



DOI: <https://doi.org/10.38035/dit.v4i1>
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Sistem Multi-Sensor Berbasis IoT dan Fuzzy Logic untuk Klasifikasi Kualitas Udara

Asep Ramdhani Mahbub¹, Joni Warta², Agus Hidayat³

¹Universitas Bhayangkara Jakarta Raya, Bekasi, Indonesia, aseprm@dsn.ubharajaya.ac.id

²Universitas Bhayangkara Jakarta Raya, Bekasi, Indonesia, joniwarta@dsn.ubharajaya.ac.id

³Universitas Bhayangkara Jakarta Raya, Bekasi, Indonesia, agus.hidayat@dsn.ubharajaya.ac.id

Corresponding Author: joniwarta@dsn.ubharajaya.ac.id²

Abstract: This study aims to develop an Internet of Things (IoT)-based system for monitoring and classifying air quality in household organic waste environments using a multi-sensor gas approach and fuzzy logic methodology. Organic waste, such as food scraps and kitchen refuse, generates hazardous gases including ammonia (NH_3), methane (CH_4), and carbon monoxide (CO) as a result of biological decomposition processes. The developed system utilizes an ESP32 microcontroller integrated with multiple gas sensors, specifically the MQ-135, MQ-5, and MQ-7, to detect various gas types simultaneously. The implementation of this multi-sensor framework enhances detection accuracy compared to single-sensor approaches by providing a more comprehensive representation of environmental conditions. Sensor data are transmitted in real-time to a server via a Wi-Fi network and subsequently processed using the Mamdani fuzzy logic method to classify air quality into three distinct categories: safe, caution, and hazardous. The empirical results demonstrate that the system is capable of executing real-time monitoring with a high response rate while delivering adaptive classifications in response to variations in sensor data. Consequently, this system offers a smarter, preventive environmental monitoring solution for households to mitigate health risks associated with exposure to organic waste gases.

Keyword: Air Quality Monitoring, Organic Waste, Internet of Things (IoT), Multi-sensor, Mamdani Fuzzy Logic, ESP32

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem monitoring dan klasifikasi kualitas udara pada lingkungan limbah organik rumah tangga berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan pendekatan multi-sensor gas dan metode *fuzzy logic*. Limbah organik, seperti sisa makanan dan sampah dapur, menghasilkan gas berbahaya seperti amonia (NH_3), metana (CH_4), dan karbon monoksida (CO) akibat proses dekomposisi biologis. Sistem yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan beberapa sensor gas, yaitu MQ-135, MQ-5, dan MQ-7, untuk mendeteksi berbagai jenis gas secara simultan. Implementasi multi-sensor ini mampu meningkatkan akurasi deteksi dibandingkan dengan penggunaan sensor tunggal karena dapat merepresentasikan kondisi lingkungan secara lebih komprehensif. Data sensor dikirimkan secara *real-time* ke *server* melalui jaringan WiFi dan diolah menggunakan metode *fuzzy logic Mamdani* untuk mengklasifikasikan kualitas udara ke dalam

kategori aman, waspada, dan bahaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pemantauan secara *real-time* dengan tingkat respons yang baik serta menghasilkan klasifikasi yang adaptif terhadap variasi data sensor. Dengan demikian, sistem ini dapat digunakan sebagai solusi pemantauan lingkungan rumah tangga yang lebih cerdas dan preventif terhadap risiko kesehatan akibat paparan gas limbah organik.

Kata Kunci: Monitoring Kualitas Udara, Limbah Organik, *Internet of Things* (IoT), Multi-sensor, *Fuzzy Logic* Mamdani, ESP32

PENDAHULUAN

Kualitas udara yang bersih merupakan faktor fundamental bagi kesehatan manusia dan keberlanjutan lingkungan. Berdasarkan laporan Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), polusi udara dalam ruang maupun luar ruang menjadi salah satu ancaman lingkungan terbesar yang berkontribusi terhadap jutaan kematian prematur setiap tahunnya (WHO, 2026). Fenomena penurunan kualitas udara tidak hanya terjadi pada skala industri atau kawasan perkotaan yang padat lalu lintas, melainkan juga terjadi pada area domestik dan pemukiman (Debelu, 2024). Paparan gas polutan yang terakumulasi secara terus-menerus, meskipun dalam konsentrasi rendah, terbukti dapat memicu berbagai gangguan pernapasan akut, iritasi, hingga dampak kesehatan jangka panjang yang fatal bagi manusia (WHO, 2021), (Karimi, 2024).

Di lingkungan domestik, salah satu sumber pencemaran udara lokal yang sering kali diabaikan adalah penumpukan limbah organik rumah tangga, seperti sisa makanan dan sampah dapur. Proses dekomposisi biologis secara anaerobik pada limbah tersebut menghasilkan berbagai gas emisi berbahaya, termasuk *Amonia* (NH_3), *Metana* (CH_4), dan *Karbon Monoksida* (CO) (WHO, 2021), (Henning, 2024). Gas-gas ini tidak hanya menimbulkan bau tidak sedap yang mengganggu kenyamanan psikologis warga, tetapi juga memiliki karakteristik beracun dan mudah terbakar pada tingkat konsentrasi tertentu (Karimi, 2024). Oleh karena itu, monitoring fluktuasi kadar gas di sekitar area pembuangan sampah organik domestik menjadi sangat krusial sebagai sistem peringatan dini demi mencegah risiko kesehatan dan bahaya lingkungan yang lebih besar (Roy, 2023), .

