

DESAIN IOT DENGAN METODE FUZZY SUGENO UNTUK MONITORING GAS DAN KELEMBABAN PADA RUANG TERTUTUP DAN SEMPIT

Mochammad Tegar Bhayangkara, Miftahur Rohman, Lusia Rakhmawati, Arif Widodo

Universitas Negeri Surabaya

Mochammad.22104@mhs.unesa.ac.id, miftahurrohman@unesa.ac.id, lusiarakhmawati@unesa.ac.id, arifwidodo@unesa.ac.id

Abstract (English)

Carbon Monoxide (CO) is a toxic, colorless, and odorless gas that is difficult to detect directly by humans. Exposure to carbon monoxide in enclosed and confined spaces may endanger human health when its concentration exceeds the allowable limit. Therefore, a system capable of monitoring carbon monoxide concentration and air humidity in real time is required. This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based air quality monitoring system using the Sugeno Fuzzy method. The system was developed using an ESP32 microcontroller integrated with an MQ-7 sensor for carbon monoxide detection, a DHT22 sensor for humidity measurement, LED indicators, a buzzer, and the Blynk application as the monitoring platform. The MQ-7 sensor readings were converted into carbon monoxide concentration in parts per million (ppm) and processed together with humidity data using the Zero-Order Sugeno Fuzzy method to classify air conditions into Safe, Alert, and Danger categories. The results show that the proposed system is capable of monitoring air quality in real time, displaying monitoring information through the Blynk application, and providing warnings using LED indicators and a buzzer according to the classification results. Furthermore, the implementation of the Sugeno Fuzzy method produced classification results consistent with manual calculations and demonstrated good performance in air quality monitoring. Therefore, the developed system can serve as an alternative solution for automatic and real-time air quality monitoring in enclosed and confined spaces.

Article History

Submitted: 18 July 2026

Accepted: 27 July 2026

Published: 28 July 2026

Key Words

Internet of Things (IoT), ESP32, MQ-7, DHT22, Fuzzy Sugeno, Carbon Monoxide, Humidity, Air Quality Monitoring.

Abstrak (Indonesia)

Gas karbon monoksida (CO) merupakan gas beracun yang tidak berwarna dan tidak berbau sehingga sulit dideteksi secara langsung oleh manusia. Paparan gas karbon monoksida pada ruang tertutup dan sempit dapat membahayakan kesehatan apabila konsentrasinya melebihi ambang batas yang diizinkan. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem yang mampu memantau konsentrasi gas karbon monoksida dan kelembaban udara secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan metode Fuzzy Sugeno. Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan sensor MQ-7 sebagai pendeteksi gas karbon monoksida, sensor DHT22 sebagai pengukur kelembaban udara, indikator LED, buzzer, serta aplikasi Blynk sebagai media monitoring. Nilai pembacaan sensor MQ-7 dikonversi menjadi konsentrasi gas karbon monoksida dalam satuan parts per million (ppm), kemudian diproses bersama data kelembaban menggunakan metode Fuzzy Sugeno Orde-0 untuk mengklasifikasikan kondisi udara ke dalam kategori Aman, Waspada, dan Bahaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem berhasil melakukan pemantauan kualitas udara secara real-time, menampilkan informasi kondisi udara melalui aplikasi Blynk, serta memberikan peringatan menggunakan LED dan buzzer sesuai hasil klasifikasi. Selain itu, implementasi metode Fuzzy Sugeno pada sistem mampu menghasilkan klasifikasi kondisi udara yang sesuai dengan perhitungan manual dan menunjukkan kinerja yang baik dalam proses monitoring kualitas udara. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan dapat menjadi alternatif dalam memantau kualitas udara pada ruang tertutup dan sempit secara otomatis dan real-time.

Sejarah Artikel

Submitted: 18 July 2026

Accepted: 27 July 2026

Published: 28 July 2026

Kata Kunci

Internet of Things (IoT), ESP32, MQ-7, DHT22, Fuzzy Sugeno, Karbon Monoksida, Kelembaban, Monitoring Kualitas Udara.

PENDAHULUAN

Kualitas udara merupakan salah satu isu lingkungan yang mendapat perhatian global karena berpengaruh langsung terhadap kesehatan manusia. Salah satu polutan yang berbahaya adalah gas karbon monoksida (CO), yaitu gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa, namun memiliki sifat toksik yang dapat menyebabkan hipoksia jaringan hingga kematian apabila terhirup dalam konsentrasi tinggi. Risiko paparan CO menjadi semakin besar pada ruang tertutup dan sempit dengan sirkulasi udara yang terbatas, karena gas dapat terakumulasi tanpa disadari oleh pengguna ruang.

