggunakan Arduino Mega dan motor driver L298N yang terhubung dengan motor omni. Data ini disusun berdasarkan pengukuran nilai PWM, kecepatan motor, posisi aktual robot, serta keterangan tambahan. Hasil pengujian ini akan memberitahu efektivitas rancangan yang dilakukan pada penelitian ini dan akan dapat dilihat perbedaannya dengan penelitian – penelitian terdahulu. Berikut ini adalah hasil pengujiannya, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel III**:

Tabel III. Hasil Pengujian Fuzzy

Jarak Rintangan (cm)		Kecepatan Robot (m/s)	Keputusan Fuzzy	Status Rintangan	Tindakan
25	Depan	0			(1.) Robot berhenti (semua motor DC off) dan mengaktifkan fungsi pengereman (reverse mundur) untuk mengurangi daya dorong robot
		0.7	Stop	Bahaya	(2.) Robot melakukan geser kanan sampai objek rintangan terlewati, kemudian maju dengan PWM star.
		0.7			(3.) Jika objek rintangan tidak terlewati maka robot bergeser ke kiri sampai objek terlewati kemudian bergerak maju dengan PWM star.
26 - 60	Depan	0.6	Maju Speed Low	Dekat	Robot bergerak pelan-pelan arah maju dan bersiap-siap untuk mengaktifkan fungsi berhenti dengan meningkatkan tingkat pembacaan sensor jarak
61 - 100	Depan	0.8	Maju Speed Medium	Sedang	Robot mengurangi kecepatan dan bergerak maju dengan kecepatan sedang (medium)
> 100	Depan	1.2	Maju Speed High	Aman	Robot bergerak maju dengan kecepatan normal
25	Belakang	0			(1.) Robot berhenti (semua motor DC off) dan mengaktifkan fungsi pengereman (reverse maju) untuk mengurangi daya dorong robot
		0.7	Stop	Bahaya	(2.) Robot melakukan geser kanan sampai objek rintangan terlewati, kemudian mundur dengan PWM star.
		0.7			(3.) Jika objek rintangan tidak terlewati maka robot bergeser ke kiri sampai objek terlewati kemudian bergerak mundur dengan PWM star.
26 - 60	Belakang	0.6	Mundur Speed Low	Dekat	Robot bergerak pelan-pelan arah mundur dan bersiap-siap untuk mengaktifkan fungsi berhenti dengan meningkatkan tingkat pembacaan sensor jarak
61 - 100	Belakang	0.8	Mundur Speed Medium	Sedang	Robot mengurangi kecepatan dan bergerak mundur dengan kecepatan sedang (medium)
> 100	Belakang	1.2	Mundur Speed High	Aman	Robot bergerak mundur dengan kecepatan normal
< 40	Sisi kiri	0	Stop	Bahaya	Robot berhenti dan melakukan gerakan geser kanan, kemudian melakukan gerak maju/mundur sesuai dengan kondisi kerja robot
41- 60	Sisi kiri	0.6	Speed Medium	Sedang	Robot mengurangi kecepatan saat gerakan geser kiri
> 60	Sisi kiri	0.8	Speed High	Aman	Robot bergerak geser kiri dengan kecepatan normal
< 40	Sisi kanan	0	Stop	Bahaya	Robot berhenti dan melakukan gerakan geser kiri, kemudian melakukan gerak maju/mundur sesuai dengan kondisi kerja robot
41- 60	Sisi kanan	0.6	Speed Medium	Sedang	Robot mengurangi kecepatan saat gerakan geser kanan
> 60	Sisi kanan	0.8	Speed High	Aman	Robot bergerak geser kanan dengan kecepatan normal

