



Prototipe Sistem Pencegahan Kebakaran Rumah Berbasis Logika Fuzzy Mamdani

Moch. Zaki Irfansya¹, Widi Aribowo², Aditya Chandra Hermawan³, As'ad Shidqy Aziz⁴

^{1,2,3,4}Sarjana Terapan Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya

Article Info

Article history:

Diterima 18 Juli 2026

Direvisi 21 Juli 2026

Diterbitkan 22 Juli 2026

Keywords:

ESP32-CAM

False Alarm

Kebakaran

Logika Fuzzy Mamdani

Verifikasi Ganda.

ABSTRAK

Sistem proteksi kebakaran konvensional sering kali menghasilkan *false alarm* akibat ketidakmampuan membedakan asap kebakaran dengan gangguan domestik non-kebakaran. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem proteksi dini kebakaran cerdas berbasis logika fuzzy Mamdani yang mengintegrasikan sensor suhu DHT22, sensor kadar asap MQ-2 (pada maket dan ruang tamu), serta modul ESP32-CAM untuk verifikasi ganda visual. Pendekatan fuzzy dipilih karena perubahan suhu dan asap bersifat gradual. Sistem dirancang melalui tahapan fuzzifikasi dengan tiga variabel input (kadar asap maket, kadar asap ruang tamu, dan suhu) yang memetakan keanggotaan Renggang, Sedang, dan Pekat, dilanjutkan dengan proses inferensi dan defuzzifikasi. Pengujian dilakukan melalui dua skenario, yaitu skala maket dan skala lingkungan riil (area tengah dan sudut ruang tamu). Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berhasil mengeliminasi *false alarm* hingga 0% saat diuji dengan asap rokok; pompa pemadam 12V DC tidak aktif karena kamera memverifikasi "api tidak terdeteksi." Pada pengujian kebakaran nyata, sistem merespons secara instan untuk melakukan pemadaman dan berhasil mengirimkan notifikasi status (*Aman*, *Waspada*, *Bahaya*) secara *real-time* ke Telegram pengguna. Dinamika penurunan kadar asap pasca-pemadaman sangat dipengaruhi oleh tata letak geografis dan sirkulasi ventilasi ruangan. Sistem ini terbukti andal dan responsif dalam memitigasi bahaya kebakaran pada lingkungan rumah tinggal.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Moch. Zaki Irfansya,

Sarjana Terapan Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya

Email: mochzaki.22060@mhs.unesa.ac.id

1. PENDAHULUAN

Kebakaran merupakan salah satu bencana yang dapat menimbulkan kerugian besar bagi keselamatan jiwa maupun harta benda. Peristiwa kebakaran dapat terjadi apabila tiga unsur utama saling terintegrasi untuk bereaksi, yaitu bahan bakar, panas, dan oksigen sebaliknya, api tidak akan terjadi atau dapat dihilangkan jika salah satu dari ketiga unsur tersebut dihilangkan [1]. Aspek keselamatan kerja dan lingkungan terkait bahaya kebakaran juga telah diatur secara formal melalui Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi. namun penerapan langkah preventif di tingkat rumah tangga masih banyak mengandalkan edukasi dasar dan alat pemadam sederhana yang bersifat manual [22].

Sistem proteksi kebakaran konvensional yang umum diterapkan saat ini masih mengandalkan detektor tunggal dengan alarm berbasis suara lokal (buzzer) yang hanya bekerja secara lokal dan tidak memberikan informasi jarak jauh ketika penghuni sedang berada di luar rumah [8]. Keterbatasan ini semakin krusial mengingat banyak sistem peringatan dini kebakaran berbasis IoT yang telah dikembangkan sebelumnya masih berfokus pada notifikasi tekstual sederhana tanpa mekanisme verifikasi lanjutan terhadap keberadaan api secara fisik [16].

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) membuka peluang besar untuk mengatasi keterbatasan tersebut, karena arsitektur IoT memungkinkan integrasi berbagai sensor dan aktuator dalam satu jaringan yang dapat dipantau maupun dikendalikan dari jarak jauh [4], [19]. Beberapa penelitian terdahulu telah membuktikan efektivitas mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses sekaligus penghubung ke jaringan IoT, misalnya dalam monitoring suhu dan kelembapan ruangan secara real-time [5], serta dalam sistem deteksi kebocoran gas berbasis kombinasi sensor MQ dan DHT [9]. Untuk parameter visual, penggunaan modul kamera berdaya rendah seperti ESP32-CAM juga telah terbukti mampu meningkatkan akurasi deteksi kebakaran, misalnya pada sistem pemantauan hutan gambut yang memanfaatkan verifikasi citra untuk mengurangi kesalahan deteksi [11], serta pada rancangan sistem deteksi bahaya IoT yang menekankan efisiensi energi dan pemantauan adaptif [12].

Di sisi pengambilan keputusan, metode logika fuzzy Mamdani banyak dipilih karena kemampuannya menangani ketidakpastian dan perubahan kondisi yang bersifat gradual, tidak seperti sistem ambang batas (threshold) biner yang kaku. Penerapan fuzzy Mamdani telah terbukti efektif pada berbagai domain, seperti optimalisasi hasil produksi tahu [2], evaluasi kepuasan pelanggan pada layanan perbankan [14], hingga sistem penyiraman cerdas berbasis kondisi tanah pada bidang pertanian [15]. Pada ranah proteksi kebakaran secara khusus, logika fuzzy juga telah diterapkan dalam sistem pemantauan dan pendeteksian dini berbasis basis data real-time [6], sementara studi perbandingan lain menunjukkan bahwa metode fuzzy Mamdani maupun Tsukamoto sama-sama dapat diandalkan untuk sistem kendali otomatis berbasis IoT, seperti pada pengendalian exhaust fan [17] maupun sistem berbasis fuzzy Sugeno untuk aplikasi IoT lainnya [21].