Salah satu contoh ruang tertutup dan sempit yang banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari adalah kabin kendaraan yang menggunakan sistem pendingin udara (air conditioner/AC). Pada kondisi tertentu, terutama ketika sistem AC menggunakan mode resirkulasi udara (recirculation mode), pertukaran udara dengan lingkungan luar menjadi terbatas sehingga meningkatkan potensi akumulasi gas karbon monoksida di dalam kabin. Dirks dkk. (2018) melaporkan bahwa penggunaan mode resirkulasi menyebabkan kadar CO di dalam kabin kendaraan meningkat secara signifikan dibandingkan dengan ventilasi terbuka. Temuan tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi sistem ventilasi kendaraan memiliki pengaruh langsung terhadap tingkat paparan karbon monoksida yang diterima pengguna kendaraan.

Permasalahan paparan karbon monoksida di dalam kendaraan telah menjadi perhatian berbagai penelitian karena berkaitan erat dengan keselamatan dan kesehatan masyarakat. Duggan (2024) melaporkan bahwa pengendara dapat mengalami paparan CO yang melebihi ambang batas keselamatan, terutama pada kondisi lalu lintas padat. Selain konsentrasi karbon monoksida, parameter lingkungan seperti kelembaban udara juga memengaruhi kualitas udara dan tingkat kenyamanan pada ruang tertutup. Oleh karena itu, pemantauan karbon monoksida perlu dilakukan bersamaan dengan pengukuran kelembaban agar kondisi lingkungan dapat dievaluasi secara lebih komprehensif. Seiring berkembangnya teknologi Internet of Things (IoT), berbagai sistem monitoring kualitas udara berbasis sensor telah dikembangkan untuk melakukan pemantauan secara real-time. Goh dkk. (2021), misalnya, mengembangkan sistem monitoring kualitas udara dalam kendaraan berbasis sensor CO dan algoritma machine learning yang mampu mendeteksi perubahan kualitas udara secara cepat serta memberikan informasi risiko kepada pengguna kendaraan.

Di Indonesia, penerapan logika fuzzy dalam sistem monitoring kualitas udara juga telah banyak dikembangkan. Endra dan Saputra (2022) mengimplementasikan metode Fuzzy Tsukamoto untuk mengklasifikasikan kualitas udara berdasarkan sensor karbon monoksida dan debu, sedangkan Majidah dkk. (2024) menerapkan Fuzzy Mamdani pada sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT. Kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode Fuzzy Inference System (FIS) mampu meningkatkan akurasi pengambilan keputusan dalam sistem monitoring kualitas udara. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih difokuskan pada pemantauan kualitas udara di dalam ruangan secara umum, sehingga kajian mengenai ruang tertutup dan sempit, seperti kabin kendaraan, masih relatif terbatas.

Selain itu, penelitian terdahulu umumnya hanya menerapkan satu metode fuzzy tanpa melakukan evaluasi komparatif terhadap beberapa metode inferensi yang berbeda. Padahal, metode Sugeno, Tsukamoto, dan Mamdani memiliki karakteristik inferensi yang berbeda. Metode Mamdani menghasilkan keluaran berupa himpunan fuzzy yang memerlukan proses defuzzifikasi, metode Tsukamoto menghasilkan keluaran tegas melalui fungsi keanggotaan monoton, sedangkan metode Sugeno menggunakan fungsi linear atau konstanta pada bagian konsekuen sehingga memiliki komputasi yang lebih sederhana dan efisien. Perbedaan karakteristik tersebut berpotensi menghasilkan kinerja yang berbeda ketika diterapkan pada sistem monitoring kualitas udara berbasis sensor.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem monitoring gas karbon monoksida dan kelembaban pada ruang tertutup dan sempit berbasis Internet of Things (IoT) dengan menerapkan Fuzzy Inference System metode Sugeno sebagai mekanisme pengambilan keputusan. Sistem menggunakan sensor MQ-7 untuk mendeteksi kadar karbon monoksida dan sensor DHT22 untuk mengukur kelembaban udara. Selain mengimplementasikan metode Sugeno, penelitian ini juga membandingkan kinerjanya dengan metode Tsukamoto dan Mamdani menggunakan data masukan yang sama. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai metode fuzzy yang paling efektif untuk diterapkan pada sistem monitoring kualitas udara pada ruang tertutup dan sempit berbasis IoT.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan pendekatan prototyping untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem monitoring karbon monoksida (CO) dan kelembaban pada ruang tertutup dan sempit berbasis Internet of Things (IoT). Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan pengembangan sistem secara bertahap mulai dari perancangan, implementasi, pengujian, hingga penyempurnaan prototipe sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem yang dikembangkan menggunakan sensor MQ-7 sebagai pendeteksi konsentrasi gas karbon monoksida, sensor DHT22 sebagai pengukur kelembaban udara, dan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengolahan data sekaligus modul komunikasi Wi-Fi. Data hasil pembacaan sensor diproses menggunakan Fuzzy Inference System (FIS) metode Sugeno, kemudian ditampilkan melalui LED indikator, buzzer, dan aplikasi Blynk sehingga kondisi lingkungan dapat dipantau secara real-time.

