

PENGEMBANGAN SISTEM DETEKSI KEBAKARAN HUTAN BERBASIS ESP32 DAN PANEL SURYA MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY UNTUK PEMANTAUAN MELALUI TELEGRAM

*¹Ervina Desviani Azzahra, ²Muchtar Ali Setyo Yudono

¹Jurusan Teknik Elektro

Universitas Nusa Putra

ervina.devianiazahra_te21@nusaputra.ac.id

²Jurusan Teknik Elektro

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

muchtar.ali@untirta.ac.id

Article history:

Received 29th of May 2025

Revised 1th of June 2025

Accepted 10th of June 2025

Abstract

Forest fires represent a significant threat that necessitates the implementation of rapid and accurate early detection systems to mitigate environmental and economic damage. This study develops a forest fire detection system based on the ESP32 microcontroller, employing the Mamdani fuzzy logic method to analyze environmental parameters, namely temperature, air humidity, and gas concentration, as indicators of fire risk. The system is powered by renewable energy sources, including solar panels and lithium batteries, to enable autonomous operation. Sensor calibration was conducted to enhance the precision and reliability of measurements. System testing was performed under various real-world environmental conditions to evaluate its performance. The results demonstrate that the system accurately classifies environmental status into three categories: Safe, Alert, and Danger, with a 100% accuracy rate. Additionally, the system integrates real-time early warning notifications through the Telegram platform, facilitating prompt responses to potential fire incidents. The adaptive nature of the fuzzy logic algorithm allows dynamic adjustment to fluctuations in environmental parameters. Overall, this research confirms the effectiveness of combining Internet of Things (IoT) technologies with fuzzy logic for proactive and reliable forest fire detection.

Keywords: Early Detection, Forest Fire, Fuzzy Logic, Iot, Renewable Energy

Pendahuluan

Hutan merupakan salah satu komponen ekosistem daratan yang memiliki fungsi ekologis, ekonomi, dan sosial yang sangat vital [1]. Secara ekologis, hutan berperan sebagai penyerap karbon dioksida (CO₂), penghasil oksigen (O₂), pengatur tata air, serta habitat bagi berbagai jenis flora dan fauna. Di tingkat global, hutan juga berkontribusi dalam mitigasi perubahan iklim melalui kemampuannya dalam menyerap emisi karbon [2]. Indonesia merupakan salah satu negara megadiversitas yang memiliki kawasan hutan tropis cukup luas, yaitu sekitar 125,76 juta hektare atau setara dengan 62,97% dari total luas daratan (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2023) [3]. Keberadaan hutan di Indonesia tidak hanya penting secara nasional, tetapi juga secara global, mengingat perannya dalam menyediakan oksigen serta menjaga kestabilan iklim dunia [4].

Ancaman terhadap keberlangsungan hutan semakin meningkat, salah satunya adalah kejadian kebakaran hutan dan lahan (karhutla) [5]. Kebakaran hutan dapat terjadi karena faktor alami seperti kondisi cuaca ekstrem dan musim kemarau berkepanjangan, maupun faktor antropogenik seperti pembukaan lahan dengan cara membakar, aktivitas pertanian yang tidak terkendali, serta kelalaian manusia [6]. Peristiwa kebakaran hutan menimbulkan dampak multidimensional, mulai dari pencemaran udara, terganggunya kesehatan masyarakat, rusaknya habitat satwa, hilangnya keanekaragaman hayati, hingga kerugian ekonomi yang signifikan [7].

Berdasarkan data Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Natuna, pada April 2024 telah terjadi kebakaran hutan di wilayah Kepulauan Riau yang menghancurkan sekitar 30 hektare lahan. Sejak Januari hingga April 2024, tercatat 49 kejadian kebakaran dengan total luasan lahan yang terbakar mencapai 700 hektare [8]. Tingginya frekuensi kejadian ini menunjukkan lemahnya sistem deteksi dan pencegahan dini, serta perlunya penguatan sistem pemantauan yang lebih adaptif dan responsif terhadap kondisi lingkungan secara *real-time* [9]. Seiring perkembangan teknologi, penerapan *Internet of Things* (IoT) menjadi solusi potensial dalam sistem pemantauan lingkungan [10]. Dengan integrasi berbagai sensor yang mampu mengukur parameter lingkungan seperti suhu, kelembaban udara, kelembaban tanah, serta konsentrasi gas dan asap, sistem ini dapat memberikan

informasi secara cepat dan akurat. Untuk meningkatkan kemampuan pengambilan keputusan dalam kondisi data yang tidak pasti, metode logika fuzzy (*Fuzzy Logic*) digunakan sebagai pendekatan inferensial guna menentukan tingkat risiko kebakaran secara lebih adaptif.

Tinjauan Pustaka

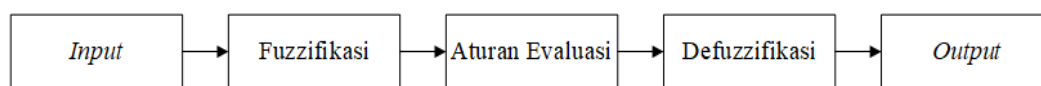
Berbagai penelitian telah mengembangkan sistem deteksi kebakaran hutan berbasis IoT dengan pendekatan yang beragam. Salah satunya adalah “*High Sensitivity Prototype Kit with IoT System for Fire Detection in a Peatland Swamp Forest Area*” [11]. Untuk mencegah kebakaran hutan gambut yang dapat merusak ekosistem dan memakan waktu pemulihan yang lama, jurnal ini membahas tentang pengembangan sistem deteksi kebakaran hutan gambut berbasis IoT menggunakan sensor asap fotoelektrik yang dilengkapi dengan fitur *auto reclosing* untuk meningkatkan sensitivitas dan mengurangi kesalahan deteksi akibat asap dari sumber non-kebakaran, seperti kendaraan atau pabrik. Sistem ini juga terintegrasi dengan *cloud server* dan notifikasi Telegram guna mempercepat proses pelaporan ke otoritas terkait.