Untuk aspek notifikasi kepada pengguna, layanan pesan instan Telegram melalui Bot API banyak diadopsi karena kemudahan integrasinya dengan mikrokontroler dan kemampuannya mengirim data secara real-time [20]. Penelitian terdahulu telah memanfaatkan kombinasi ESP32-CAM dan notifikasi Telegram untuk sistem keamanan rumah [10], [13], serta untuk sistem deteksi dan pemadaman kebakaran otomatis dengan kemampuan monitoring jarak jauh [3]. Namun demikian, sebagian besar sistem yang telah dikembangkan tersebut umumnya hanya mengandalkan satu parameter deteksi (asap atau suhu saja) atau belum menggabungkan verifikasi visual sebagai tahap validasi sebelum aktuator pemadam diaktifkan secara otomatis [23].

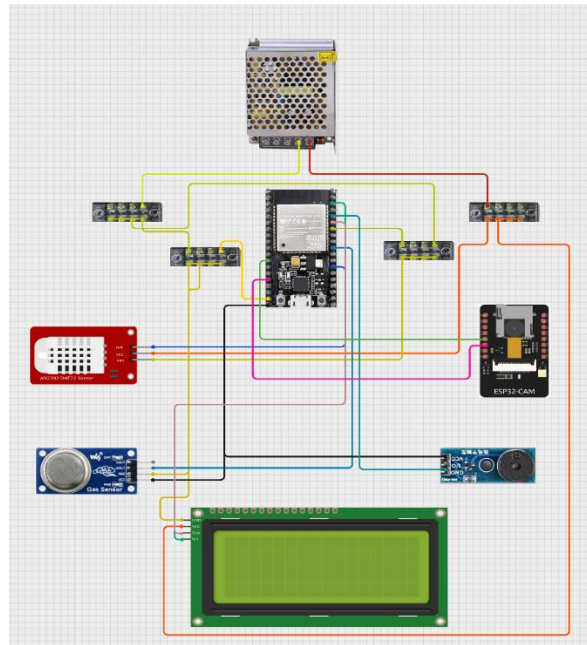
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan prototipe sistem pencegahan kebakaran rumah yang menggabungkan sensor MQ-2 (kadar asap), sensor DHT22 (suhu), dan modul kamera ESP32-CAM (verifikasi visual) dengan metode logika fuzzy Mamdani sebagai mesin pengambilan keputusan, serta notifikasi Telegram sebagai media pelaporan jarak jauh. Kebaruan utama yang ditawarkan adalah mekanisme verifikasi ganda (*double verification*) antara hasil defuzzifikasi fuzzy dan konfirmasi visual kamera, sehingga aktuator pemadam hanya akan aktif apabila kondisi bahaya telah tervalidasi secara visual bukan sekadar berdasarkan pembacaan sensor semata. Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang dan membangun prototipe sistem pencegahan kebakaran rumah yang terintegrasi antara sensor, kamera, aktuator pemadam, dan notifikasi Telegram (2) mengimplementasikan logika fuzzy Mamdani pada mikrokontroler ESP32 untuk menentukan status kondisi ruangan (Aman, Waspada, Bahaya) dan (3) menguji keandalan sistem dalam mengeliminasi *false alarm* akibat gangguan non kebakaran domestik, baik pada skala maket maupun skala ruang tamu rumah tinggal yang sesungguhnya.

2. METODA

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D), yaitu metode yang digunakan untuk menghasilkan produk baru atau menyempurnakan produk yang sudah ada, serta menguji keefektifan produk tersebut. Metode *Research and Development* melibatkan siklus pengembangan yang terdiri dari studi pendahuluan, desain produk, uji coba lapangan, dan revisi, sehingga metode ini sesuai digunakan pada penelitian berbasis rancang bangun karena berorientasi pada penciptaan produk yang dapat diuji dan divalidasi secara ilmiah(7). Pada penelitian ini, penggunaan metode *Research and Development* memiliki kerangka kerja yang dimulai dari identifikasi kebutuhan sistem, meliputi kebutuhan diagnosis cerdas, verifikasi visual, aksi pemadaman otomatis, implementasi Logika Fuzzy Mamdani, serta tahap pengujian eksperimental untuk memvalidasi akurasi dan kinerja sistem secara keseluruhan