Metode Fuzzy Sugeno menggunakan dua variabel input, yaitu konsentrasi karbon monoksida (CO) dan kelembaban udara, serta satu variabel output berupa tingkat kondisi lingkungan. Variabel karbon monoksida diklasifikasikan menjadi tiga himpunan fuzzy, yaitu Rendah, Sedang, dan Tinggi, sedangkan kelembaban dibagi menjadi kategori Rendah, Normal, dan Tinggi. Output sistem berupa nilai crisp yang diklasifikasikan menjadi tiga kondisi, yaitu Aman, Waspada, dan Bahaya. Proses inferensi dilakukan berdasarkan sembilan aturan (rule base) yang mengombinasikan kedua variabel input untuk menghasilkan keputusan kondisi lingkungan.

Implementasi sistem dilakukan dengan mengintegrasikan ESP32, sensor MQ-7, sensor DHT22, serta platform Blynk sebagai media monitoring berbasis IoT. Data sensor dibaca secara periodik, diproses menggunakan metode Fuzzy Sugeno, kemudian dikirim melalui jaringan Wi-Fi sehingga pengguna dapat memantau konsentrasi karbon monoksida, kelembaban udara, dan status kondisi lingkungan melalui aplikasi pada telepon pintar. Selain menampilkan data secara real-time, sistem juga mengaktifkan LED indikator, buzzer, serta notifikasi pada aplikasi ketika kondisi lingkungan berada pada kategori bahaya.

Evaluasi sistem dilakukan melalui beberapa pengujian yang meliputi validasi sensor MQ-7 dan DHT22 terhadap alat pembanding menggunakan parameter Mean Absolute Error (MAE), pengujian waktu respons sensor, perbandingan metode Fuzzy Sugeno, Mamdani, dan Tsukamoto menggunakan data masukan yang sama, pengujian delay komunikasi data pada platform Blynk, serta pengujian fungsional sistem secara keseluruhan. Kinerja sistem dinilai berdasarkan kesesuaian hasil klasifikasi, respons indikator, keberhasilan pengiriman data, dan nilai akurasi sistem yang dihitung menggunakan persamaan akurasi.

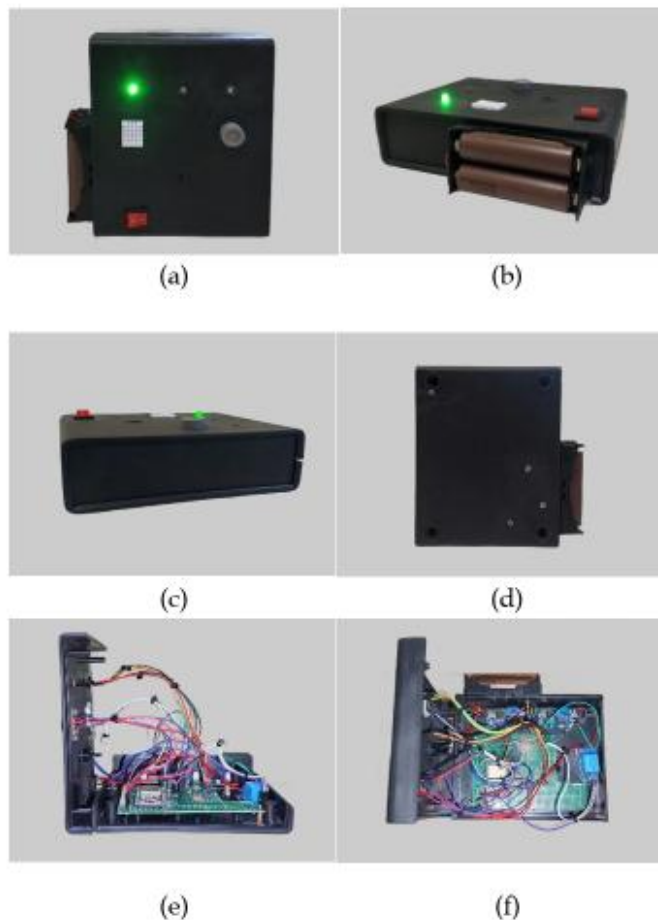
HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Sistem Monitoring