Pada penelitian “*Multi Sensor Network System for Early Detection and Prediction of Forest Fires in Southeast Asia*” [12]. Untuk meningkatkan efektivitas sistem deteksi kebakaran hutan berbasis IoT, Evizal Abdul Kadir et al. (2023) mengembangkan jaringan multi-sensor yang memantau suhu, kelembaban, dan radiasi inframerah serta mengintegrasikannya dengan algoritma *machine learning*. Sistem ini mampu memprediksi kebakaran secara *real-time* dengan akurasi hingga 93,6%, sehingga relevan sebagai acuan dalam pengembangan sistem serupa pada penelitian ini.

Penelitian yang dilakukan oleh Sahal et al [13] menunjukkan bahwa metode fuzzy Mamdani efektif dalam memprediksi tingkat risiko kebakaran hutan berdasarkan suhu, kelembaban, dan kecepatan angin. Dengan akurasi hasil yang tinggi, sistem ini mampu mengidentifikasi kondisi berisiko tinggi pada Taman Nasional Tanjung Puting, sehingga menjadi rujukan yang relevan dalam pengembangan sistem deteksi kebakaran hutan berbasis IoT pada penelitian ini.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan logika fuzzy metode Mamdani untuk menentukan tingkat risiko kebakaran hutan berdasarkan parameter suhu, kelembaban, dan konsentrasi gas [14]. Sistem terdiri dari tiga tahap utama yaitu, fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi. Tahap fuzzifikasi mengubah nilai *input* dari sensor menjadi himpunan fuzzy. Selanjutnya, pada tahap inferensi, digunakan aturan *IF-THEN* untuk menentukan hubungan antar variabel *input* terhadap tingkat risiko. Terakhir, defuzzifikasi mengubah *output* fuzzy menjadi nilai tegas sebagai hasil akhir sistem. Nilai risiko yang dihasilkan digunakan sebagai dasar pengiriman notifikasi otomatis melalui Telegram sebagai bentuk peringatan dini.



Gambar 1. Diagram Blok Kontrol Logika Fuzzy Mamdani

A. Prinsip Kerja Sistem

Sistem deteksi kebakaran hutan ini menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan data lingkungan secara *real-time*. Sensor DHT22 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembaban, sedangkan MQ-2 mendeteksi gas mudah terbakar seperti asap, hidrogen, LPG, dan metana. Data sensor dianalisis menggunakan metode logika fuzzy Mamdani, yang memungkinkan evaluasi tingkat risiko kebakaran secara adaptif berdasarkan variasi nilai suhu, kelembaban, dan konsentrasi gas. Sistem didukung oleh panel surya 5V 12W yang terhubung ke modul pengisian daya dengan konverter *step-up/step-down* dan baterai Li-ion 3.7V/4.2V 6800mAh untuk menjaga kontinuitas

operasional. Ketika parameter lingkungan melebihi ambang batas, ESP32 mengirimkan notifikasi peringatan melalui jaringan WiFi ke *platform* Telegram secara otomatis. Integrasi sensor, logika fuzzy, dan sumber energi terbarukan menjadikan sistem ini solusi efektif untuk deteksi dini kebakaran hutan serta mendukung respons cepat dalam upaya mitigasi.

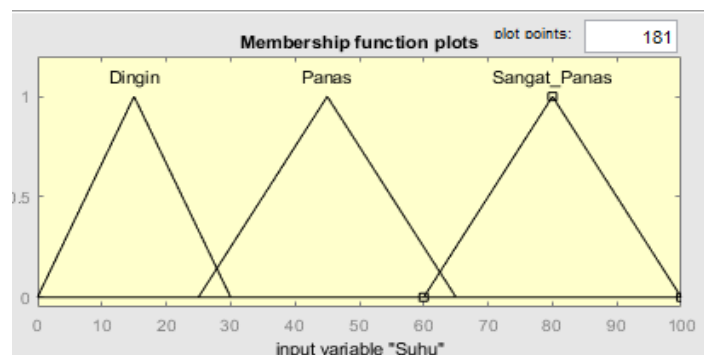
B. Fuzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses pemetaan dari himpunan tegas ke dalam himpunan fuzzy. Proses ini memastikan bahwa setiap elemen dalam himpunan tegas tercakup dalam himpunan fuzzy tanpa menyebabkan gangguan pada *input* sistem [15]. Tujuan dari fuzzifikasi adalah menyederhanakan perhitungan dalam sistem logika fuzzy [16]. Fuzzifikasi merupakan proses awal dalam sistem fuzzy yang mengkonversi nilai *crisp* menjadi nilai fuzzy [17]. Proses ini melibatkan identifikasi atribut numerik, penentuan rentang nilai, serta perhitungan derajat kemiripan berdasarkan rasio terhadap rentang, sehingga menghasilkan nilai keanggotaan antara 0 dan 1 [18]. Tabel 1. Dibawah merupakan tabel Variabel Linguistik dan Kategori Setiap Parameter.

Tabel 1. Variabel Linguistik

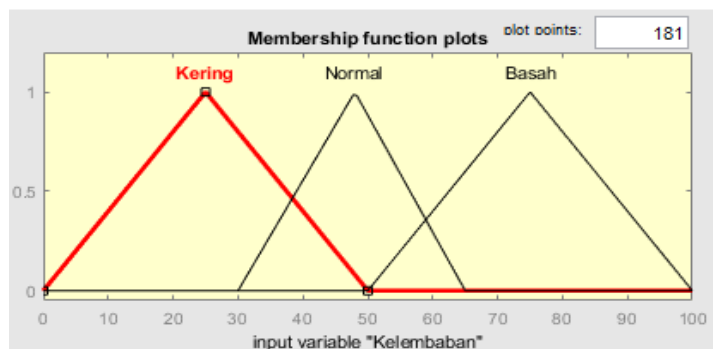
No	Parameter	Kriteria
1	Suhu (°C)	0 - 30
		25 - 65
		60 - 100
2	Kelembaban (%)	Dingin
		Panas
		Sangat Panas
3	Konsentrasi Gas (ppm)	0 - 50
		30 - 65
		50 - 100
4	Output	Kering
		Normal
		Basah
3	Konsentrasi Gas (ppm)	0 - 500
		300 - 900
		700 - 1200
4	Output	Rendah
		Sedang
		Tinggi
4	Output	0 - 40
		35 - 65
		60 - 100
		Aman
		Waspada
		Bahaya

Pada variabel suhu, didefinisikan tiga himpunan fuzzy, yaitu Dingin, Panas, dan Sangat Panas. Untuk merepresentasikan variabel suhu, digunakan kurva segitiga untuk ketiga himpunan fuzzy. Gambar 2 merupakan himpunan fuzzy untuk variabel suhu.