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel III**, sistem kendali navigasi pada robot penghisap debu ini dirancang menggunakan pendekatan logika fuzzy untuk menentukan kecepatan serta arah gerak berdasarkan informasi jarak dari sensor ultrasonik yang terpasang pada bagian depan, belakang, sisi kiri, dan sisi kanan robot. Keputusan yang diambil sistem fuzzy dibagi dalam beberapa kategori status rintangan, yaitu bahaya, dekat, sedang, dan aman. Pada kondisi rintangan yang sangat dekat (≤ 25 cm), baik di depan maupun belakang, sistem mengkategorikan situasi sebagai kondisi bahaya. Dalam hal ini, kecepatan fuzzy ditetapkan pada 0 hingga 0,7 m/s, dan robot akan segera menghentikan seluruh motor penggerak serta mengaktifkan fungsi pengereman. Selain itu, robot akan melakukan manuver geser kanan untuk menghindari objek rintangan. Jika objek tidak dapat dihindari dari sisi kanan, maka robot akan bergeser ke kiri hingga area bebas terdeteksi dan kemudian melanjutkan gerak maju atau mundur sesuai mode operasi saat itu.

Selanjutnya, pada rentang jarak 26–60 cm, sistem mendeteksi kondisi dekat, sehingga kecepatan robot diturunkan menjadi 0,6 m/s. Robot tetap bergerak dengan kecepatan rendah dan bersiap untuk berhenti apabila rintangan semakin dekat. Keadaan ini memungkinkan sistem melakukan evaluasi berkelanjutan terhadap lingkungan sekitar. Ketika rintangan berada dalam jarak sedang (61–100 cm), kecepatan robot ditingkatkan menjadi 0,8 m/s dengan kondisi robot tetap dalam mode siaga.

Jika tidak terdapat rintangan di sekitar (jarak > 100 cm), robot dianggap berada dalam kondisi aman dan diperbolehkan bergerak dengan kecepatan penuh sebesar 1,2 m/s. Prinsip yang sama juga diterapkan untuk arah belakang dengan arah gerak mundur, yang mengikuti pola keputusan fuzzy serupa seperti pada arah depan.

Sementara itu, deteksi rintangan dari sisi kiri dan kanan juga menghasilkan keputusan berbasis fuzzy yang berbeda. Apabila rintangan terdeteksi dalam jarak < 40 cm dari salah satu sisi, robot akan berhenti dan melakukan manuver menghindar ke sisi yang berlawanan. Setelah berhasil menghindari rintangan, robot akan kembali ke pola gerak awalnya (maju/mundur). Untuk jarak antara 41–60 cm, robot tetap melakukan gerakan geser namun dengan kecepatan yang dikurangi menjadi 0,6 m/s guna meningkatkan kehati-hatian. Jika jarak lebih dari 60 cm, sistem menganggap kondisi aman dan memungkinkan robot untuk bergerak menyamping dengan kecepatan normal sebesar 0,8 m/s.

Secara keseluruhan, penggunaan logika fuzzy dalam navigasi ini memungkinkan robot untuk mengambil keputusan secara adaptif dan fleksibel berdasarkan kondisi lingkungan sekitarnya. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi navigasi, tetapi juga memperkuat aspek keamanan operasional, terutama dalam menghindari tabrakan dengan rintangan dari berbagai arah.

IV. KESIMPULAN

Perancangan sistem robot penghisap debu telah berhasil dilakukan dengan mengintegrasikan komponen utama Arduino Mega 2560, sensor debu DSM501A, sensor ultrasonik HC-SR04, dan motor driver L298N untuk mendukung pergerakan roda mecanum. Logika fuzzy Takagi-Sugeno terbukti efisien dalam mengoptimalkan pembersihan dan beradaptasi dengan berbagai kondisi lingkungan rumah.