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu mendeteksi konsentrasi gas karbon monoksida (CO) dan kelembaban udara pada ruang tertutup dan sempit secara *real-time*. Sistem terdiri atas sensor MQ-7 sebagai

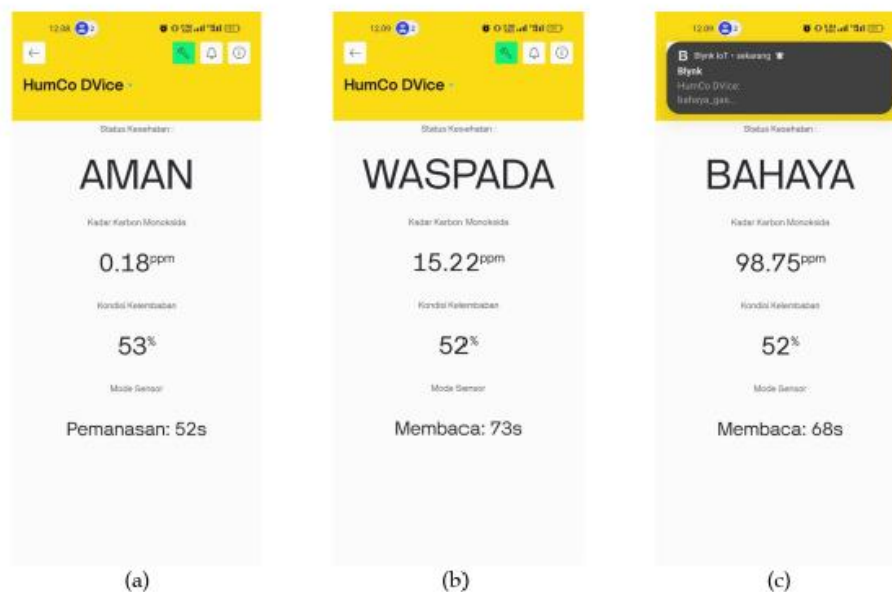
pendeteksi karbon monoksida, sensor DHT22 sebagai sensor kelembaban, mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali, LED indikator, buzzer, serta aplikasi Blynk sebagai media monitoring. Gambar 1 memperlihatkan implementasi perangkat yang telah direalisasikan sesuai dengan rancangan sistem. Seluruh komponen berhasil diintegrasikan ke dalam satu perangkat sehingga dapat melakukan akuisisi data sensor, pemrosesan menggunakan metode Fuzzy Sugeno, serta memberikan keluaran melalui indikator lokal maupun aplikasi IoT.

Gambar 1. Implementasi perangkat monitoring kualitas udara berbasis IoT



Gambar 2 menunjukkan antarmuka aplikasi Blynk pada tiga kondisi keluaran sistem, yaitu Aman, Waspada, dan Bahaya. Selain menampilkan nilai konsentrasi karbon monoksida dan kelembaban udara, aplikasi juga menampilkan status kondisi lingkungan sehingga pengguna dapat memantau perubahan kondisi udara secara *real-time*.

Gambar 2. Tampilan aplikasi Blynk pada kondisi Aman, Waspada, dan Bahaya



Validasi Sensor

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sensor MQ-7 dan DHT22 dalam menghasilkan data yang digunakan sebagai masukan sistem Fuzzy Sugeno. Validasi dilakukan melalui perbandingan hasil pembacaan sensor dengan alat pembanding menggunakan 20 data pengujian.