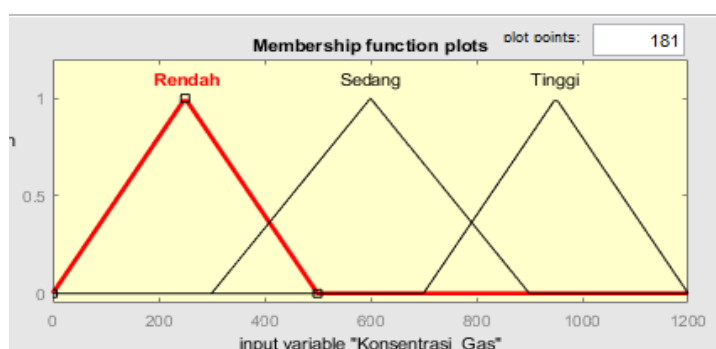
Gambar 2. Membership Function Input Variabel Suhu

Pada variabel Kelembaban, didefinisikan tiga himpunan fuzzy, yaitu Kering, Normal, dan Basah. Untuk merepresentasikan variabel kelembaban, digunakan kurva segitiga untuk ketiga himpunan fuzzy. Gambar 3 merupakan himpunan fuzzy untuk variabel kelembaban.



Gambar 3. Membership Function Input Variabel Kelembaban

Pada variabel Gas, didefinisikan tiga himpunan fuzzy, yaitu Rendah, Sedang, dan Tinggi. Untuk merepresentasikan variabel gas, digunakan kurva segitiga untuk ketiga himpunan fuzzy. Gambar 4 merupakan himpunan fuzzy untuk variabel gas.



Gambar 4. Membership Function Input Variabel Gas

C. Aturan Evaluasi

Sistem inferensi fuzzy merupakan kerangka komputasi yang berfungsi untuk memetakan nilai *input* ke *output* berdasarkan teori himpunan fuzzy, aturan berbentuk *IF-THEN*, dan proses penalaran fuzzy [19]. Sistem ini digunakan untuk merepresentasikan pengetahuan dan memodelkan hubungan antar variabel dalam suatu permasalahan [20]. Proses inferensi melibatkan pemetaan antara himpunan fuzzy pada bagian premis (*input*) menuju himpunan fuzzy pada bagian konsekuen (*output*) melalui aturan yang telah ditetapkan [21]. Terdapat beberapa metode inferensi yang umum digunakan, antara lain Mamdani, Tsukamoto, dan Sugeno [22]. Dalam penelitian ini, digunakan metode logika fuzzy Mamdani dengan penerapan sebanyak 27 aturan yang membentuk dasar pengambilan keputusan pada sistem yang dikembangkan. Tabel 2 dibawah ini menunjukkan aturan yang digunakan dalam sistem kontrol ini.

Tabel 2. Variabel dan Kategori Setiap Parameter

Suhu	Kelembaban	Gas	Output
Dingin	Kering	Rendah	Aman
Dingin	Kering	Sedang	Waspada
Dingin	Kering	Sedang	Bahaya
Dingin	Normal	Rendah	Aman
Dingin	Normal	Sedang	Waspada
Dingin	Normal	Tinggi	Bahaya
Dingin	Basah	Rendah	Aman
Dingin	Basah	Sedang	Aman
Dingin	Basah	Tinggi	Waspada
Panas	Kering	Rendah	Waspada

Suhu	Kelembaban	Gas	Output
Panas	Kering	Sedang	Bahaya
Panas	Kering	Tinggi	Bahaya
Panas	Normal	Rendah	Waspada
Panas	Normal	Sedang	Bahaya
Panas	Normal	Tinggi	Bahaya
Panas	Basah	Rendah	Aman
Panas	Basah	Sedang	Waspada
Panas	Basah	Tinggi	Bahaya
Sangat Panas	Kering	Rendah	Bahaya
Sangat Panas	Kering	Sedang	Bahaya
Sangat Panas	Kering	Tinggi	Bahaya
Sangat Panas	Normal	Rendah	Waspada
Sangat Panas	Normal	Sedang	Bahaya
Sangat Panas	Normal	Tinggi	Bahaya
Sangat Panas	Basah	Rendah	Waspada
Sangat Panas	Basah	Sedang	Bahaya
Sangat Panas	Basah	Tinggi	Bahaya