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai sistem monitoring kualitas udara berbasis teknologi digital telah banyak dikembangkan (Rahmadani, 2024), (Alsamrai, 2025). Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu mayoritas masih bergantung pada penggunaan sensor tunggal yang hanya mampu mendeteksi satu jenis gas polutan (Yasin, 2022). Pendekatan sensor tunggal ini memiliki batasan yang signifikan, karena karakteristik emisi dari limbah organik bersifat kompleks dan terdiri dari multi-gas (Alsamrai, 2024). Penggunaan satu sensor tidak dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai tingkat bahaya udara secara riil. Selain itu, beberapa penelitian yang telah menggunakan banyak sensor sering kali hanya menampilkan data mentah secara terpisah tanpa adanya pemrosesan keputusan terpadu, sehingga menyulitkan pengguna awam dalam menginterpretasikan status keamanan kualitas udara secara instan (Veličković, 2024).

Guna mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan sebuah sistem multi-sensor cerdas berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *Fuzzy Logic* untuk klasifikasi kualitas udara pada area limbah organik rumah tangga (Meegoda, 2025). Sistem ini mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 dengan deretan (*array*) sensor gas MQ-135, MQ-5, dan MQ-7 untuk menangkap dinamika gas NH_3 , CH_4 , dan CO secara simultan dan *real-time* (Rahmadani, 2024). Data dari ketiga sensor tersebut kemudian diproses menggunakan metode *Fuzzy Logic Engine* (Mamdani) yang ditanamkan pada sistem untuk menghasilkan satu nilai keputusan tegas (*crisp value*) mengenai status kebersihan udara (Aman, Waspada, atau Bahaya). Melalui integrasi konektivitas IoT, hasil klasifikasi ini dapat diakses dari jarak jauh, memberikan kontribusi kebaruan berupa sistem monitoring multi-gas yang ringkas, murah (*low-cost*) (Hassan, 2024),

(Alvear-Puertas, 2022) namun memiliki kecerdasan buatan lokal dalam pengambilan keputusan.

METODE

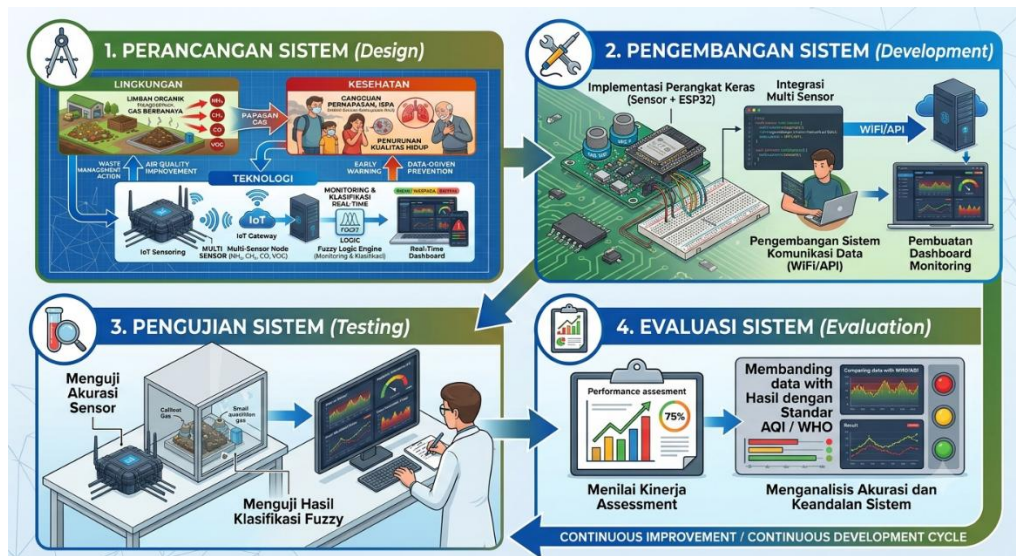
Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian terapan (*applied research*) karena berfokus pada penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan algoritma *fuzzy logic* untuk menyelesaikan permasalahan *monitoring* dan klasifikasi kualitas udara pada limbah organik rumah tangga.

Metode penelitian yang digunakan adalah *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan eksperimen. Metode R&D digunakan untuk merancang, mengembangkan, dan menguji sistem *monitoring* kualitas udara berbasis IoT dengan pendekatan multi-sensor gas (Sensors, 2024). Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan beberapa sensor gas, yaitu MQ-135, MQ-5, dan MQ-7, untuk mendeteksi berbagai jenis gas hasil dekomposisi limbah organik secara simultan.

Model Pengembangan Sistem (R&D)

Model pengembangan sistem dalam penelitian ini mengikuti tahapan R&D yang disederhanakan menjadi empat tahap utama, seperti gambar 1 berikut:



Gambar 1. Model Pengembangan Sistem

Tahap perancangan (*design*) bertujuan menerjemahkan kebutuhan konseptual sistem menjadi cetak biru teknis terintegrasi yang mencakup arsitektur IoT berlapis, instrumentasi sensor, dan pemrosesan logika. Desain diawali dengan pemetaan arsitektur jaringan nirkabel *node* sensor menuju komputasi *cloud* guna menjamin efisiensi transmisi data emisi limbah organik. Pada fasa instrumentasi, dibentuk larik sensor (*sensor array*) spesifik menggabungkan MQ-135 (NH₃/VOC), MQ-5 (CH₄), dan MQ-7 (CO) untuk mengoptimalkan akurasi deteksi multi-gas secara simultan (Sensors, 2024). Fluktuasi metrik dari larik sensor ini kemudian dimodelkan ke dalam *Fuzzy Logic Engine* berbasis Mamdani melalui fasa fuzzifikasi, penentuan *rule base*, dan defuzzifikasi untuk mentransformasikan input lingkungan yang stokastik menjadi keputusan tegas (*crisp value*) status kualitas udara. Akhirnya, seluruh mekanisme diikat dalam perancangan alur data (*data flow*) yang terstruktur, memastikan kontinuitas data sejak proses sampling sinyal oleh mikrokontroler hingga visualisasi akhir pada komponen *dashboard*.