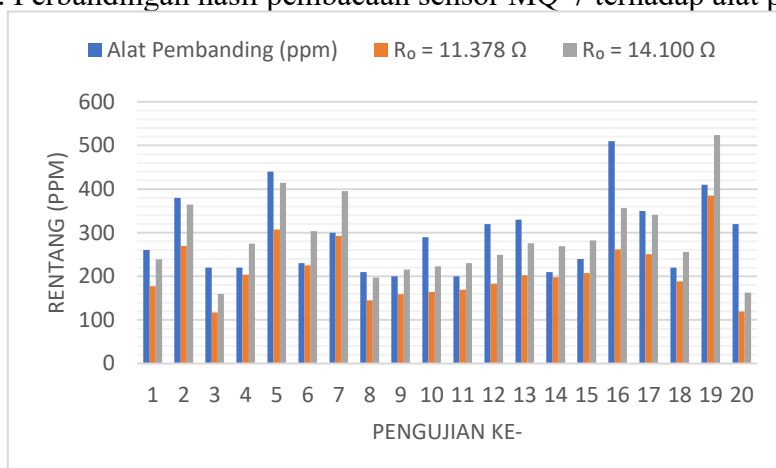
Hasil validasi sensor MQ-7 diringkas pada Tabel 1. Penggunaan nilai resistansi referensi (R_0) sebesar 14.100Ω menghasilkan rata-rata pembacaan sensor sebesar 293,16 ppm, sangat mendekati rata-rata alat pembanding (293,00 ppm) dengan nilai MAE sebesar 58,11 ppm. Sebaliknya, penggunaan nilai R_0 sebesar 11.378Ω menghasilkan nilai MAE yang lebih besar, yaitu 81,93 ppm.

Tabel 1. Ringkasan hasil validasi sensor MQ-7

Parameter	$R_0 = 11.378 \Omega$	$R_0 = 14.100 \Omega$
Rata-rata pembacaan sensor (ppm)	217,19	293,16
Rata-rata alat pembanding (ppm)	293,00	293,00
MAE (ppm)	81,93	58,11

Perbandingan hasil pembacaan sensor MQ-7 terhadap alat pembanding ditunjukkan pada Gambar 3. Grafik memperlihatkan bahwa pola perubahan pembacaan sensor mengikuti perubahan konsentrasi gas yang terukur pada alat pembanding. Kurva pembacaan menggunakan nilai $R_0 = 14.100 \Omega$ tampak lebih mendekati kurva alat pembanding dibandingkan penggunaan nilai $R_0 = 11.378 \Omega$.

Gambar 3. Perbandingan hasil pembacaan sensor MQ-7 terhadap alat pembanding



Hasil validasi sensor DHT22 disajikan pada Tabel 2. Sensor menghasilkan rata-rata pembacaan kelembaban sebesar 51,92 %RH, sedangkan alat pembanding menunjukkan rata-rata 49,55 %RH, dengan nilai MAE sebesar 2,55 %RH.

Tabel 2. Ringkasan hasil validasi sensor DHT22

Parameter	Nilai
Rata-rata sensor (%RH)	51,92
Rata-rata alat pembanding (%RH)	49,55
MAE (%RH)	2,55

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa selisih pembacaan sensor terhadap alat pembanding relatif kecil sehingga data kelembaban yang dihasilkan dapat digunakan sebagai masukan pada proses inferensi fuzzy.

Evaluasi Kinerja Sistem

Evaluasi dilakukan terhadap implementasi metode Fuzzy Sugeno, waktu respons sensor, komunikasi IoT, dan kinerja sistem secara keseluruhan. Hasil evaluasi dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan hasil evaluasi sistem

Parameter	Hasil
MAE Fuzzy Sugeno	0,0016
Delay komunikasi IoT	0,96 detik
Waktu respons sensor MQ-7	5,68 detik
Akurasi sistem	100%

Berdasarkan Tabel 3, implementasi metode Fuzzy Sugeno menghasilkan nilai MAE sebesar 0,0016, yang menunjukkan kesesuaian yang sangat tinggi antara hasil perhitungan program dan perhitungan manual. Selain itu, sistem mampu mengirimkan data ke aplikasi Blynk dengan rata-rata *delay* 0,96 detik, sedangkan sensor MQ-7 memberikan respons terhadap perubahan konsentrasi gas dalam waktu rata-rata 5,68 detik. Pengujian fungsional terhadap 20 skenario menunjukkan bahwa seluruh komponen sistem bekerja sesuai dengan rancangan sehingga diperoleh tingkat akurasi sistem sebesar 100%.

Perbandingan Metode Fuzzy

Perbandingan dilakukan terhadap metode Sugeno, Mamdani, dan Tsukamoto menggunakan data masukan yang sama untuk mengetahui perbedaan hasil klasifikasi kondisi udara. Ringkasan hasil klasifikasi ketiga metode disajikan pada Tabel 4.