Keterbatasan pergerakan berhasil diatasi menggunakan roda mecanum yang memungkinkan robot bergerak ke segala arah—maju, mundur, lateral, diagonal, serta rotasi di tempat—tanpa mengubah orientasi. Kombinasi algoritma fuzzy dan desain holonomik memastikan robot mampu bermanuver dengan presisi tinggi di ruang sempit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Dewi and D. A. Riani, "Keberadaan tungau debu rumah (tdr) di permukiman manusia," *J. Rumpun Ilmu Kesehat.*, vol. 4, no. 2, pp. 13–17, 2024.
- [2] A. Hidayat, "Dampak Polusi Udara pada Kesehatan," 2023.
- [3] A. Lestari and others, "Paparan Debu Lingkungan Kerja dan Dampaknya Terhadap Pekerja di Home Industry C-Maxi Alloycasting," 2019.
- [4] R. F. R. De Breving, J. S. B. Tuda, and G. J. P. Wahongan, "Tungau Debu Rumah Yang Ditemukan Di Kelurahan Perkamil Kecamatan Paal 2 Kota Manado," *J. e-Biomedik*, vol. 1, no. 2, pp. 859–862, 2013, doi: 10.35790/ebm.1.2.2013.5471.
- [5] R. Reza, P. A. Wibowo, and A. Sakufa, "Hubungan Kadar Debu Total dengan Kejadian ISPA pada Pekerja Home Insudtry Batu Bata di Desa Dukuh Bendo Magetan," *JlIP-Jurnal Ilm. Ilmu Pendidik.*, vol. 5, no. 8, pp. 2942–2948, 2022.
- [6] A. Kiswanto and A. K. Alghofari, "Perancangan Alat Pembersih Botol Kaca Menggunakan Metode Quality Function Deployment (QFD)(Studi Kasus: UD Cleopatra Deenaka Bakalan, Sukoharjo)," Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2020.
- [7] R. N. Rohmah and N. Kaloka, "Pemanfaatan Smartphone berbasis Android sebagai Alat Pengontrol Pembersih Lantai," *J. Emit. Vol.*, vol. 19, no. 02, 2019.
- [8] A. M. Ritonga and S. Sahrul, "Kolaborasi DAI dan Aparat Desa Dalam Meningkatkan Kepedulian Kebersihan Lingkungan di Pesisir Pantai Kuala Putri Kabupaten Serdang Bedagai," *Innov. J. Soc. Sci. Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 6552–6563, 2023.
- [9] M. D. Fadhillah, D. F. Ulhaq, R. Marina, A. Lidiawati, S. Anwar, and T. Saumantri, "Peran Mahasiswa Dalam Meningkatkan Gotong Royong dan Kebersihan Lingkungan di Desa Japurabakti Kab. Cirebon," *Al-Khidmah J. Pengabd. dan Pendampingan Masy.*, vol. 4, no. 2, pp. 74–85, 2024.
- [10] D. Dekye, J. S. Ongko, T. Phangestu, and V. Rudianto, "Sosialisasi Pentingnya Menjaga Kebersihan Lingkungan Guna Meningkatkan Kesadaran Terhadap Lingkungan," in *National*