Tahap pengembangan (*development*) memfokuskan pada realisasi fisik dan program fungsional hulu-ke-hilir berdasarkan cetak biru teknis yang telah dirancang. Implementasi perangkat keras dieksekusi melalui fabrikasi sirkuit elektronik menggunakan *System on Chip* (SoC) ESP32 sebagai unit pemroses utama yang andal dan hemat daya. Pada sub-sistem instrumentasi, dilakukan kalibrasi awal (*baseline calibration*) dan penyelarasan pembacaan larik sensor gas secara simultan untuk mencegah konflik data pada *pin* ADC mikrokontroler. Guna menjamin kontinuitas data, dibangun jalur pipa data nirkabel (*data pipeline*) berlatensi rendah via Wi-Fi menggunakan protokol komunikasi HTTP API atau MQTT untuk mentransmisikan *array data* secara berkala (*real-time interval*) ke *server cloud* (Hassan, 2024; Rahmadani, 2024). Pada lapisan aplikasi, dikembangkan antarmuka grafis (GUI) berbasis *Web Dashboard* interaktif untuk memvisualisasikan fluktuasi gas secara *real-time*, merekam riwayat data, sekaligus menyajikan indikator peringatan dini (*early warning system*) hasil inferensi mesin *fuzzy*.

Tahap pengujian (*testing*) dilakukan untuk memvalidasi performa operasional sistem terhadap spesifikasi teknis serta memastikan seluruh sub-sistem terbebas dari anomali atau kesalahan fungsi. Eksperimen diawali dengan pengujian akurasi fungsional larik sensor di dalam ruang uji terkontrol (*controlled chamber*) menggunakan gas target guna mengukur tingkat sensitivitas dan presisi instrumen dibandingkan dengan alat kalibrator standar. Pada fasa infrastruktur jaringan, dilakukan pengujian stabilitas IoT melalui metode pengujian stres (*stress testing*) untuk mengevaluasi ketahanan *throughput data* terhadap fluktuasi sinyal Wi-Fi, sekaligus memastikan unit pemroses ESP32 bebas dari risiko *overheating* maupun kegagalan sistem (*system crash/data loss*). Akhirnya, validasi model keputusan dieksekusi dengan menginjeksikan berbagai variasi kombinasi nilai gas buatan ke dalam *Fuzzy Logic Engine* guna menjamin akurasi inferensi klasifikasi status (Aman, Waspada, Bahaya) telah mencapai presisi logika 100% sesuai matriks keputusan yang dirancang.

Pendekatan Eksperimen (*Experimental Method*)

Pendekatan eksperimen dilakukan dengan menguji sistem yang telah dikembangkan dalam kondisi nyata pada lingkungan limbah organik rumah tangga, yaitu dengan menerapkan metode eksperimen lapangan (*field experiment*) dengan menguji sistem yang telah dikembangkan secara langsung pada kondisi riil di lingkungan limbah organik rumah tangga. Proses eksperimen dilakukan melalui serangkaian tahapan sistematis, yang diawali dengan pengumpulan data emisi gas dari aktivitas pembusukan limbah organik dan perekaman data sensor secara *real-time*. Data mentah tersebut kemudian diolah menggunakan algoritma *fuzzy logic* untuk menganalisis hasil klasifikasi kualitas udara di sekitar lokasi. Eksperimen ini secara khusus bertujuan untuk menguji performa teknis sistem, mengukur stabilitas pembacaan sensor terhadap fluktuasi lingkungan, serta menilai akurasi klasifikasi dalam menentukan tingkat bahaya udara.

Arsitektur Sistem IoT

Sistem pemantauan kualitas udara ini dirancang menggunakan pendekatan arsitektur IoT berlapis yang terdiri dari 3 layer utama (*Sensor Layer*, *Network Layer*, dan *Application Layer*). Pemisahan fungsional ini bertujuan untuk memastikan proses akuisisi data, transmisi, hingga visualisasi informasi dapat berjalan secara terstruktur, cepat (*low latency*), dan andal.

Sensor Layer (Lapisan Sensor): *Sensor Layer* bertindak sebagai ujung tombak sistem di lapangan yang berfungsi untuk mendeteksi dan mengonversi parameter fisik lingkungan menjadi sinyal elektrik. Pada lapisan ini, diintegrasikan kombinasi multi-sensor gas spesifik untuk menangkap emisi dari pembusukan limbah organik, meliputi: Sensor MQ-135: Digunakan secara khusus untuk mengukur konsentrasi gas *Amonia* (NH₃) dan senyawa organik mudah menguap (*Volatile Organic Compounds/VOC*). Sensor MQ-5: Difungsikan untuk mendeteksi fluktuasi konsentrasi gas *Metana* (CH₄). Sensor MQ-7: Dikonfigurasi untuk

memantau keberadaan gas beracun *Karbon Monoksida* (CO) (Derby et al., 2024), (Sensors, 2024).

Network Layer (Lapisan Jaringan): *Network Layer* bertanggung jawab atas pemrosesan data lokal serta penyediaan jalur komunikasi nirkabel yang aman dan stabil. Lapisan ini dijumpai oleh mikrokontroler ESP32, yang bertindak sebagai pemroses data mentah (*raw data*) dari *sensor layer*. Dengan memanfaatkan modul Wi-Fi terintegrasi yang ada pada ESP32, data yang telah dikonversi kemudian ditransmisikan secara nirkabel menuju *server cloud* melalui protokol komunikasi data yang efisien (Alvear-Puertas, 2022; Hassan, 2024; Rahmadani, 2024).

Application Layer (Lapisan Aplikasi): *Application Layer* merupakan antarmuka (*interface*) hulu yang berinteraksi langsung dengan pengguna akhir. Pada lapisan ini, data yang telah diterima dan diolah oleh algoritma *Fuzzy Logic* di *server* akan disajikan melalui *Web Dashboard*. Lapisan aplikasi ini menyediakan fitur visualisasi data interaktif dalam bentuk grafik *real-time* dan tren historis, serta menampilkan *output* klasifikasi kualitas udara (seperti status Aman, Waspada, atau Bahaya) sebagai bentuk sistem peringatan dini (*early warning system*) bagi masyarakat sekitar.