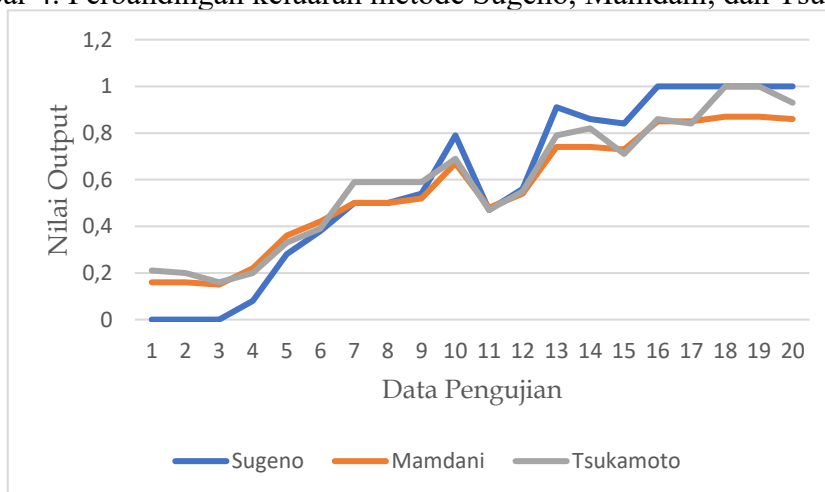
Tabel 4. Perbandingan hasil klasifikasi tiga metode Fuzzy Inference System

Metode	Aman	Waspada	Bahaya
Sugeno	6	6	8
Mamdani	5	7	8
Tsukamoto	6	6	8

Berdasarkan Tabel 4, metode Sugeno dan Tsukamoto menghasilkan distribusi klasifikasi yang sama, sedangkan metode Mamdani menghasilkan satu perbedaan klasifikasi pada data transisi sehingga jumlah data kategori Aman berkurang menjadi lima dan kategori Waspada bertambah menjadi tujuh.

Perbandingan nilai keluaran (*crisp output*) ketiga metode ditunjukkan pada Gambar 4. Grafik memperlihatkan bahwa ketiga metode menghasilkan pola perubahan keluaran yang relatif serupa pada seluruh data pengujian, meskipun terdapat perbedaan nilai keluaran pada beberapa kondisi transisi.

Gambar 4. Perbandingan keluaran metode Sugeno, Mamdani, dan Tsukamoto



Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem monitoring yang dikembangkan mampu mengintegrasikan pembacaan sensor, proses inferensi fuzzy, serta komunikasi IoT dengan baik. Temuan ini menjadi dasar untuk menganalisis performa metode Fuzzy Sugeno dan membandingkannya dengan metode Mamdani dan Tsukamoto pada bagian pembahasan.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang dikembangkan mampu mengintegrasikan sensor MQ-7, sensor DHT22, metode Fuzzy Inference System (FIS) Sugeno, dan platform Blynk dalam satu sistem yang bekerja secara terpadu. Integrasi tersebut memungkinkan proses akuisisi data, inferensi fuzzy, hingga penyampaian informasi kepada pengguna berlangsung secara otomatis dan *real-time*. Kemampuan tersebut menunjukkan bahwa pendekatan IoT tidak hanya meningkatkan aksesibilitas data, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat pada sistem pemantauan lingkungan.

Temuan ini sejalan dengan konsep Internet of Things yang menekankan integrasi sensor, komunikasi data, dan komputasi cerdas dalam mendukung sistem monitoring modern (Atzori et al., 2010; Gubbi et al., 2013).

Validasi sensor menunjukkan bahwa penyesuaian nilai resistansi referensi (R_0) memberikan pengaruh terhadap akurasi pembacaan sensor MQ-7. Penggunaan nilai R_0 sebesar 14.100 Ω menghasilkan nilai Mean Absolute Error (MAE) yang lebih rendah dibandingkan nilai hasil kalibrasi awal. Hal tersebut menunjukkan bahwa karakteristik sensor semikonduktor dipengaruhi oleh proses kalibrasi dan kondisi lingkungan sehingga nilai referensi yang digunakan perlu disesuaikan agar hasil konversi konsentrasi gas semakin mendekati kondisi sebenarnya. Fenomena tersebut sesuai dengan karakteristik sensor seri MQ yang memerlukan proses kalibrasi untuk memperoleh hubungan yang lebih representatif antara resistansi sensor dan konsentrasi gas (Hanwei Electronics, 2018). Hasil ini juga mendukung penelitian yang menyatakan bahwa akurasi sistem monitoring berbasis sensor gas sangat dipengaruhi oleh kualitas proses kalibrasi sebelum implementasi pada lingkungan nyata (Kim et al., 2021).