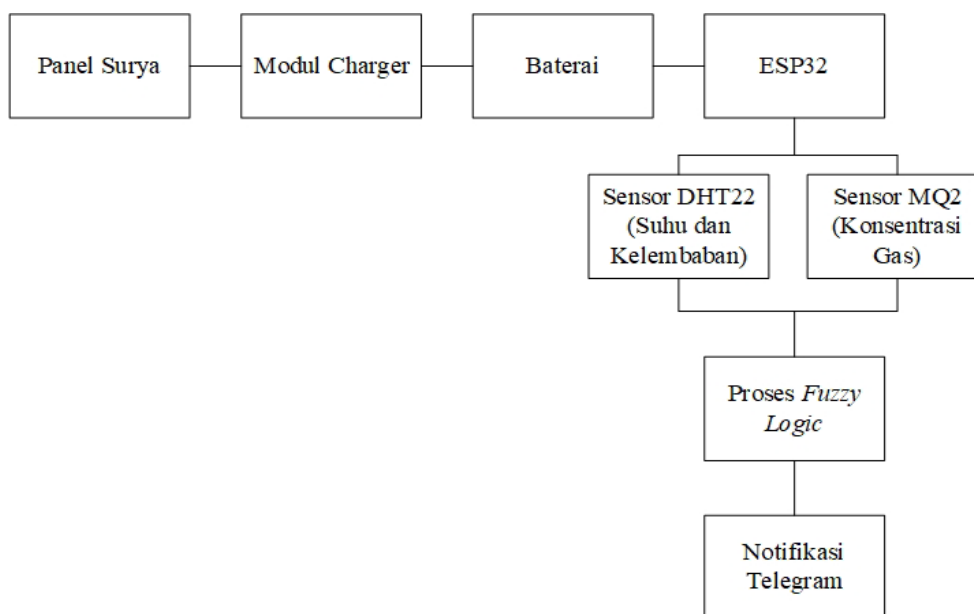
D. Defuzzifikasi

Pada proses defuzzifikasi yang merupakan tahap akhir dalam sistem logika fuzzy, sistem melakukan konversi hasil penilaian logika fuzzy menjadi nilai tegas (*crisp value*) [23] yang merepresentasikan tingkat potensi kebakaran hutan. Proses ini dilakukan menggunakan metode *centroid* (pusat massa), yaitu teknik defuzzifikasi yang menghitung titik tengah dari area di bawah kurva fungsi keanggotaan fuzzy [24]. Metode ini dipilih karena mampu memberikan representasi yang paling seimbang dari keseluruhan nilai keluaran fuzzy berdasarkan derajat keanggotaannya. Evaluasi dilakukan terhadap masing-masing variabel *input*, yaitu suhu, kelembaban udara, dan konsentrasi gas mudah terbakar, yang sebelumnya telah dianalisis melalui aturan logika fuzzy. Hasil pengolahan tersebut menghasilkan satu nilai keluaran yang mencerminkan risiko kebakaran berdasarkan gabungan keanggotaan fuzzy dari semua variabel [25].

Nilai keluaran tersebut selanjutnya diklasifikasikan ke dalam tiga kategori tingkat risiko, yaitu Aman, Waspada, dan Bahaya. Kategori Aman menunjukkan bahwa kondisi lingkungan masih berada dalam batas normal tanpa indikasi kebakaran. Kategori Waspada menunjukkan adanya tanda-tanda awal peningkatan risiko kebakaran, sementara kategori Bahaya menandakan bahwa parameter lingkungan telah melampaui ambang kritis sehingga berpotensi tinggi terjadi kebakaran hutan [26]. Klasifikasi ini menjadi dasar bagi sistem untuk mengirimkan notifikasi secara otomatis melalui *platform* Telegram, sebagai bagian dari implementasi sistem peringatan dini (*early warning system*) yang mendukung deteksi dan respons cepat terhadap potensi kebakaran hutan.

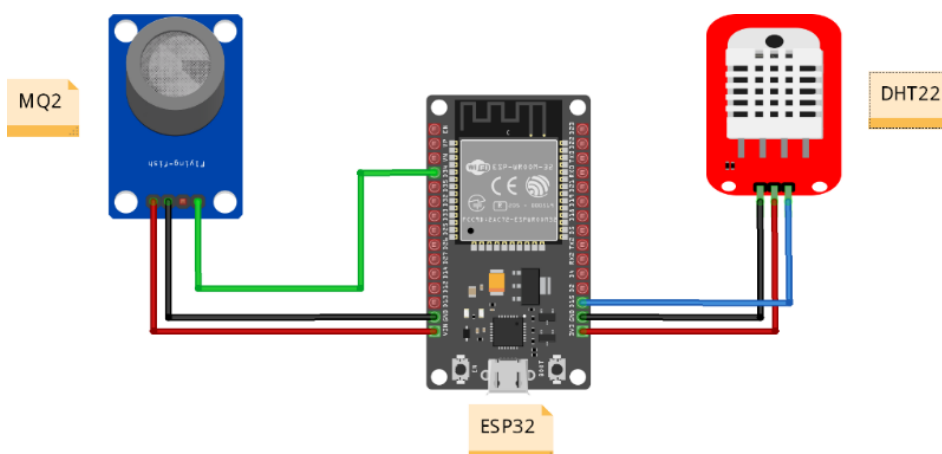
E. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras pada sistem deteksi kebakaran hutan berbasis ESP32 dirancang untuk memastikan operasional yang stabil dan efisien dalam kondisi lapangan. Sistem ini beroperasi setelah memperoleh suplai daya yang stabil dari modul *charger* yang terintegrasi dengan panel surya bertegangan 5V dan daya 12W serta baterai lithium-ion 3,7V dengan kapasitas 6800 mAh sebagai sumber energi cadangan. Mikrokontroler ESP32 bertindak sebagai pusat kendali yang menerima data pengukuran dari sensor DHT22 yang berfungsi mengukur suhu dan kelembaban udara, serta sensor MQ-2 yang mendeteksi konsentrasi gas dan asap yang mengindikasikan potensi kebakaran.



Gambar 5. Diagram Blok Perancangan Perangkat Keras

Suplai daya untuk seluruh sensor dan modul dikondisikan oleh modul *charger* yang dilengkapi dengan fungsi *step-up* dan *step-down* untuk menjaga kestabilan tegangan sesuai kebutuhan sistem. Sensor tersebut melakukan pembacaan secara periodik dan mengirimkan data ke mikrokontroler untuk diproses menggunakan metode logika fuzzy. Ketika nilai parameter lingkungan melampaui ambang batas yang telah ditentukan, sistem secara otomatis menginisiasi pengiriman notifikasi peringatan melalui aplikasi Telegram. Dengan demikian, rancangan perangkat keras ini menjamin kontinuitas pemantauan secara *real-time*, mendukung deteksi dini kebakaran hutan di lokasi yang sulit dijangkau tanpa ketergantungan pada sumber listrik konvensional.



Gambar 6. Rangkaian Koneksi ESP32 dengan Sensor DHT22 dan Sensor MQ-2

Gambar 6. di atas merupakan diagram pengkabelan sistem deteksi kebakaran hutan berbasis IoT. Pada rangkaian tersebut, ESP32 dihubungkan dengan sensor DHT22 melalui *pin* 3V3 ke VCC, GND ke GND, dan data (SDA) ke *pin* D15. Sementara itu, sensor MQ-2 terhubung ke ESP32 dengan konfigurasi VCC ke VIN, GND ke GND, dan AOUT ke *pin* D34 untuk pembacaan data analog. Rangkaian ini dirancang untuk mendukung akuisisi data suhu, kelembaban, dan gas secara *real-time*.