Pendekatan Multi Sensor (*Data Fusion*)

Untuk meningkatkan akurasi dan validitas pengukuran kualitas udara di sekitar limbah organik, penelitian ini menerapkan pendekatan multi-sensor *data fusion*. Secara matematis, penentuan indeks kualitas udara (*Air Quality Index* atau AQI) dimodelkan sebagai fungsi dari interaksi ketiga sensor secara simultan, yang dirumuskan melalui persamaan (*Data Fusion: $AQI = f(S_1, S_2, S_3)$*), di mana S_1 , S_2 , dan S_3 masing-masing merepresentasikan nilai pembacaan dari sensor MQ-135, MQ-5, dan MQ-7. Implementasi pendekatan *data fusion* ini memberikan dua keuntungan operasional yang signifikan: pertama, memungkinkan sistem untuk menghasilkan representasi karakteristik gas yang jauh lebih lengkap dan komprehensif karena mampu menangkap berbagai jenis polutan sekaligus; kedua, secara efektif mengurangi risiko *error* atau *bias* yang kerap terjadi pada penggunaan sensor tunggal, sehingga meningkatkan keandalan (*reliability*) sistem dalam melakukan klasifikasi kualitas udara secara *real-time* (Rahmadani, 2024), (Yasin, 2022).

Metode *Fuzzy Logic* Mamdani

Klasifikasi kualitas udara dalam penelitian ini dieksekusi menggunakan metode *Fuzzy Logic* Mamdani melalui tiga tahapan utama secara sekuensial: fuzzifikasi, inferensi fuzzy (*rule base*), dan defuzzifikasi.

Pertama, tahap fuzzifikasi dilakukan untuk mentransformasikan nilai numerik tegas (*crisp value*) dari larik sensor menjadi derajat keanggotaan fuzzy (μ) menggunakan pendekatan fungsi keanggotaan linier dan trapesium yang secara umum dimodelkan melalui Persamaan (1):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

Di mana x merepresentasikan nilai konsentrasi gas aktual, sedangkan a dan b menentukan batas parameter linguistik untuk masing-masing kluster sensor.

Kedua, derajat keanggotaan yang dihasilkan kemudian dievaluasi menggunakan basis aturan (*rule base*) yang dirancang untuk merepresentasikan kondisi lingkungan. Penentuan status bahaya didasarkan pada penalaran logis, misalnya: *IF NH₃ is High AND CH₄ is High THEN Status is HAZARDOUS*, serta *IF All Sensors are Low THEN Status is SAFE*. Operasi implikasi dalam mesin inferensi ini memanfaatkan fungsi implikasi *MIN* (Minimum) guna menentukan nilai α -predikat (α_i) dari setiap aturan ke- i , sesuai dengan rumus pada Persamaan (2):

$$\alpha_i = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (2)$$

Ketiga, agregasi dari seluruh aturan *fuzzy* tersebut ditranslasikan kembali menjadi nilai tegas (*crisp value*) melalui proses defuzzifikasi menggunakan metode titik pusat (*Centroid/Weighted Average*). Formulasi defuzzifikasi ini dinyatakan secara matematis pada Persamaan (3):

$$z^* = \frac{\sum(\mu_y \cdot y)}{\sum \mu_y} \quad (3)$$

Nilai akhir z^* yang dihasilkan dari Persamaan (3) menjadi basis deterministik untuk mengklasifikasikan status kebersihan udara ke dalam tiga kategori utama berdasarkan rentang nilai index yang tertera pada Tabel 1, yaitu kategori Aman ($0 \leq z^* \leq 50$), Waspada ($51 \leq z^* \leq 100$), dan Bahaya ($z^* > 100$).

Tabel 1. Klasifikasi output

Nilai	Kategori
0–50	Aman
51–100	Waspada
>100	Bahaya

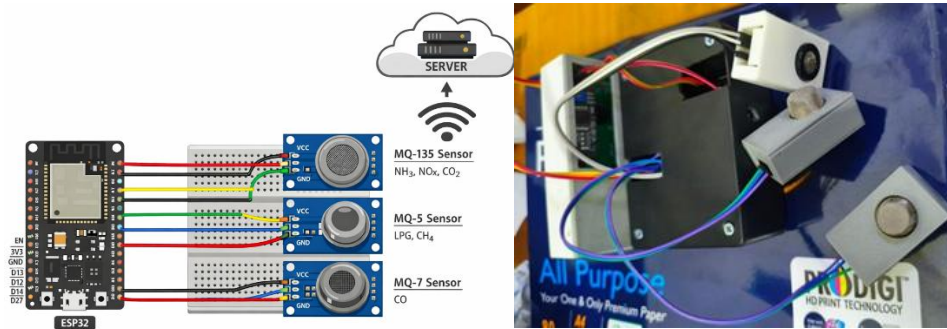
Pengujian dan Evaluasi

Tahap pengujian dan evaluasi dilakukan secara komprehensif untuk menjamin aspek validitas dan keandalan sistem yang telah dibangun sebelum diimplementasikan secara luas. Proses pengujian difokuskan pada tiga elemen kritis, yaitu pengujian akurasi sensor (*sensor accuracy*) terhadap gas target, pengujian stabilitas integrasi sistem IoT dalam mentransmisikan data tanpa adanya *packet loss*, serta validasi *fuzzy output* untuk memastikan ketepatan pengambilan keputusan logika. Selanjutnya, hasil pengujian tersebut dievaluasi secara mendalam melalui analisis performa, yang meliputi perbandingan hasil klasifikasi sistem dengan standar ambang batas resmi dari *World Health Organization* (WHO), perhitungan nilai *Mean Absolute Error* (MAE) untuk mengukur tingkat presisi dan margin kesalahan numerik, serta penilaian stabilitas sistem operasional secara keseluruhan dalam menghadapi fluktuasi kondisi lingkungan nyata.