Sensor DHT22 menghasilkan nilai MAE yang relatif kecil sehingga mampu menyediakan data kelembaban yang stabil sebagai salah satu variabel masukan pada sistem inferensi fuzzy. Stabilitas pembacaan kelembaban menjadi penting karena kelembaban udara dapat memengaruhi karakteristik pembacaan beberapa sensor gas berbasis semikonduktor. Oleh karena itu, penggunaan dua parameter lingkungan secara simultan memberikan representasi kondisi udara yang lebih baik dibandingkan penggunaan konsentrasi karbon monoksida saja. Pendekatan multivariabel tersebut sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa kombinasi beberapa parameter lingkungan mampu meningkatkan reliabilitas sistem monitoring berbasis IoT (Miorandi et al., 2012; Ray, 2018).

Implementasi metode Fuzzy Sugeno menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat tinggi antara hasil perhitungan manual dan keluaran program pada mikrokontroler ESP32. Nilai MAE yang sangat kecil menunjukkan bahwa proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi telah diimplementasikan sesuai dengan model teoritis. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa metode Sugeno dapat diimplementasikan secara efektif pada perangkat *embedded system* yang memiliki keterbatasan sumber daya komputasi. Karakteristik tersebut sesuai dengan konsep yang dikemukakan Sugeno (1985), bahwa penggunaan konsekuen berbentuk konstanta (*singleton*) menghasilkan proses inferensi yang lebih sederhana dibandingkan metode Mamdani. Ross (2010) dan Jang et al. (1997) juga menjelaskan bahwa metode Sugeno memiliki kompleksitas komputasi yang lebih rendah sehingga lebih sesuai untuk aplikasi kendali dan monitoring secara *real-time*.

Pengujian sistem secara keseluruhan menunjukkan bahwa integrasi sensor, algoritma fuzzy, dan komunikasi IoT mampu menghasilkan sistem yang responsif. Rata-rata waktu respons sensor MQ-7 sebesar 5,68 detik dan *delay* komunikasi sebesar 0,96 detik menunjukkan bahwa informasi kondisi udara dapat diterima pengguna dalam waktu relatif singkat. Bagi sistem peringatan dini, waktu respons merupakan parameter penting karena berkaitan langsung dengan kecepatan pengguna dalam mengambil tindakan ketika terjadi peningkatan konsentrasi karbon monoksida. Menurut Lee dan Lee (2015), salah satu indikator keberhasilan implementasi IoT adalah kemampuan sistem menyampaikan informasi secara cepat, andal, dan berkelanjutan kepada pengguna.

Perbandingan tiga metode inferensi fuzzy menunjukkan bahwa Sugeno, Mamdani, dan Tsukamoto secara umum menghasilkan klasifikasi kondisi udara yang serupa, namun memiliki karakteristik keluaran yang berbeda. Metode Mamdani menghasilkan perubahan nilai keluaran yang lebih halus karena menggunakan proses agregasi himpunan fuzzy dan defuzzifikasi centroid, sedangkan metode Sugeno menghasilkan perubahan keluaran yang lebih tegas akibat penggunaan konsekuen berbentuk konstanta. Di sisi lain, metode Tsukamoto menghasilkan karakteristik keluaran yang berada di antara kedua metode tersebut karena menggunakan fungsi keanggotaan monoton pada setiap konsekuen. Perbedaan karakteristik ini sesuai dengan teori yang

dikemukakan Ross (2010) serta Jang et al. (1997), yang menjelaskan bahwa setiap metode inferensi fuzzy memiliki mekanisme defuzzifikasi yang berbeda sehingga menghasilkan sensitivitas keluaran yang tidak sama terhadap perubahan masukan.

◆ Meskipun ketiga metode menghasilkan tingkat klasifikasi yang hampir identik, metode Sugeno memberikan keunggulan pada implementasi sistem tertanam berbasis ESP32. Penggunaan konsekuen *singleton* menyebabkan proses perhitungan menjadi lebih sederhana sehingga waktu komputasi relatif lebih singkat dibandingkan metode Mamdani. Karakteristik tersebut penting pada aplikasi monitoring *real-time* yang memerlukan proses inferensi secara berulang dengan konsumsi sumber daya yang rendah. Temuan ini memperkuat berbagai penelitian sebelumnya yang menyebutkan bahwa metode Sugeno lebih sesuai diterapkan pada sistem kendali berbasis mikrokontroler dibandingkan metode Mamdani yang memerlukan proses defuzzifikasi centroid yang lebih kompleks (Ross, 2010; Jang et al., 1997).