Tahap awal implementasi sistem, digunakan beberapa komponen utama yang telah dirancang untuk saling terintegrasi dalam mendukung proses akuisisi data lingkungan. Komponen ini berperan dalam membaca parameter fisik yang relevan terhadap potensi kebakaran, dan menjadi dasar dalam proses

pengolahan data menggunakan metode logika fuzzy. Daftar lengkap komponen yang digunakan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Daftar Komponen Perangkat Keras

Nama Komponen	Kegunaan
ESP32	Mikrokontroler untuk mengolah data dan mengirim notifikasi
Sensor DHT22	Untuk mengukur suhu dan kelembaban udara
Sensor MQ2	Mendeteksi konsentrasi gas dan asap
Baterai Lithium	Menyimpan energi dan daya sistem
Modul charger <i>step-up/down</i>	Mengatur pengisian dan distribusi tegangan
Panel Surya	Menyuplai energi terbarukan untuk sistem

F. Perancangan Perangkat Lunak

Pada tahap awal perancangan perangkat lunak, sistem menginisialisasi koneksi WiFi, mengonfigurasi sensor DHT22 untuk pembacaan suhu dan kelembaban udara, serta sensor MQ-2 untuk mendeteksi konsentrasi gas dalam bentuk tegangan analog. Sistem juga memuat aturan logika fuzzy Mamdani untuk mengolah data sensor menjadi keputusan status kebakaran. Nilai suhu ($^{\circ}\text{C}$), kelembaban (%RH), dan konsentrasi gas (ppm/tegangan) dibaca secara berkala sebagai *input* ke sistem inferensi fuzzy, dengan himpunan seperti "Dingin", "Normal", "Panas" (suhu), "Rendah", "Normal", "Tinggi" (kelembaban dan gas). Hasil inferensi menentukan status lingkungan: aman, waspada, atau darurat. Jika kondisi darurat terdeteksi dari hasil defuzzifikasi, sistem mengaktifkan modul notifikasi dan mengirim peringatan *real-time* melalui Telegram. Seluruh sistem didukung oleh panel surya 5V 12W dan baterai lithium-ion 3,7V/6800mAh melalui modul *charger* berfitur *step-up* dan *step-down*, untuk memastikan operasi mandiri di lokasi tanpa listrik utama.

Perancangan sistem logika fuzzy dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB melalui fitur *Fuzzy Logic Designer*. Tahapan yang dilakukan meliputi penentuan variabel *input* dan *output*, pembentukan himpunan fuzzy, serta penyusunan aturan berbasis metode Mamdani. Tiga variabel *input* yang digunakan adalah suhu udara, kelembaban udara, dan konsentrasi gas, masing-masing dibagi ke dalam tiga himpunan fuzzy:

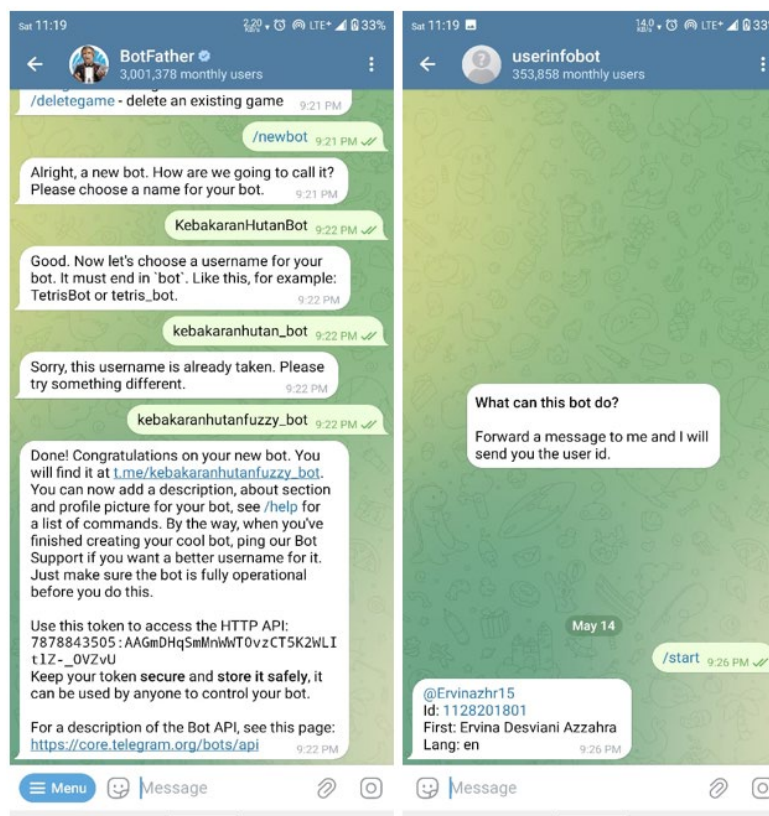
- Suhu: Dingin, Normal, Panas
- Kelembaban: Rendah, Normal, Tinggi
- Gas: Rendah, Sedang, Tinggi

Output sistem fuzzy berupa tingkat risiko kebakaran diklasifikasikan ke dalam tiga kategori yaitu, Aman, Waspada, dan Darurat. Sebanyak 27 aturan fuzzy dirancang dari kombinasi ketiga parameter *input*, dengan proses defuzzifikasi menggunakan metode *centroid*. Hasil simulasi digunakan sebagai dasar penerapan sistem inferensi pada mikrokontroler untuk pengambilan keputusan otomatis. Sistem juga dilengkapi fitur *notifikasi real-time* melalui Telegram, yang dikonfigurasi menggunakan bot API resmi dengan token dan chat ID untuk mengirimkan hasil inferensi kondisi lingkungan.

Proses pengiriman notifikasi dilakukan oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan protokol HTTP GET, dengan format URL sebagai berikut:

https://api.telegram.org/bot<TOKEN>/sendMessage?chat_id=<CHAT_ID>&text=<PESAN>

Implementasi program dilakukan menggunakan Arduino IDE, dengan *library* WiFi.h untuk koneksi jaringan dan HTTPClient.h untuk permintaan HTTP. Pesan yang dikirim mencakup status lingkungan yang dihasilkan oleh sistem fuzzy, seperti aman, waspada, maupun darurat, serta nilai sensor yang terkait. Integrasi ini bertujuan untuk menyampaikan informasi kondisi lingkungan secara cepat dan akurat kepada pengguna atau petugas, sehingga dapat menunjang pengambilan keputusan yang responsif terhadap potensi kebakaran hutan.



Gambar 7. Proses Pembuatan Bot Telegram Menggunakan Botfather untuk Penamaan Bot dan Pemilihan Username serta Pemberian Token API.