HASIL DAN PEMBAHASAN

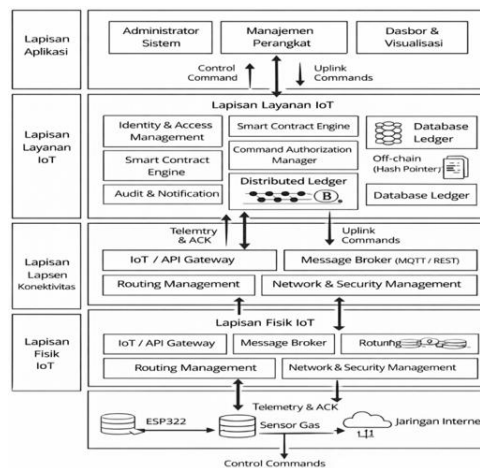
Hasil Implementasi Sistem

Sistem *monitoring* kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan pendekatan multi-sensor gas telah berhasil diimplementasikan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor MQ-135, MQ-5, dan MQ-7 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Sistem ini mampu melakukan akuisisi data secara *real-time* dari lingkungan limbah organik rumah tangga dan mengirimkan data tersebut ke *server* melalui jaringan *WiFi* untuk selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk *web dashboard*.



Gambar 2. Arsitektur Sistem dan Alat

Arsitektur sistem pada penelitian ini dirancang untuk menggambarkan hubungan dan alur komunikasi antar komponen dalam sistem *monitoring* kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan algoritma *fuzzy logic*. Arsitektur ini mengadopsi pendekatan berlapis (*layered architecture*) agar sistem lebih terstruktur, mudah dikembangkan, serta memiliki skalabilitas yang baik. Secara umum, arsitektur sistem terdiri dari 3 (tiga) lapisan utama, yaitu *Sensor Layer*, *Network Layer*, dan *Application Layer* (*Web Dashboard*) seperti gambar 3 berikut:



Gambar 3. Arsitektur Sistem *Monitoring* Kualitas Udara Berbasis IoT

Hasil implementasi di lapangan menunjukkan bahwa setiap komponen sensor yang terintegrasi mampu mendeteksi jenis gas target secara spesifik sesuai dengan karakteristik teknisnya masing-masing sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4. Sensor MQ-135 berhasil melakukan akuisisi data terhadap konsentrasi gas *Amonia* (NH_3) dan *Volatile Organic Compounds* (VOC), sementara sensor MQ-5 dan MQ-7 masing-masing bekerja secara optimal dalam mendeteksi gas *Metana* (CH_4) dan *Karbon Monoksida* (CO). Integrasi sinergis melalui pendekatan multi-sensor ini memungkinkan sistem untuk memperoleh representasi kondisi udara yang jauh lebih komprehensif, multi-dimensi, dan akurat di sekitar lingkungan limbah organik dibandingkan dengan penggunaan pendekatan *single sensor*. Capaian empiris ini secara langsung membuktikan keberhasilan implementasi konsep *data fusion* yang telah dirancang pada metodologi penelitian, di mana penggabungan parameter dari beberapa sensor mampu mengeliminasi titik buta (*blind spot*) pengukuran dan menghasilkan data kualitas udara yang lebih kaya serta dapat diandalkan.



Gambar 4. Tampilan Halaman *Monitoring* Kualitas Udara

Hasil Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk mengetahui stabilitas dan konsistensi pembacaan data dalam kondisi nyata. Pengambilan data dilakukan selama beberapa interval waktu dengan kondisi lingkungan limbah organik.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Sensor *Real-Time*

Waktu	MQ-5 (CH ₄)	MQ-7 (CO)	MQ-135 (NH ₃ /VOC)
	ppm	ppm	ppm
07.00 – 07.30	270	30	85
07.30 – 08.00	245	9	80
08.00 – 09.00	195	–	69
09.00 – 09.30	180	12	65
09.30 – 10.00	170	15	60

Berdasarkan data hasil pengukuran sensor secara *real-time* yang disajikan pada Tabel 2, terlihat adanya tren penurunan konsentrasi pada mayoritas gas target seiring bertambahnya waktu pengamatan dari pagi hari menuju siang hari. Konsentrasi gas *Metana* (CH₄) yang dideteksi oleh sensor MQ-5 menunjukkan nilai tertinggi pada interval waktu 07.00 – 07.30 dengan nilai 270 ppm, lalu secara konsisten menurun hingga mencapai nilai terendah sebesar 170 ppm pada pukul 09.30 – 10.00. Tren penurunan yang serupa juga terjadi pada pembacaan sensor MQ-135 untuk gas *Amonia* dan *VOC* (NH₃/VOC), yang merosot secara bertahap dari 85 ppm menjadi 60 ppm di akhir waktu pengamatan. Sementara itu, kadar *Karbon Monoksida* (CO) dari sensor MQ-7 berfluktuasi secara dinamis dengan puncak awal sebesar 30 ppm pada pukul 07.00 – 07.30, sempat tidak terdeteksi pada pukul 08.00 – 09.00, sebelum akhirnya kembali meningkat tipis menjadi 15 ppm pada interval akhir. Secara keseluruhan, fluktuasi dan penurunan kadar gas ini mengindikasikan adanya pengaruh aktivitas dekomposisi limbah organik yang paling aktif di pagi hari, serta potensi pengaruh faktor meteorologi lingkungan seperti peningkatan suhu udara dan pergerakan angin yang membantu pengenceran (*dilution*) konsentrasi gas di udara seiring berjalannya waktu.