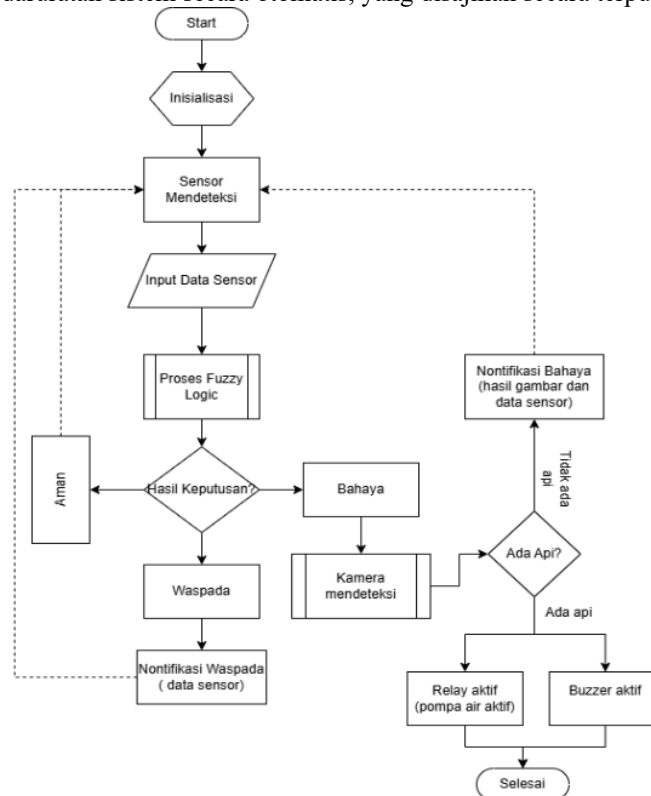
2.1 Perancangan perangkat keras

Perancangan arsitektur perangkat keras bertujuan untuk membangun sistem interkoneksi fisik antara unit masukan, unit pemroses, dan unit luaran. Unit masukan terdiri dari sensor DHT22 untuk mendeteksi suhu lingkungan, sensor MQ-2 pada maket, dan sensor MQ-2 pada ruang tamu untuk mengukur kadar asap. Mikrokontroler utama bertindak sebagai unit pemroses sentral yang mengolah data analog dan digital dari ketiga sensor tersebut. Unit luaran sistem ini mengintegrasikan modul ESP32-CAM sebagai pemindai visual verifikasi ganda, relay untuk mengaktifkan pompa air pemadam, Buzzer untuk memberikan bunyi kondisi, dan modul komunikasi Wi-Fi untuk transmisi data ke Telegram Bot. Hubungan antarkomponen perangkat keras ini diilustrasikan secara terpusat pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian keseluruhan

Prosedur pemrosesan dan jalannya program logika dari awal hingga akhir dirancang dalam bentuk diagram alir algoritma (*flowchart*). Alur instruksi program ini menjadi acuan operasional mikrokontroler dalam mengendalikan status kedaruratan sistem secara otomatis, yang disajikan secara terpusat pada Gambar 2.

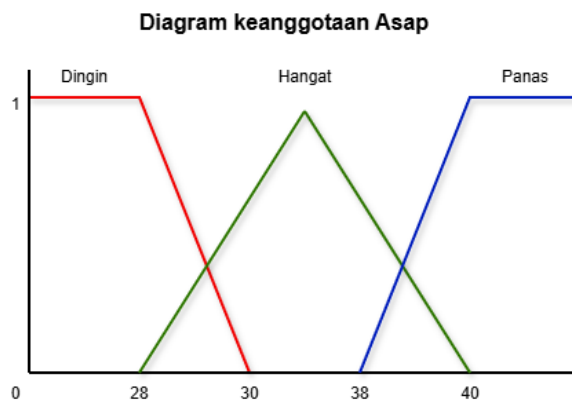


Gambar 2. Flowchart cara kerja sistem

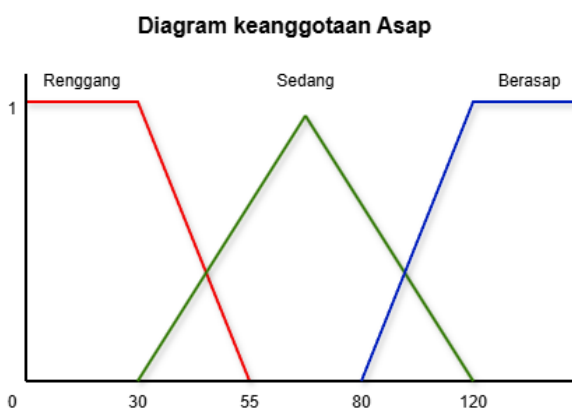
Sistem bekerja diawali dengan tahap inisialisasi mikrokontroler ESP32 beserta sensor dan modul kamera, kemudian dilanjutkan dengan pembacaan data suhu dan asap secara kontinu melalui sensor DHT22 dan MQ-2. Data hasil pembacaan tersebut diproses menggunakan metode fuzzy logic Mamdani untuk menentukan status kondisi ruangan ke dalam tiga kategori, yaitu Aman, Waspada, dan Bahaya. Apabila hasil klasifikasi menunjukkan kondisi Aman, sistem akan kembali melakukan pembacaan sensor secara berulang. Apabila hasil menunjukkan kondisi Waspada, sistem mengirimkan notifikasi peringatan dini berupa data sensor melalui Telegram sebelum kembali melakukan pemantauan. Sementara itu, apabila hasil klasifikasi menunjukkan kondisi Bahaya, sistem tidak langsung mengaktifkan aktuatur, melainkan melakukan verifikasi lanjutan melalui modul kamera ESP32-CAM untuk memastikan keberadaan api secara visual. Jika hasil verifikasi tidak menunjukkan adanya api, sistem mengirimkan notifikasi disertai gambar dan data sensor sebagai antisipasi false alarm, kemudian kembali ke proses pemantauan. Sebaliknya, jika api terkonfirmasi secara visual, sistem akan mengaktifkan relay untuk menyalakan pompa air sebagai tindakan pemadaman awal serta mengaktifkan buzzer sebagai alarm peringatan lokal. Mekanisme verifikasi ganda antara hasil inferensi fuzzy dan konfirmasi visual kamera ini dirancang untuk meningkatkan akurasi pengambilan keputusan sistem sekaligus meminimalkan risiko kesalahan deteksi (false alarm) akibat gangguan non-kebakaran.

2.2 Tahapan Fuzzy

Prosedur inferensi logika fuzzy untuk menetapkan klasifikasi kondisi lingkungan didasarkan pada referensi standar ilmiah agar akurasinya dapat diterima [2], [4]. Tahap fuzzifikasi membagi tiga parameter input utama yaitu sensor asap *prototype*, sensor asap ruang tamu, dan sensor suhu lingkungan ke dalam nilai linguistik tegas. Pembagian rentang batas nilai fungsi keanggotaan input fuzzy untuk ketiga variabel tersebut dirinci secara terpusat pada Gambar 3,4,dan 5.



Gambar 3. Diagram Keanggotaan asap maket



Gambar 4. Diagram Keanggotaan asap area Ruang tamu



Gambar 5. Diagram Keanggotaan suhu

Penelitian ini menyusun aturan fuzzy dengan mengorelasikan kondisi asap (sensor MQ-2) dan suhu (sensor DHT22) sesuai logika umum terjadinya kebakaran. Kedua parameter tersebut masing-masing dibagi menjadi tiga kategori linguistik: renggang, sedang, pekat untuk tingkat kepekatan asap, serta dingin, hangat, panas untuk tingkat suhu. Kategorisasi ini berfungsi mengubah data sensor menjadi representasi bahasa yang dipahami sistem sebelum diproses lebih lanjut [11]. Aturan fuzzy dari setiap kombinasi kategori ini dirangkum dalam tabel di bawah ini.