Hasil dan Pembahasan

Kalibrasi sensor DHT22 dan MQ-2 dilakukan untuk memastikan tingkat akurasi hasil pembacaan sensor terhadap kondisi lingkungan nyata. Sensor DHT22 dikalibrasi dengan membandingkan nilai suhu dan kelembaban yang terbaca dengan data dari termometer digital yang memiliki fungsi pengukuran kedua parameter tersebut. Sementara itu, kalibrasi sensor gas MQ-2 dilakukan dengan mengevaluasi respons sensor terhadap berbagai kondisi pembakaran, seperti asap dari korek api, lilin, rokok, dan plastik terbakar. Hasil kalibrasi ini menjadi dasar dalam penentuan rentang nilai pada sistem logika fuzzy yang digunakan, serta disajikan dalam bentuk tabel guna menunjukkan validitas pengukuran sensor. Dibawah ini merupakan data hasil kalibrasi sensor ditunjukkan oleh Tabel 4 sampai dengan Tabel 6.

Tabel 4. Hasil Kalibrasi Sensor DHT22 untuk Parameter Suhu (°C)

Termometer	Alat	Selisih
33.6	29.5	4.1
36.2	27.7	8.5
32.6	27.8	4.8
32.3	27.4	4.9

Rerata koreksi suhu = $(4.10 + 8.50 + 4.80 + 4.90) / 4 = 5.58^{\circ}\text{C}$

Tabel 4 menunjukkan bahwa sensor DHT22 cenderung membaca suhu lebih rendah dibandingkan termometer digital, dengan selisih berkisar antara 4.1°C hingga 8.5°C , dan rerata koreksi sebesar 5.58°C . Hasil ini menunjukkan perlunya penyesuaian nilai pembacaan suhu dalam sistem agar sesuai dengan kondisi lingkungan nyata. Data kalibrasi ini menjadi acuan dalam menetapkan rentang suhu pada logika fuzzy agar sistem dapat mendeteksi risiko kebakaran secara lebih akurat.

Tabel 5. Hasil Kalibrasi Sensor DHT22 untuk Parameter Kelembaban

Termometer	Alat	Selisih
94	81	13.4
100	86	14.3
83	88	-4.9
83	87	-3.9
Rerata koreksi kelembaban = $(13.4 + 14.3 - 4.9 - 3.9) / 4 = 4.73\%$		

Tabel 5 menunjukkan hasil kalibrasi sensor DHT22 pada parameter kelembaban dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap alat termometer digital sebagai acuan. Selisih pembacaan berkisar antara -4,9% hingga 14,3%, dengan rata-rata koreksi sebesar 4,73%. Hasil ini menunjukkan adanya deviasi yang signifikan pada pembacaan sensor, sehingga koreksi diperlukan untuk meningkatkan akurasi pengukuran kelembaban. Koreksi kalibrasi ini penting dalam memastikan data kelembaban yang digunakan pada sistem deteksi kebakaran hutan berbasis ESP32 dapat merepresentasikan kondisi lingkungan secara akurat dan mendukung pengambilan keputusan berbasis logika fuzzy.

Tabel 6. Hasil Kalibrasi Sensor MQ2 untuk Parameter Gas

Kondisi Normal	Kondisi Terpapar	Sumber Gas	Selisih
	1639	Korek	1179
460	3193	Lilin	2733
	722	Rokok	262
	610	Bakaran Plastik	150
Rerata koreksi konsentrasi gas = $(1179 + 2733 + 262 + 150) / 4 = 1081$			

Kalibrasi sensor MQ-2 dan DHT22 dilakukan untuk memastikan akurasi pembacaan terhadap kondisi lingkungan nyata. Sensor DHT22 dikalibrasi dengan membandingkan hasil pengukuran suhu dan kelembaban terhadap termometer digital, sementara MQ-2 diuji terhadap asap dari berbagai sumber pembakaran seperti korek api, lilin, rokok, dan plastik terbakar. Hasil kalibrasi ini menjadi acuan dalam penentuan rentang nilai logika fuzzy dan disajikan pada Tabel 6.

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kemampuannya dalam mendeteksi potensi kebakaran berdasarkan parameter suhu, kelembaban, dan konsentrasi gas. Uji coba dilakukan dalam empat kondisi yaitu, normal, paparan api, asap rokok, dan pembakaran sampah, masing-masing diuji dua kali untuk validasi data. Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan tingkat risiko secara akurat dan mengirimkan *notifikasi* melalui Telegram sesuai kondisi terdeteksi. Data pengujian disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Sistem Deteksi Kebakaran Berdasarkan Kondisi Lingkungan

Sumber/Kondisi	Pengujian Ke	Suhu (°C)	Kelembaban (%)	Gas (ppm)	Telegram
Normal	1	25.5	100	0	Aman
	2	25.6	100	0	Aman
Korek	1	25.6	100	1215	Waspada
	2	25.5	100	1014	Waspada
Rokok	1	28.7	100	1026	Waspada
	2	26.5	100	1345	Waspada
Sampah	1	25.5	100	4095	Waspada
	2	26.3	100	1279	Waspada

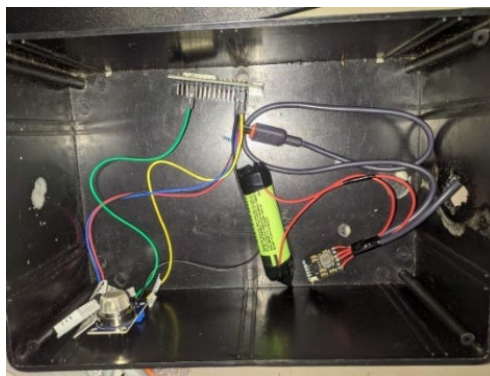
Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem deteksi kebakaran berbasis ESP32 dengan metode logika fuzzy berfungsi sesuai tujuan perancangan. Pada kondisi normal, pembacaan parameter suhu, kelembaban, dan konsentrasi gas berada dalam rentang aman, sehingga sistem mengeluarkan notifikasi "Aman". Saat sistem dipaparkan oleh sumber api seperti korek dan pembakaran sampah,

sensor MQ-2 mendeteksi lonjakan signifikan konsentrasi gas, berkisar di atas 1000 ppm hingga maksimum 4095 ppm. Kondisi ini memicu sistem mengeluarkan notifikasi "Waspada", sesuai dengan aturan fuzzy yang telah dirancang. Pengujian terhadap asap rokok juga menunjukkan hasil akurat, di mana nilai gas mencapai 1345 ppm. Meskipun tidak sebesar pembakaran sampah, nilai ini cukup untuk memicu notifikasi Waspada, membuktikan sensitivitas sistem terhadap sumber asap ringan yang potensial menjadi pemicu kebakaran, khususnya di musim kemarau.