- Conference for Community Service Project (NaCosPro)*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 635–641.
- [11] H. Pranoto, S. P. Sutisna, and E. Sutoyo, “Rancang Bangun Sistem Penyapu pada Robot Pembersih Lantai,” *MEKANIKA*, vol. 1, no. 2, 2020.
- [12] M. T. Tamam and A. R. Pirmansyah, “Prototipe robot pembersih lantai berbasis mikrokontroler,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 11, no. 3, 2023.
- [13] A. Suherman, “Fire Search and Obstacle Avoidance Robot,” *Telekontran J. Ilm. Telekomun. Kendali dan Elektron. Terap.*, vol. 3, no. 2, pp. 37–46, 2015.
- [14] A. Yulio, K. Aulisari, and M. Orisa, “Penerapan Metode Fuzzy Pada Robot Penyedot Debu,” *JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform.)*, vol. 5, no. 1, pp. 45–52, 2021, doi: 10.36040/jati.v5i1.3330.
- [15] B. I. Aly and M. Werlin, “Robot Pembersih Lantai Kamar Mandi,” Universitas Islam Indonesia, 2025.
- [16] Z. Adeyanto, A. Izzuddin, and N. Hikmah, “Rancang Bangun Robot Vacuum Cleaner Dengan Menerapkan Propositional Logic Untuk Pengaturan Navigasi,” *J. Mnemon.*, vol. 3, no. 2, pp. 15–20, 2020, doi: 10.36040/mnemonic.v3i2.2800.
- [17] N. Ratama, M. Kom, and M. Munawaroh, *Konsep kecerdasan buatan dengan pemahaman logika fuzzy dan penerapan aplikasi*. Uwais Inspirasi Indonesia, 2019.
- [18] N. Holis, M. S. Zuhrie, Endryansyah, and N. Nurhayati, “Sistem Positioning Robot Four-Omnidirectional Wheels Menggunakan MPU6050 dan Encoder Berbasis PD-Fuzzy Controller,” *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 164–171, 2023, doi: 10.37905/jjee.v5i2.20138.
- [19] N. Ekawati and A. P. Salamena, “Menentukan Harga Jual Mobil Bekas Menggunakan Fuzzy Logic Metode Sugeno,” *Telekontran J. Ilm. Telekomun. Kendali dan Elektron. Terap.*, vol. 10, no. 2, pp. 155–162, 2022.
- [20] R. Cao, J. Gu, C. Yu, and A. Rosendo, “Omniwheg: An omnidirectional wheel-leg transformable robot,” in *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2022, pp. 5626–5631.
- [21] Z. S. I. Siradjuddin, and E. Budi, “Kontrol Arah Gerak 4 Buah Omni Wheels pada Penyedot Debu Dengan Metode Pid Secara Wireless,” *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 3, p. 112, 2020, doi: 10.33795/elkolind.v3i3.99.
- [22] G. G. Gavindra, I. H. Kusuma, and I. Cerdas, “Rancang Bangun Robot Penyedot Debu Otomatis Dengan Fitur Pembersih Anak Tangga Menggunakan Algoritme Deteksi Anak Tangga Berbasis Sensor Ultrasonik Dan Perencanaan Langkah Boustrophedon,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2021.
- [23] S. Sudarso, “Perancangan Prototipe Robot Pembersih Debu di Lantai Berbasis Arduino,” Universitas Lancang Kuning, 2020.
- [24] F. Muhammad, “Rancang Bangun Mobile Robot Penghisap Debu Dengan Pengoptimalan Waktu Pembersihan,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2020.
- [25] R. Z. Alhamri, T. A. Cinderatama, K. Eliyen, F. S. Efendi, and F. Sukya, “Penerapan Alat Monitoring Kabut Debu Berbasis IoT pada Pande Besi Dapur Setiawan Kiping Tulungagung,” *J. Pengabdian pada Masy. Ilmu Pengetah. dan Teknol. Terintegrasi*, vol. 9, no. 1, pp. 24–34, 2024.
- [26] M. Amin, R. Ananda, and J. Eska, “Analisis Penggunaan Driver Mini Victor L298N Terhadap Mobil Robot Dengan Dua Perintah Android Dan Arduino Nano,” *JURTEKSI (Jurnal Teknol. dan Sist. Informasi)*, vol. 6, no. 1, pp. 51–58, 2019.
- [27] A. Ulloh, T. Y. Prawira, and Y. Lestari, “Perancangan Robot Penghisap Debu Berbasis Arduino Uno Dengan Kontrol Android,” *J. Tek. Inform. dan Sist. Inf.*, vol. 3, no. 1, pp. 15–21, 2023.
- [28] I. H. Ayega, T. U. A. A. Tamba, and B. M. Arthaya, “Rancang Bangun Purwarupa Manipulator Lengan Robot Dengan Tiga Derajat Kebebasan,” *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. & Tek. Elektron.*, vol. 11, no. 3, p. 796, 2023.
- [29] F. A. Sihombing, “Kajian Fuzzy Metode Mamdani dan Fuzzy Metode Sugeno serta Implementasinya,” *Innov. J. Soc. Sci. Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 4940–4955, 2024.
- [30] M. K. I. B. Logika, “Implementasi Sistem Kontrol Irigasi Tetes Menggunakan Konsep IoT Berbasis Logika Fuzzy Takagi-Sugeno,” 2019.