Tabel 1. Aturan *Fuzzy*

TABEL ATURAN FUZZY LOGIC		
NO	Aturan Fuzzy	Persamaan Inferensi
1.	IF asap rendah AND suhu dingin THEN status = Aman	$\mu_{\text{renggang}}(x) \cap \mu_{\text{dingin}}(x)$
2.	IF asap rendah AND suhu hangat THEN status = Aman	$\mu_{\text{renggang}}(x) \cap \mu_{\text{hangat}}(x)$
3.	IF asap rendah AND suhu panas THEN status = Bahaya	$\mu_{\text{renggang}}(x) \cap \mu_{\text{panas}}(x)$
4.	IF asap sedang AND suhu dingin THEN status = Waspada	$\mu_{\text{sedang}}(x) \cap \mu_{\text{dingin}}(x)$
5.	IF asap sedang AND suhu hangat THEN status = Bahaya	$\mu_{\text{sedang}}(x) \cap \mu_{\text{hangat}}(x)$
6.	IF asap sedang AND suhu panas THEN status = Bahaya	$\mu_{\text{sedang}}(x) \cap \mu_{\text{panas}}(x)$
7.	IF asap tinggi AND suhu dingin THEN status = Waspada	$\mu_{\text{berasap}}(x) \cap \mu_{\text{dingin}}(x)$
8.	IF asap tinggi AND suhu hangat THEN status = Bahaya	$\mu_{\text{berasap}}(x) \cap \mu_{\text{hangat}}(x)$
9.	IF asap tinggi AND suhu panas THEN status = Bahaya	$\mu_{\text{berasap}}(x) \cap \mu_{\text{panas}}(x)$

Untuk menentukan level bahaya maka di perlukan tabel dan rumus sebagai acuan aktif output (Pompa air, Buzzer, kamera dan nontifikasi Telgeram). Berikut adalah Tabel dan rumus Deffuzyfikasi Centroid

Tabel 2. *Deffuzyfikasi*

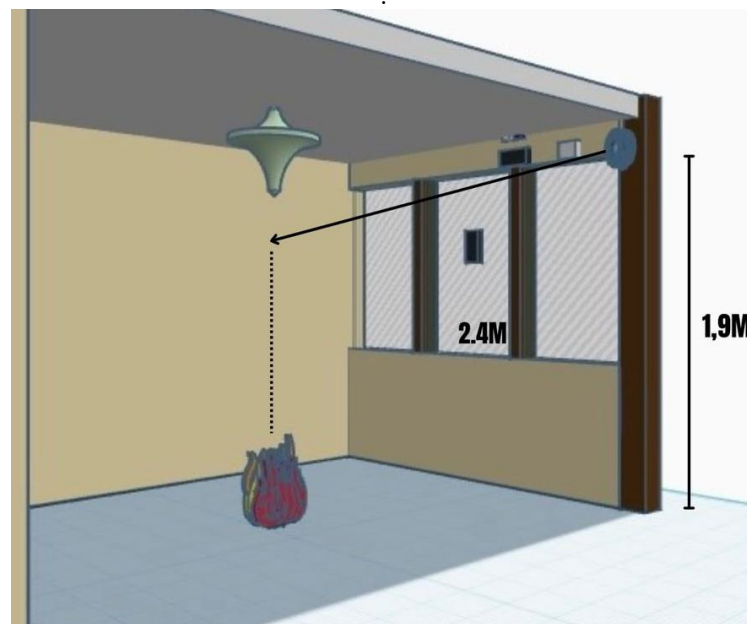
Kategori	Rentang nilai	Titik pusat	Aksi (output)
Aman	0 - 20	10	-
Waspada	30 - 50	35	Nontifikasi Telegram
Bahaya	50 - 100	75	Seluruh Output ON dan Nontifikasi Telegram

$$Z = \frac{(\mu \text{ Normal} \cdot 10) + (\mu \text{ Waspada} \cdot 35) + (\mu \text{ Bahaya} \cdot 75)}{\mu \text{ Normal} + \mu \text{ Waspada} + \mu \text{ Bahaya}}$$

Persamaan 1 Defuzzyfikasi

2.3 Pengujian Sistem

Setelah ketiga variabel input tersebut ditetapkan, logika pembuat keputusan diatur melalui basis aturan fuzzy Mamdani untuk menentukan kondisi akhir lingkungan (*Aman*, *Waspada*, atau *Bahaya*). Ketika hasil defuzzifikasi menghasilkan status *Bahaya*, pin komunikasi mikrokontroler memicu pengaktifan modul ESP32-CAM untuk memulai pemindaian visual. Skema tata letak eksperimen untuk proses akuisisi data dan pengujian keandalan sistem terhadap jarak pemindaian visual diilustrasikan pada Gambar 6 Desain penempatan Komponen dari sisi kiri



Gambar 6. Desain penempatan Komponen dari sisi kiri

Cara pengujian sistem ini dilakukan melalui dua tahapan eksperimen utama, yaitu pengujian skala laboratorium pada maket (*prototype*) dan pengujian skala riil pada lingkungan ruang tamu rumah tinggal. Pengujian pada kedua kondisi ini dilakukan dengan memberikan variasi gangguan lingkungan fisik, baik berupa pemicu kebakaran asli maupun gangguan non kebakaran domestik untuk mengukur sensitivitas sistem serta ketahanan dari *false alarm*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