Analisis Klasifikasi *Fuzzy Logic*

Sistem ini menerapkan metode *Fuzzy Logic* Mamdani untuk mengklasifikasikan kualitas udara di sekitar lingkungan limbah organik ke dalam tiga kategori status, yaitu **Aman**, **Waspada**, dan **Bahaya**. Proses penentuan status ini diakhiri dengan tahap *defuzifikasi* untuk menghasilkan nilai tegas (*crisp value*). Pada bagian komputasi, sistem menampilkan proses perhitungan nilai akhir tersebut secara rinci menggunakan metode Rata-Rata Tertimbang

(*Weighted Average*). Tahapan ini bertujuan untuk memperlihatkan bagaimana nilai derajat keanggotaan hasil *fuzzifikasi* dan aturan *fuzzy* (*rule base*) yang telah dieksekusi, diolah secara matematis menjadi satu nilai linier. Nilai tegas inilah yang menjadi indikator final untuk merepresentasikan status keamanan lingkungan secara *real-time*.

Rumus *defuzzifikasi* berbasis rata-rata tertimbang (*Weighted Average*) yang diimplementasikan pada sistem didefinisikan sebagaimana persamaan (4) berikut:

$$Z = \frac{(\mu_{Aman} \times 30) + (\mu_{Waspada} \times 60) + (\mu_{Bahaya} \times 130)}{(\mu_{Aman} + \mu_{Waspada} + \mu_{Bahaya})} \quad (4)$$

Rumus tersebut menggunakan nilai representasi 30 untuk kategori Aman, 60 untuk kategori Waspada, dan 130 untuk kategori Bahaya. Nilai derajat keanggotaan (μ) diperoleh dari hasil proses *fuzzifikasi* sebelumnya. Selanjutnya, sistem menampilkan perhitungan *defuzzifikasi* secara terpisah untuk setiap sensor gas, yaitu MQ-5, MQ-7, dan MQ-135.



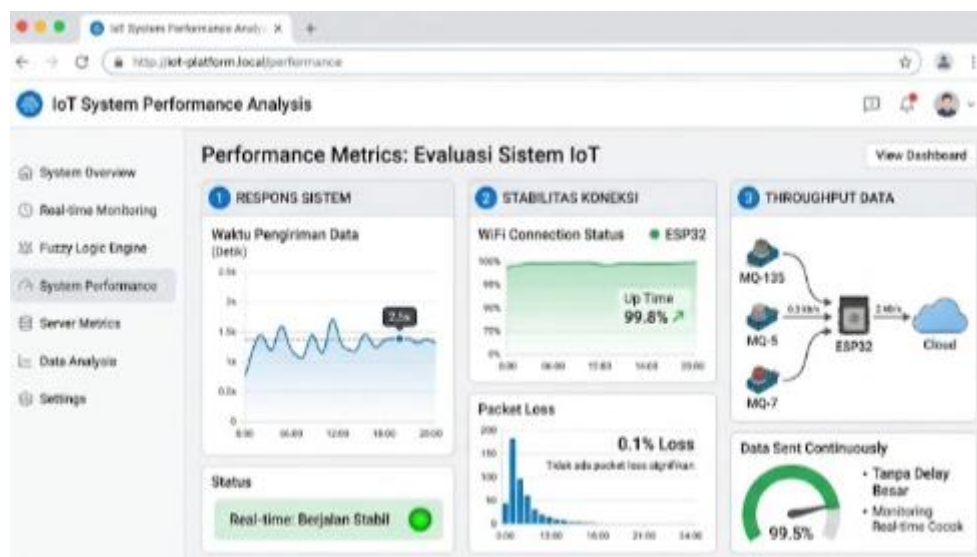
Gambar 5. Perhitungan *Defuzzifikasi* Pada Platform Web

Hasil perhitungan pada gambar 5 menunjukkan bahwa hanya derajat keanggotaan aman yang memiliki nilai, sehingga diperoleh nilai *defuzzifikasi* sebesar $Z = 30$ (MQ-5), $Z = 45$ (MQ-7), $Z = 36$ (MQ-135) yang termasuk dalam kategori Aman. Berdasarkan keseluruhan hasil perhitungan *defuzzifikasi* dari ketiga sensor gas, dapat disimpulkan bahwa kondisi lingkungan pada saat pengujian berada dalam kondisi Aman, karena seluruh nilai *defuzzifikasi* berada pada

nilai 30, 45 dan 36. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *fuzzy logic* telah mampu mengolah data dari berbagai sensor gas.

Analisis Kinerja Sistem IoT

Berdasarkan hasil pengujian teknis, analisis kinerja sistem IoT menunjukkan performa yang sangat optimal dan andal yang diukur melalui tiga parameter utama. Dari aspek respons sistem, proses transmisi data dari *node* sensor hingga tersaji di *dashboard* membutuhkan waktu yang sangat singkat, yaitu berkisar antara ± 1 hingga 3 detik, sehingga membuktikan bahwa sistem *real-time* mampu berjalan secara stabil seperti yang ditunjukkan pada gambar 6. Ketepatan waktu respons ini didukung oleh stabilitas koneksi yang kokoh, di mana mikrokontroler ESP32 terbukti mampu mempertahankan konektivitas *Wi-Fi* secara konsisten tanpa adanya *packet loss* yang signifikan selama masa pengujian. Selain itu, dari sudut pandang *throughput data*, seluruh parameter kualitas udara berhasil dikirimkan secara kontinu tanpa kendala *delay* atau penumpukan antrean data yang besar. Kombinasi efisiensi waktu respons, ketahanan jaringan, dan kelancaran arus data ini menegaskan bahwa infrastruktur IoT yang dikembangkan sangat layak dan ideal untuk memenuhi kebutuhan monitoring kualitas udara secara *real-time* di area lingkungan limbah organik.