Sensor DHT22 mencatat suhu berkisar antara 25,5–28,7 °C dan kelembaban relatif konstan pada 100 %. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem lebih peka terhadap perubahan parameter gas sebagai indikator utama risiko kebakaran, dibandingkan suhu dan kelembaban. Sistem secara konsisten memantau lingkungan dan mengirimkan notifikasi peringatan dini melalui *platform* Telegram secara *real-time*, memungkinkan respons cepat terhadap perubahan kondisi.

Secara keseluruhan, sistem berhasil mengklasifikasikan lingkungan ke dalam tiga status risiko yaitu, Aman, Waspada, dan Bahaya, dengan mempertimbangkan suhu udara, kelembaban relatif, dan konsentrasi gas. Pada kondisi tanpa paparan asap atau api, sistem mengidentifikasi status Aman dengan suhu rerata 25,5 °C, kelembaban 100 %, dan konsentrasi gas mendekati nol. Sebaliknya, ketika terpapar pembakaran, sistem mendeteksi peningkatan signifikan pada parameter gas dan mengeluarkan notifikasi Waspada, meskipun suhu dan kelembaban tetap relatif stabil. Hal ini menunjukkan bahwa parameter gas memiliki bobot dominan dalam proses inferensi fuzzy.

Fitur notifikasi Telegram berjalan secara optimal, mengirimkan peringatan dini secara otomatis dan *real-time*. Integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam sistem ini terbukti meningkatkan efisiensi deteksi kebakaran hutan secara adaptif dan mudah diakses. Meskipun sistem menunjukkan performa akurat dan stabil pada berbagai kondisi pengujian, disarankan untuk melakukan pengujian lanjutan dalam lingkungan terbuka dengan variasi sumber api lainnya guna mengevaluasi konsistensi dan ketahanan sistem dalam menghadapi gangguan eksternal dan skenario ekstrem.



Gambar 8. Implementasi Alat Deteksi Kebakaran Hutan

Kesimpulan

Sistem deteksi kebakaran hutan berbasis ESP32 dengan metode logika fuzzy Mamdani, yang didukung oleh panel surya dan baterai lithium sebagai sumber energi terbarukan, telah berhasil beroperasi secara efektif dalam memantau parameter suhu, kelembaban udara, dan konsentrasi gas secara *real-time*. Hasil kalibrasi menunjukkan validitas pengukuran sensor dengan koreksi yang sesuai, sedangkan pengujian sistem memperlihatkan kemampuan klasifikasi kondisi lingkungan ke dalam tiga status, yaitu Aman, Waspada, dan Bahaya, dengan respons yang akurat terhadap perubahan parameter, khususnya lonjakan konsentrasi gas dari berbagai sumber pembakaran seperti korek api, rokok, dan pembakaran sampah. Sistem juga mampu mengirimkan notifikasi peringatan dini secara tepat waktu melalui *platform* Telegram. Evaluasi akurasi memperlihatkan keberhasilan pengujian

dengan tingkat akurasi 100%. Dengan demikian, sistem ini telah memenuhi tujuan perancangan sebagai alat deteksi potensi kebakaran hutan yang andal dan adaptif.