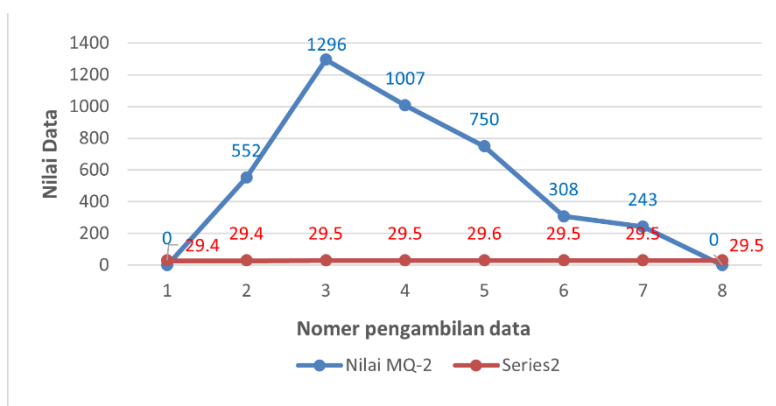
Pada bagian ini dijelaskan hasil penelitian dan sekaligus diberikan pembahasan yang komprehensif. Hasil dapat disajikan dalam gambar, grafik, tabel, dan lain-lain yang membuat pembaca mudah mengerti. Pembahasan dapat dilakukan dalam beberapa sub-bagian.

3.1 Hasil pengujian Input

Pengujian pada unit input ini bertujuan untuk memvalidasi akurasi dan respon yang cepat sensor DHT22 serta MQ-2. Pengujian ini dilakukan guna memastikan bahwa nilai yang terbaca oleh mikrokontroler telah sesuai dengan kondisi fisik lingkungan yang sebenarnya serta mampu memberikan input data yang stabil bagi algoritma Fuzzy Logic.

1. Pengujian menggunakan asap rokok

Tabel 3 Pengujian Input Menggunakan asap Rokok selama 1 Menit					
PENGAMBILAN DATA					
MENGUNAKAN ROKOK SELAMA 1 MENIT					
NO	Nilai MQ-2	Keterangan	Nilai DHT 22	Keterangan	Kondisi
1.	0 ppm	Renggang	29.4°C	Dingin – Hangat (Normal)	Awal (tidak ada pemicu dari rokok)
2.	552 ppm	Sedang	29.4°C	Dingin – Hangat (Normal)	Rokok menyala
3.	1296 ppm	Sedang	29.5°C	Dingin – Hangat (Normal)	Ruangan di penuhi dengan asap
4.	1007 ppm	Sedang	29.5°C	Dingin – Hangat (Normal)	Rokok mati,tersisa asap di ruangan.Asap semakin lama semakin berkurang
5.	750 ppm	Sedang	29.6°C	Dingin – Hangat (Normal)	
6.	308 ppm	Sedang	29.5°C	Dingin – Hangat (Normal)	
7.	243 ppm	renggang	29.5°C	Dingin – Hangat (Normal)	
8.	0 ppm	Renggang	29.5°C	Dingin – Hangat (Normal)	Ruangan Kembali normal tidak ada asap



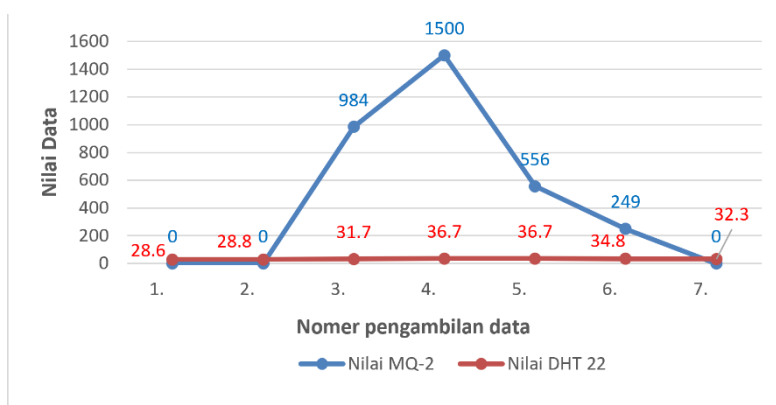
Gambar 7. Grafik pengambilan data input asap rokok selama 1 menit

Pengujian pada diatas menggunakan paparan asap rokok selama 1 menit untuk mengevaluasi respons sensor MQ-2 dan DHT22. Pada kondisi awal (tanpa asap), sensor MQ-2 mendeteksi 0 ppm (kategori renggang) dan DHT22 membaca suhu normal sebesar 29,4°C. Saat rokok dinyalakan, nilai MQ-2 melonjak hingga 1296 ppm akibat akumulasi gas pembakaran, sedangkan sensor DHT22 relatif stabil pada rentang 29,4°C–29,6°C karena karakteristik asap rokok tidak menaikkan temperatur ruangan secara signifikan. Pasca-pembakaran, nilai MQ-2 menurun bertahap menuju 0 ppm seiring berkurangnya kepekatan asap, menunjukkan akurasi pembacaan kedua sensor yang sesuai dengan kondisi nyata.

2. Pengujian menggunakan kondisi kebakaran

Tabel 4. Pengujian Input Menggunakan Kondisi Kebakaran

PENGAMBILAN DATA MENGUNAKAN KONDISI KEBAKARAN					
NO	Nilai MQ-2	Keterangan	Nilai DHT 22	Keterangan	Kondisi
1.	0 ppm	Renggang	28.6°C	Dingin – Hangat (Normal)	Awal (belum ada api)
2.	0 ppm	Renggang	28.8°C	Dingin – Hangat (Normal)	Api mulai menyala
3.	984 ppm	Sedang	31.7°C	Hangat	Api menyala besar
4.	1500 ppm	berasap	36.7°C	Hangat	Api mulai dipadamkan
5.	556 ppm	Sedang	36.7°C	Hangat	Api padam, tersisa asap yang masih memenuhi ruangan
6.	249 ppm	Renggang	34.8°C	Hangat	Asap secara bertahap berkurang sedikit demi sedikit
7.	0 ppm	Renggang	32.3°C	Hangat	Asap sudah hilang