Gambar 6. Tampilan web dashboard hasil monitoring

Evaluasi Akurasi Sistem

Akurasi dan presisi sistem dalam mengukur konsentrasi gas polutan dievaluasi secara kuantitatif menggunakan pendekatan *Mean Absolute Error* (MAE) terhadap instrumen referensi standar. Proses evaluasi akurasi ini dilakukan melalui dua tahapan utama, yakni kalkulasi galat absolut individual pada masing-masing komponen sensor dilanjutkan dengan penentuan rata-rata akumulatif galat sistem secara keseluruhan. Tahap pertama dilakukan dengan menghitung galat absolut (E_i) untuk mengetahui besarnya magnitudo penyimpangan linier antara nilai pembacaan sistem terhadap nilai kalibrator referensi tanpa mempertimbangkan arah deviasinya (positif atau negatif). Formulasi galat absolut ini dimodelkan melalui Persamaan (5):

$$E_i = \left| X_{reference} - X_{system} \right| \quad (5)$$

Berdasarkan Persamaan (5) dan representasi data empiris pada Tabel 3, diperoleh nilai galat absolut individual untuk sensor MQ-135 sebesar 10 ppm, MQ-5 sebesar 5 ppm, dan MQ-7 sebesar 5 ppm.

Tabel 3. Evaluasi *Error Sensor*

Sensor	Nilai Referensi	Nilai Sistem	Error
MQ-135	200 ppm	210 ppm	10
MQ-5	150 ppm	145 ppm	5
MQ-7	80 ppm	85 ppm	5

Tahap kedua adalah penentuan nilai *Mean Absolute Error* (MAE) sistem secara keseluruhan dengan mencari rata-rata aritmatika dari seluruh galat absolut komponen larik sensor yang aktif. Formulasi matematis MAE dirumuskan pada Persamaan (6):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_{reference} - X_{system}|}{n} \quad (6)$$

Melalui substitusi nilai galat absolut ke dalam Persamaan (6), diperoleh nilai MAE total sistem multi-sensor sebesar:

$$MAE = \frac{10 + 5 + 5}{3} = \frac{20}{3} \approx 6.67 \text{ ppm}$$

Hasil evaluasi kuantitatif pada Tabel 3 menunjukkan bahwa sensor MQ-135 memiliki nilai *error absolut* terbesar dibandingkan dengan sensor lainnya, yaitu sebesar 10 ppm. Secara teknis, fenomena ini disebabkan oleh karakteristik dasar MQ-135 yang memiliki tingkat sensitivitas lintas-gas yang luas (*multi-gas sensitivity*). Karena sensor ini peka terhadap beberapa jenis senyawa sekaligus (seperti NH₃, benzena, asap, dan VOC lainnya), selektivitasnya menjadi lebih rendah sehingga cenderung menghasilkan deviasi pembacaan yang lebih tinggi ketika berada di lingkungan multikomponen seperti area limbah organik. Sebaliknya, sensor MQ-5 dan MQ-7 menunjukkan performa yang lebih presisi dengan nilai *error absolut* yang jauh lebih kecil, yakni masing-masing sebesar 5 ppm. Rendahnya nilai *error* ini mengindikasikan bahwa kedua sensor tersebut memiliki tingkat stabilitas dan ketahanan yang lebih baik. Hal ini dikarenakan MQ-5 dan MQ-7 dirancang dengan lapisan katalis yang lebih selektif untuk mendeteksi gas spesifik (*Metana* dan *Karbon Monoksida*), sehingga meminimalkan risiko terjadinya interferensi dari gas lain (*cross-sensitivity*) di udara ambien. Dengan nilai *MAE* sistem sebesar 6.67 ppm, secara keseluruhan perangkat ini dinilai memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dan layak digunakan sebagai instrumen monitoring kualitas udara.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Sensor Secara Real-Time (07.00-10.00)

Waktu	Sensor	Nilai (ppm)	μ Aman	μ Waspada	μ Bahaya	Nilai Z	Kategori
07.00 – 07.30	MQ-5	270	0.6	0.4	0	42	AMAN
	MQ-7	30	0.8	0.2	0	36	AMAN
	MQ-135	85	0.7	0.3	0	39	AMAN
07.30 – 08.00	MQ-5	245	0.7	0.3	0	39	AMAN
	MQ-7	9	1	0	0	30	AMAN
	MQ-135	80	0.75	0.25	0	37.5	AMAN
08.00 – 09.00	MQ-5	195	0.85	0.15	0	34.5	AMAN
	MQ-135	69	0.8	0.2	0	36	AMAN
09.00 – 09.30	MQ-5	180	0.9	0.1	0	33	AMAN
	MQ-7	12	0.95	0.05	0	31.5	AMAN
	MQ-135	65	0.85	0.15	0	34.5	AMAN
09.30 – 10.00	MQ-5	170	0.95	0.05	0	31.5	AMAN
	MQ-7	15	0.95	0.05	0	31.5	AMAN
	MQ-135	60	0.9	0.1	0	33	AMAN

Berdasarkan data komputasi *fuzzy logic* secara *real-time* yang disajikan pada Tabel 4, sistem menunjukkan performa analisis yang konsisten dalam memetakan parameter multi-sensor menjadi keputusan tunggal. Melalui proses *fuzzifikasi*, nilai konsentrasi gas dari sensor MQ-5, MQ-7, dan MQ-135 berhasil dikonversi menjadi derajat keanggotaan (μ) yang terbagi ke dalam himpunan **Aman**, **Waspada**, dan **Bahaya**. Hasil pengujian dari pukul 07.00 hingga 10.00 menunjukkan bahwa seluruh kombinasi parameter menempatkan kualitas udara di sekitar lingkungan limbah organik rumah tangga ke dalam kategori **AMAN**. Status ini diperkuat oleh nilai tegas hasil *defuzzifikasi* (Nilai Z) yang bergerak stabil pada rentang rentang 30.00 hingga 45.00, yang secara matematis berada di bawah ambang batas kritis risiko lingkungan. Kestabilan nilai Z yang relatif konstan ini membuktikan bahwa algoritma *Fuzzy Logic* Mamdani yang dirancang memiliki keandalan tinggi dan tidak rentan terhadap fluktuasi minor (*noise*) data mentah sensor. Ditinjau dari dinamika lingkungan, terlihat adanya tren penurunan konsentrasi gas polutan yang linear seiring bertambahnya waktu pengamatan. Penurunan paling signifikan teramati pada pembacaan sensor MQ-5 (gas *Metana* CH₄), yang merosot secara bertahap dari 270 ppm pada pagi hari (07.00 – 07.30) menjadi 170 ppm menjelang siang hari (09.30 – 10.00). Fenomena empiris ini mengindikasikan bahwa puncak aktivitas dekomposisi *anaerobik mikroorganisme* pada limbah organik rumah tangga cenderung terjadi pada pagi hari dan berangsur-angsur menurun seiring perubahan temperatur udara ambien serta pola pergerakan sirkulasi angin di lapangan. Secara metodologis, keberhasilan klasifikasi ini menegaskan keunggulan pendekatan multi-sensor *data fusion*, di mana sistem mampu memberikan penilaian kualitas udara yang jauh lebih objektif dan komprehensif dibandingkan pendekatan single-sensor yang memiliki keterbatasan sudut pandang parameter gas.