Daftar Pustaka

- [1] G. A. Yasir and Fathia Frazna Az-Zahra, "Prototipe Pendeteksi Kebakaran Menggunakan NodeMCU ESP8266 Dengan implementasi Logika Fuzzy," *Elkom J. Elektron. dan Komput.*, vol. 15, no. 2, pp. 280–288, 2022, doi: 10.51903/elkom.v15i2.737.
- [2] M. N. A. Ramadan *et al.*, "Towards early forest fire detection and prevention using AI-powered drones and the IoT," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 27, no. June, p. 101248, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101248.
- [3] F. T. Simanjuntak, A. Sani, H. M. Maulidiah, W. R. Puspita, and B. Budiana, "Prototype for Forest Fire Early Detection System Using the MQTT Method," *J. Appl. Electr. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 24–31, 2024, doi: 10.30871/jaee.v8i1.7544.
- [4] Y. Hu *et al.*, "Fast forest fire smoke detection using MVMNet," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 241, p. 108219, 2022, doi: 10.1016/j.knosys.2022.108219.
- [5] B. H. Saharjo and U. Hasanah, "Analisis Faktor Penyebab Terjadinya Kebakaran Hutan dan Lahan di Kabupaten Pulang Pisau, Kalimantan Tengan," *J. Trop. Silv.*, vol. 14, no. 01, pp. 25–29, 2023, doi: 10.29244/j-siltrop.14.01.25-29.
- [6] F. R. Ananda, E. P. Purnomo, A. T. Fathani, and L. Salsabila, "Strategi Pemerintah Daerah Dalam Mengatasi Kebakaran Hutan dan Lahan di Kabupaten Kotawaringin Barat," *J. Ilmu Sos. dan Hum.*, vol. 11, no. 2, pp. 173–181, 2022, doi: 10.23887/jish.v11i2.34698.
- [7] H. A. Rosit, A. Mardhotillah, R. A. Delazenitha, S. Mutiarani, and T. V. C. Sulle, "Identifikasi dan Mitigasi Kebakaran Hutan dan Lahan melalui Zonasi Wilayah Rawan Kebakaran dengan Teknologi Geospasial," *Widya Bhumi*, vol. 3, no. 1, pp. 13–30, 2023, doi: 10.31292/wb.v3i1.53.
- [8] "700 Hektare Hutan dan Lahan Terbakar di Natuna Sejak Awal 2024 Baca artikel CNN Indonesia '700 Hektare Hutan dan Lahan Terbakar di Natuna Sejak Awal 2024' selengkapnya di sini: <https://www.cnnindonesia.com/nasional/20240424132650-20-1089913/700-hektare-hu>," CNN Indonesia.
- [9] S. A. Hamzah *et al.*, "Design and Built a Prototype Kit for Fire Detection in a Peat Swamp Forest: A Preliminary Results," *J. Sustain. Nat. Resour.*, vol. 02, no. 01, pp. 7–19, 2021, doi: 10.30880/jsunr.2021.02.01.002.
- [10] Z. Saryendy and M. Unik, "Jurnal Computer Science and Information Technology (CoSciTech) Development of Internet Of Things (IOT) System with LoRa (Long Range) and Solar Energy for Automatic Detection of Forest and Ground Fires," vol. 5, no. 2, pp. 340–347, 2024.
- [11] S. A. Hamzah *et al.*, "High Sensitivity Prototype Kit with IoT System for Fire Detection in a Peatland Swamp Forest Area," *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 226–232, 2023, doi: 10.30880/ijie.2023.15.01.020.
- [12] E. A. Kadir, A. Alomainy, H. Daud, W. Maharani, N. Muhammad, and N. Syafitri, "Multi Sensor Network System for Early Detection and Prediction of Forest Fires in Southeast Asia," *2023 33rd Int. Telecommun. Networks Appl. Conf. ITNAC 2023*, pp. 190–195, 2023, doi: 10.1109/ITNAC59571.2023.10368547.
- [13] N. S. Muhtadi, D. M. Rahman, and D. F. Suriyanto, "Analisis Risiko Kebakaran Hutan Dengan Logika Fuzzy Mamdani," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 1, 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i1.3902.
- [14] E. Irmawan, T. K. Priyambodo, and E. Sofyan, "Sistem Kendali Adaptif Neuro-Fuzzy Pid Pada Kapal Katamaran Tanpa Awak," *Tek. STTKD J. Tek. Elektron. Engine*, vol. 3, no. 2, pp. 5–16, 2016, [Online]. Available: <https://jurnal.sttkd.ac.id/index.php/ts/article/view/140>
- [15] I. F. Rahmad, L. Tanti, B. Triandi, I. Komputer, R. S. Komputer, and U. P. Utama, "Wireless Sensor Network Sebagai Penentu Lokasi Kebakaran Hutan," *TIN Terap. Inform. Nusant.*, vol. 2, no. 3, pp. 138–144, 2021.
- [16] C. Wahyudi, V. C. Poekoel, and J. Litouw, "Stabilisasi pH dengan Sistem Kendali Fuzzy pada Vertikultur Hidroponik," *E-Journal*, pp. 1–11, 2022.
- [17] U. Mendeteksi and P. Udara, "Sistem Monitoring Lingkungan Berbasis IoT Dan WSN Untuk Mendeteksi Pencemaran Udara," vol. 3, no. 1, pp. 1–9, 2025.
- [18] M. N. Taukid, I. Elzandy, A. P. Adyani, and ..., "Program Pengendali Kipas Angin Berdasarkan Suhu dan Kelembaban Menggunakan Logika Fuzzy," *Pros. Semin. ...*, vol. 3, pp. 42–52, 2023, [Online]. Available: <http://santika.upnjatim.ac.id/submissions/index.php/santika/article/view/186%0Ahttp://santika.upnjatim.ac.id/submissions/index.php/santika/article/download/186/90>
- [19] W. Hapsari, Bambang Darmo Yuwono, and F. J. Amarrohman, "Analisis Pengaruh Curah Hujan Dan Sebaran Titik Panas Terhadap Luas Area Kebakaran Hutan Dan Lahan Di Kabupaten Bengkalis Menggunakan Indeks Normalized Burn Ratio," *J. Geod. Undip*, vol. 12, no. 4, pp. 341–350, 2023.

- [20] T. M. Siregar, F. Anshari, B. Pratiwi, D. C. Pelawi, and J. D. G. Silalahi, "Model Optimasi Himpunan Fuzzy Untuk Menentukan Harga Jual Optimal Pada Daging Sapi," *Innov. J. Soc. Sci. Res.*, vol. 3, pp. 3263–3275, 2023, [Online]. Available: <https://j-innovative.org/index.php/Innovative%0AModel>
- [21] A. F. Saptari and D. N. Handiani, "Penentuan Daerah Rawan Kebakaran Hutan Di Kabupaten Alor Nusa Tenggara Timur Dengan Metode Fuzzy Logic," *Pros. FTSP Semin. Nas. dan Disem. Tugas Akhir Inst. Teknol. Nas. Bandung*, no. 2, pp. 272–277, 2022, [Online]. Available: <https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/ftsp/article/view/1400%0Ahttps://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/ftsp/article/download/1400/1240>
- [22] T. Samudra, U. Juhardi, M. H. Rifqo, and Y. Darmi, "Implementasi Algoritma Fuzzy Tsukamoto Dalam Menentukan Harga Jual Udang Pada Tambak Udang Desa Linau Kabupaten Kaur P-Issn," *J. Media Infotama*, vol. 20, no. 1, pp. 371–377, 2024.
- [23] I. Irfanianingrum, A. Rizal Chaidir, S. Sumardi, G. Aditya Rahardi, and D. Wahyu Herdiyanto, "Sistem Pendeteksi Dini Kebakaran Hutan Berbasis Logika Fuzzy dengan Integrasi Telegram," *Emit. J. Tek. Elektro*, vol. 22, no. 2, pp. 120–127, 2023, doi: 10.23917/emit.v22i2.22019.
- [24] S. Suherman, R. Wahyuni, A. Muhaimin, and Y. Irawan, "Sistem Pendeteksi Dini Kebakaran Untuk Penanggulangan Bencana Lingkungan Kebakaran Hutan Dan Lahan Di Provinsi Riau," *JSR Jar. Sist. Inf. Robot.*, vol. 6, no. 2, pp. 148–154, 2022, doi: 10.58486/jsr.v6i2.170.
- [25] F. T. Hartadi, B. A. Wicaksana, H. Saputro, and A. S. Priambodo, "Sistem Kendali Fuzzy Untuk Robot Mobile: Studi Kasus Pelacakan Objek Bergerak Menggunakan Simulasi Webots," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 3, pp. 2050–2060, 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.4608.
- [26] E. Eko Prasetyo, O. Wahyunggoro, and S. Tinggi Teknologi Kedirgantaraan Yogyakarta, "Desain Lampu Lalu Lintas Adaptif Dengan Kendali Logika Fuzzy," *J. Tek. STTKD*, vol. 2, no. 2, pp. 2460–1608, 2015.