Gambar 8. Grafik pengambilan data input Kebakaran

3.2 Hasil pengujian Sistem skala Prototype

Pengujian pada bagian output ini bertujuan untuk memvalidasi akurasi koordinasi antara ESP32-CAM, pompa, buzzer, dan notifikasi Telegram dalam merespons keputusan Fuzzy Logic. Pengujian ini dilakukan guna memastikan bahwa seluruh aktuator bekerja secara tepat sasaran, terutama dalam melakukan verifikasi visual sebelum mengaktifkan pompa. Pengujian dilakukan menggunakan paparan asap rokok selama durasi 3 menit untuk menguji kecerdasan kamera dalam membedakan asap yang mengakibatkan adanya api atau tidak, agar pompa tidak menyala jika tidak terdeteksi api. Pengujian data pada Tabel di bawah menggunakan kondisi kebakaran benda mudah terbakar untuk menguji kecepatan respons sistem dari kondisi Aman menuju Bahaya hingga pompa menyala otomatis, serta kembali menjadi Aman saat api padam. Berikut adalah tabel pengujian :

1. Pengujian menggunakan asap rokok selama 3 menit

Tabel 5 Pengujian menggunakan asap rokok selama 3 menit

MQ 2	DHT 22	Kategori	Kamera	Pompa	Buzzer	Nontifikasi Dan waktu
0 ppm	28.3°C	Aman	Off	Off	Off	Terkirim (11.30)
849 ppm	28.4°C	Waspada	Off	Off	Bunyi 1	Terkirim

MQ 2	DHT 22	Kategori	Kamera	Pompa	Buzzer	Nontifikasi Dan waktu
1160 ppm	28.6°C	Waspada	Off	Off	Bunyi 1	(11.31) Terkirim
1491 ppm	28.7°C	waspada	Off	Off	Bunyi 1	(11.32) Terkirim
1574 ppm	28.8°C	Bahaya	On = api tidak terdeteksi	Off	Bunyi 2	(11.33) Terkirim
1715 ppm	28.8°C	Bahaya	On = api tidak terdeteksi	Off	Bunyi 2	(11.34) Terkirim
						(11.35)

Pengujian keandalan sistem terhadap gangguan non-kebakaran dilakukan dengan memberikan paparan asap rokok secara kontinu. Berdasarkan data pada Tabel 5, pemantauan awal (menit 11.30) menunjukkan kondisi *Aman* (kadar asap 0 ppm) dengan seluruh aktuator nonaktif. Akumulasi paparan hingga menit 11.33 memicu kenaikan konsentrasi asap menjadi 1491 ppm yang mengubah status sistem menjadi *Waspada*, sehingga *buzzer* aktif memberikan peringatan bunyi tahap pertama sedangkan kamera dan pompa masih dalam kondisi *off*.

Saat memasuki menit 11.34, kadar asap menyentuh angka 1574 ppm yang otomatis mengubah status lingkungan menjadi *Bahaya*. Perubahan status ini langsung mengaktifkan modul ESP32-CAM untuk verifikasi visual objek. Meskipun kamera beralih ke kondisi *on*, sistem mendeteksi keterangan "api tidak terdeteksi" karena karakteristik asap rokok tidak memiliki bentuk fisik visual kobaran api nyata. Melalui mekanisme *interlocking* ini, aktuator pompa pemadam berhasil dipertahankan dalam kondisi *off* untuk mengeliminasi *false alarm*, walaupun *buzzer* telah berpindah ke peringatan bunyi tahap kedua. Di samping itu, seluruh riwayat perubahan status dari *Aman*, *Waspada*, hingga *Bahaya* terbukti berhasil dikirimkan ke Telegram pengguna sebagai notifikasi laporan secara *real-time*.

2. Pengujian menggunakan menggunakan kondisi kebakaran benda mudah terbakar

Tabel 6. Pengujian menggunakan menggunakan kondisi kebakaran benda mudah terbakar

MQ 2	DHT 22	Kategori	Kamera	Pompa	Buzzer	Nontifikasi Dan waktu
0 ppm	29.2°C	Aman	Off	Off	Off	Terkirim 12.40
545 ppm	30.2°C	Bahaya	On = api terdeteksi	On (Selama 20 detik)	Bunyi 2	Terkirim 12.40
1065 ppm	35.2°C	Bahaya	On = api tidak terdeteksi (api sudah padam)	Off	Bunyi 2	Terkirim 12.41
270 ppm	34.8°C	Aman	Off	Off	Off	Terkirim 12.42

Data pada Tabel 6 menunjukkan bahwa pada pukul 12.40 kondisi awal berada pada status *Aman* (kadar asap 0 ppm dan suhu 29,2°C) dengan seluruh *output* nonaktif. Namun, pada menit yang sama terjadi lonjakan parameter yang signifikan di mana kadar asap naik menjadi 545 ppm dan suhu meningkat ke 30,2°C, yang seketika memicu status *Bahaya*.

Dalam kondisi *Bahaya* tersebut, mikrokontroler merespons instan dengan mengaktifkan peringatan bunyi *buzzer* tahap kedua serta menyalakan modul ESP32-CAM. Karena hasil pemindaian visual kamera melaporkan "api terdeteksi", aktuator pompa penyiraman otomatis beralih ke posisi *on* untuk mengeksekusi pemadaman. Memasuki menit 12.41, meskipun kadar asap masih tinggi (1065 ppm) dan suhu naik ke 35,2°C, kamera memverifikasi bahwa "api tidak terdeteksi (api sudah padam)". Akibatnya, kerja pompa segera dihentikan (*off*). Pada pukul 12.42, parameter lingkungan kembali stabil ke status *Aman* dan seluruh aktuator kembali nonaktif. Seluruh rangkaian proses mitigasi ini terbukti berhasil ditransmisikan ke Telegram pengguna secara *real-time*.