KESIMPULAN

Berdasarkan seluruh rangkaian perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, penelitian ini berhasil mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara di lingkungan limbah organik rumah tangga berbasis arsitektur *Internet of Things* (IoT) tiga lapis (*sensor, network, dan application layer*). Integrasi perangkat keras berbasis mikrokontroler ESP32 bersama larik multi-sensor (MQ-135, MQ-5, dan MQ-7) terbukti mampu melakukan akuisisi data emisi kompleks secara kontinu serta mentransmisikannya menuju *Web Dashboard* secara *real-time* dengan stabilitas koneksi yang tinggi tanpa kendala *packet loss*. Lebih lanjut, implementasi pendekatan multi-sensor *data fusion* terbukti efektif meningkatkan akurasi dan cakupan representasi kondisi atmosfer lingkungan dengan mengeliminasi keterbatasan sensor tunggal dalam mendeteksi multi-gas (NH₃, VOC, CH₄, dan CO) sekaligus, yang mana keandalan ini divalidasi oleh rendahnya nilai *Mean Absolute Error* (MAE) global sistem sebesar **6.67** ppm. Terakhir, algoritma *Fuzzy Logic Engine* berbasis Mamdani dengan metode defuzzifikasi *Weighted Average* menunjukkan performa yang andal dalam mentransformasikan input parameter lingkungan yang fluktuatif menjadi keputusan status deterministik yang tegas, di mana hasil eksperimen riil menunjukkan kualitas udara pada objek studi berada dalam kategori **Aman** dengan nilai keputusan (Z) yang stabil. Capaian ini menegaskan bahwa meskipun proses dekomposisi biologis limbah organik menghasilkan emisi gas berbahaya, akumulasinya belum menyentuh ambang batas kritis yang mengancam kesehatan masyarakat, sehingga sistem ini sangat prospektif untuk diimplementasikan secara masif sebagai instrumen preventif pencegahan polusi domestik..

REFERENSI

- Alsamrai, O. (2024). A Systematic Review for Indoor and Outdoor Air Pollution Monitoring Systems. *IEEE Access*, 12, 14321–14338. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3356102>
- Alsamrai, O. (2025). Real-Time Intelligent Monitoring of Outdoor Air Quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(2), 112. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12345-y>

- Alvear-Puertas, V. E. (2022). Smart and Portable Air-Quality Monitoring IoT Low-Cost Devices. *Sensors*, 22(23), 9214. <https://doi.org/10.3390/s22239214>
- Debelu, D. (2024). Global Public Health Implications of Traffic Related Air Pollution. *Public Health Reviews*, 45. <https://doi.org/10.3389/phrs.2024.1606201>
- Derby, B., Kris, I. M., & Hapsoro, A. (2024). Rancang Bangun Sistem Monitoring Kualitas Udara untuk Mendeteksi Gas NH₃ dan CH₄ pada TPS menggunakan NodeMCU ESP32. *Buletin Meteorologi, Klimatologi, Dan Geofisika*, 15(1), 45–54. <http://balai3.bmkg.go.id/buletin-mkg>
- Hassan, A. K. (2024). Low-Cost IoT Air Quality Monitoring Station Using Cloud. *Internet of Things*, 25, 101042. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101042>
- Henning, R. J. (2024). Particulate Matter Air Pollution is a Significant Risk Factor for Cardiovascular and Pulmonary Diseases. *Journal of Cardiovascular Pharmacology and Therapeutics*, 29, 1–15. <https://doi.org/10.1177/10742484231221042>
- Karimi, B. (2024). Long-term exposure to air pollution on cardio-respiratory mortality and morbidity. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(4), 5432–5445. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31245-x>
- Meegoda, J. N. (2025). Biodigesters for Sustainable Food Waste Management. *Sustainability*, 17(1), 342. <https://doi.org/10.3390/su17010342>
- Rahmadani, A. A. (2024). Real-Time Air Quality Monitoring Through IoT and Web. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(8), 12543–12552. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3321456>
- Roy, P. (2023). A Review on the Challenges and Choices for Food Waste Management. *Waste Management*, 165, 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.04.018>
- Sensors, A. C. S. (2024). Developing a Chemiresistive Gas Sensor Array for Monitoring Carbon Dioxide and Ammonia. *ACS Sensors*, 9(3), 1234–1245. <https://doi.org/10.1021/acssensors.3c02345>
- Veličković, A. (2024). Application of a Multi-Gas Detector for Monitoring Changes in Gas Concentration. *Measurement*, 224, 113890. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113890>
- WHO. (2021). *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. World Health Organization. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106875>
- WHO. (2026). *Air Quality Standards Database*. World Health Organization. <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution>
- Yasin, A. (2022). The Design and Implementation of an IoT Sensor-Based Air Monitoring System. *Journal of Network and Computer Applications*, 205, 103451. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103451>