3.3 Hasil Pengujian sistem area Ruang tamu

Pada pengujian ini sistem dilakukan secara nyata pada area ruang tamu untuk melihat performa alat dalam kondisi skala nyata. Untuk menguji tingkat sensitivitas serta keandalan sistem proteksi, pengujian difokuskan pada dua titik penempatan sumber api yang berbeda dengan menggunakan variasi beberapa bahan bakar seperti kertas, tisu, dan plastik. Pada titik pertama, pengujian mengambil lokasi di tengah ruang tamu dengan posisi berjarak 2,4 m dari

kamera ESP32-CAM serta berjarak 1,2 m dari sisi tembok belakang. Sementara itu, titik kedua ditempatkan di sudut ruangan yang memfokuskan pengujian pada jarak sejauh 3 m dari kamera ESP32-CAM, dengan rincian posisi sebesar 50 cm dari sisi kiri tembok dan 30 cm dari sisi belakang tembok

1. Pengujian pada area Tengah ruang tamu menggunakan tisu dan kertas

Tabel 7 Hasil pengujian pada area Tengah ruang tamu menggunakan tisu dan kertas

MENGUNAKAN KERTAS DAN TISU							
WAKTU	Suhu	Asap	Defuzzifikasi	Kategori	Kamera	Pompa	Buzzer
14.07	29.3°C	0 ppm	10.0	Aman	OFF	OFF	OFF
14.08	29.4°C	33 ppm	25.0	Wapada	OFF	OFF	Bunyi 1
14.09	29.8°C	67 ppm	65.0	Bahaya	ON= Api terdeteksi	ON	Bunyi 2
14.09	30.1°C	251 ppm	75.0	Bahaya	ON= api tidak terdeteksi	OFF	Bunyi 2
14.10	30.3°C	70 ppm	75.0	Bahaya	ON= api tidak terdeteksi	OFF	Bunyi 2
14.11	30.4°C	0 ppm	10.0	Aman	OFF	OFF	OFF

Pengujian pada area tengah ruang tamu dilakukan menggunakan bahan bakar kertas dan tisu untuk mengevaluasi respons sistem di ruang terbuka. kondisi awal pada menit 14.07 menunjukkan status sistem berada pada tingkat *Aman*. Ketika bahan bakar dinyalakan pada menit 14.08, kobaran api langsung memicu status *Waspada* dengan nilai defuzzifikasi sebesar 25,0, sehingga *buzzer* mulai aktif. Memasuki menit 14.09, akumulasi transisi kadar asap dan kenaikan suhu mengubah status sistem menjadi *Bahaya*. Kamera ESP32-CAM secara instan melakukan verifikasi ganda visual dan mendeteksi keberadaan api, sehingga aktuator pompa air otomatis aktif melakukan pemadaman.

Dalam pengujian ini, konsentrasi asap tertinggi hanya menyentuh angka 251 ppm. Hal tersebut membuktikan tingkat respons sistem yang sangat tinggi, pompa pemadam sudah aktif mengeksekusi titik api sebelum bahan bakar habis terbakar dan menghasilkan kepulan asap yang lebih pekat. Pasca-aktivasi pompa, api berhasil dipadamkan sehingga pada menit 14.10 sisa asap mulai terurai, dan parameter ruangan kembali normal pada menit 14.11. Penurunan kadar asap yang cepat ini dipengaruhi oleh karakteristik pergerakan gas yang dinamis memenuhi volume ruangan, serta didukung oleh faktor sirkulasi udara dari ventilasi ruang tamu yang terhubung langsung dengan area dapur, kamar, dan kamar mandi.

2. Pengujian pada area sudut Ruang Tamu menggunakan Plastik

Tabel 8 Hasil pengujian pada area sudut ruang tamu menggunakan Plastik

MENGUNAKAN PLASTIK							
WAKTU	Suhu	Asap	Defuzzifikasi	Kategori	Kamera	Pompa	Buzzer
17.30	29.5°C	0 ppm	10.0	Aman	OFF	OFF	OFF
17.31	29.5°C	0 ppm	10.0	Aman	OFF	OFF	OFF
17.31	29.6°C	54 ppm	54.1	Bahaya	ON = Api terdeteksi	ON	Bunyi 2
17.32	29.6°C	289 ppm	57.9	Bahaya	ON = Api tidak terdeteksi	OFF	Bunyi 2
17.33	29.7°C	350 ppm	61.2	Bahaya	ON = Api tidak terdeteksi	OFF	Bunyi 2
17.34	29.7°C	108 ppm	61.1	Bahaya	ON = Api tidak terdeteksi	OFF	Bunyi 2

Pengujian di sudut ruang tamu dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh tata letak ruangan terhadap dinamika pergerakan asap. Pembacaan awal pada menit 17.30 menunjukkan status sistem berada pada tingkat *Aman*. Ketika bahan bakar dinyalakan pada menit 17.31, sensor langsung menangkap indikasi asap sebesar 54 ppm dengan nilai defuzzifikasi 54,1 yang dikategorikan sebagai status *Bahaya*. Respons instan ini memicu modul ESP32-CAM mengirimkan konfirmasi visual objek secara valid, sehingga pompa air otomatis menyala untuk mengeksekusi tindakan pemadaman.

Setelah pemadaman oleh pompa, kamera memverifikasi fisik api telah padam pada menit 17.32. Namun, akibat posisi pengujian yang berada di sudut ruangan tertutup serta volume bahan bakar yang lebih banyak, sisa pembakaran yang tersiram air justru memicu lonjakan kepulan asap ke langit-langit hingga mencapai titik tertinggi sebesar 350 ppm pada menit 17.33. Karakteristik partikel asap yang bergerak dinamis mengumpul di bagian atas sudut

ruangan membuat mikrokontroler tetap mempertahankan status Bahaya dan mengaktifkan alarm *buzzer*. Memasuki menit 17.34, kepekatan asap mulai terurai secara bertahap turun ke angka 108 ppm seiring gas yang memenuhi volume ruangan perlahan menghilang terbawa sirkulasi udara bebas.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan sistem proteksi dini kebakaran berbasis logika *fuzzy* Mamdani dengan mekanisme verifikasi ganda visual menggunakan ESP32-CAM. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu memproses tiga parameter input (asap maket, asap ruang tamu, suhu) secara responsif dengan tingkat akurasi tinggi. Integrasi komputasi *fuzzy* dan pemindaian visual terbukti andal dalam mengeliminasi *false alarm* hingga 0% saat diuji dengan gangguan domestik seperti asap rokok, karena pompa pemadam hanya akan aktif jika kamera memvalidasi keberadaan fisik api. Selain itu, pengujian pada area terbuka (tengah ruang tamu) dan area tertutup (sudut ruang tamu) mengonfirmasi bahwa karakteristik sirkulasi udara dan tata letak ruangan memengaruhi dinamika penurunan kadar asap pasca-pemadaman. Secara keseluruhan, sistem ini efektif memberikan perlindungan dini secara otomatis sekaligus mengirimkan notifikasi laporan secara *real-time* ke Telegram pengguna.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Listrik Universitas Negeri Surabaya yang telah memberikan dukungan selama pelaksanaan penelitian. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada dosen pembimbing serta semua pihak yang telah memberikan arahan, masukan, dan bantuan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] Ansar, R. Karim, Salim, and E. Khudriah, "Implementasi fuzzy inference system menggunakan metode fuzzy Mamdani untuk optimalisasi produksi tahu," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 8, no. 1, pp. 276–285, 2024, <https://doi.org/10.33379/gtech.v8i1.3650>
- [2] A. Dauda, O. Flauzac, and F. Nolot, "A survey on IoT application architectures," *Sensors*, vol. 24, no. 16, 2024, <https://doi.org/10.3390/s24165320>
- [3] N. Dwi Setiawan, "Rancang bangun sistem real-time monitoring suhu dan kelembaban menggunakan ESP32," *ELKOM (Jurnal Elektronika dan Komputer)*, vol. 18, no. 1, 2025, <https://doi.org/10.51903/elkom.v18i1.3064>
- [4] E. Aisah, "Sistem pemantauan dan pendeteksi kebakaran berbasis logika fuzzy dan real-time database," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 9, no. 3, p. 577, 2021, <https://doi.org/10.26760/elkomika.v9i3.577>
- [5] F. Razi, "Rancang bangun sistem pendeteksi dan pemadaman api berbasis NodeMCU ESP32 dengan notifikasi Telegram," skripsi, 2024. <http://dx.doi.org/10.30811/tektro.v8i1.5677>
- [6] M. A. Fauzi and S. A. Sukarno, "Pengembangan sistem pendeteksi kebocoran gas LPG berbasis IoT: integrasi sensor MQ-02 dan DHT11 untuk pemantauan real-time," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 1, 2025, <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i1.5980>
- [7] S. A. Hamzah, M. N. Dalimin, M. M. Som, M. S. Zainal, K. N. Ramli, W. M. Utomo, and N. A. Yusoff, "High accuracy sensor nodes for a peat swamp forest fire detection using ESP32 camera," *International Journal of Informatics and Communication Technology (IJ-ICT)*, vol. 11, no. 3, p. 229, 2022, <http://doi.org/10.11591/ijict.v11i3.pp229-239>
- [8] C. L. Kok, J. B. Heng, Y. Y. Koh, and T. H. Teo, "Energy-, cost-, and resource-efficient IoT hazard detection system with adaptive monitoring," *Sensors*, vol. 25, no. 6, 2025, <https://doi.org/10.3390/s25061761>
- [9] H. Kurniawan and S. Hariyanto, "Designing home security with ESP32-CAM and IoT-based alarm notification using Telegram," *Bit-Tech*, vol. 6, no. 2, pp. 95–102, 2023, <https://doi.org/10.32877/bt.v6i2.932>
- [10] N. E. Violenic, G. T. Nugroho, A. A. Putra, and A. Fauzan, "Fuzzy logic-based decision support system for adaptive plant watering volume in IoT environments," *J. Appl. Sci. Technol. Humanit.*, vol. 3, no. 2, pp. 927–941, Mar. <http://dx.doi.org/10.23960/jitet.v12i3.4775>
- [11] B. Muttaqi and P. Widya Ningsih, "Penerapan logika fuzzy Mamdani dalam sistem penyiraman cerdas untuk pertanian," *Generation Journal*, vol. 8, no. 2, 2024, <https://doi.org/10.33752/inovate.v9i2.8909>
- [12] A. Napu, O. Kembuan, and K. Santa, "Sistem peringatan dan penanganan dini kebakaran berbasis Internet of Things (IoT)," *JOINTER: Journal of Informatics Engineering*, vol. 3, no. 1, 2022, <https://doi.org/10.53682/jointer.v3i01.45>
- [13] N. Putri, "Implementasi dan perbandingan kinerja algoritma fuzzy Tsukamoto dan Mamdani pada sistem exhaust fan berbasis IoT," *Journal Tech-E*, vol. 8, no. 1, 2024, <https://doi.org/10.31253/te.v8i1.3169>
- [14] M. M. Rahaman, "A review on Internet of Things - IoT architecture, technologies, future applications &

- challenges," <https://doi.org/10.5281/zenodo.7066810>
- [15] W. Santoso, W. Nurjannah, M. Shudhuashar, A. T. Fadilah, M. D. Junas, and D. Handayani, "The development of Telegram Bot API to maximize the dissemination process of Islamic knowledge in 4.0 era," *Jurnal Teknik Informatika*, vol. 15, no. 1, pp. 52–62, 2022, <https://doi.org/10.15408/jti.v15i1.24915>
- [16] Winarti, "Simulasi penanggulangan kebakaran dengan alat sederhana pada siswa siswi MI Muhammadiyah Kalikotes Klaten," 2022, <https://doi.org/10.53625/jabdi.v2i1.2260>
- [17] Z. Zulkifli, M. Muhallim, and H. Hasnahwati, "Pengembangan sistem alarm dan pemadam kebakaran otomatis menggunakan Internet of Things," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 3, 2024, <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i3.4774>