Secara praktis, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan memiliki potensi untuk diterapkan sebagai sistem peringatan dini paparan karbon monoksida pada berbagai ruang tertutup, seperti kabin kendaraan, ruang parkir bawah tanah, laboratorium, gudang penyimpanan, maupun area industri. Integrasi metode Fuzzy Sugeno dengan teknologi IoT memungkinkan pengguna memperoleh informasi kondisi lingkungan secara cepat melalui perangkat bergerak, sehingga risiko paparan karbon monoksida dapat diminimalkan melalui tindakan preventif yang lebih dini. Namun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena pengujian dilakukan pada skala laboratorium dengan jumlah parameter lingkungan yang terbatas. Penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan penambahan sensor kualitas udara lain, seperti CO₂, NH₃, atau PM_{2.5}, serta melakukan pengujian jangka panjang pada lingkungan operasional yang lebih beragam untuk meningkatkan robustitas sistem.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor MQ-7, sensor DHT22, serta metode Fuzzy Inference System (FIS) Sugeno untuk mendeteksi konsentrasi gas karbon monoksida (CO) dan kelembaban udara pada ruang tertutup. Sistem mampu mengakuisisi data sensor, mengolah data menggunakan metode Fuzzy Sugeno, serta menyampaikan hasil klasifikasi kondisi udara secara *real-time* melalui aplikasi Blynk dan indikator lokal berupa LED serta buzzer.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja yang baik. Sensor DHT22 menghasilkan nilai Mean Absolute Error (MAE) sebesar 2,55 %RH, sedangkan implementasi algoritma Fuzzy Sugeno pada ESP32 menunjukkan kesesuaian yang sangat tinggi terhadap perhitungan manual dengan nilai MAE sebesar 0,0016. Selain itu, sistem mampu bekerja secara responsif dengan rata-rata *delay* komunikasi sebesar 0,96 detik, waktu respons sensor MQ-7 sebesar 5,68 detik, serta tingkat akurasi sistem mencapai 100%. Meskipun validasi sensor MQ-7 masih menunjukkan nilai MAE yang relatif lebih besar, hasil pengujian memperlihatkan bahwa sensor tetap mampu mengikuti perubahan konsentrasi gas karbon monoksida dan mendukung proses klasifikasi kondisi udara secara konsisten.

Perbandingan metode Sugeno, Mamdani, dan Tsukamoto menunjukkan bahwa ketiga metode mampu mengklasifikasikan kondisi udara dengan tingkat konsistensi yang tinggi. Namun demikian, metode Sugeno memberikan keunggulan dalam implementasi pada sistem berbasis mikrokontroler karena menghasilkan proses komputasi yang lebih sederhana dengan keputusan yang lebih tegas pada kondisi transisi. Temuan ini menunjukkan bahwa metode Fuzzy Sugeno merupakan pendekatan yang sesuai untuk diimplementasikan pada sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT yang memerlukan proses inferensi secara *real-time* dengan sumber daya komputasi yang terbatas.

Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada peningkatan akurasi sensor gas melalui proses kalibrasi menggunakan alat referensi yang memiliki tingkat presisi lebih tinggi dan sumber

paparan gas yang lebih terkontrol. Selain itu, sistem dapat dikembangkan dengan menambahkan parameter kualitas udara lain, seperti karbon dioksida (CO₂), partikulat halus (PM_{2.5}), maupun senyawa organik volatil (VOC), serta mengimplementasikan mekanisme notifikasi otomatis dan pengujian pada berbagai kondisi lingkungan agar performa sistem dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Adafruit. (2021). *DHT11, DHT22 and AM2302 sensors*. Adafruit Industries.
- Afifuddiin, M., Wijayanti, A., & Arifia, A. (2025). Implementing the Internet of Things in a web-based air pollution detection system using NodeMCU. *Saintekbu*, 17(1), 49–60. <https://doi.org/10.32764/saintekbu.v17i01.5612>
- Akbar, D. Y., & Kurnia, Y. A. (2024). Carbon monoxide monitoring system prototype based on Laravel. *JTECS: Jurnal Sistem Telekomunikasi Elektronika Sistem Kontrol Power Sistem dan Komputer*, 4(1), 13. <https://doi.org/10.32503/jtecs.v4i1.4751>
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- Aosong Electronics. (2015). *AM2302 (DHT22) digital-output relative humidity & temperature sensor*. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>
- Dirks, K. N., Talbot, N., Salmond, J. A., & Costello, S. B. (2018). In-cabin vehicle carbon monoxide concentrations under different ventilation settings. *Atmosphere*, 9(9), Article 338. <https://doi.org/10.3390/atmos9090338>
- Duggan, S. (2024). Carbon monoxide exposure inside UK road vehicles: A pilot study. *Environment International*, 194, 109070. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109070>
- Endra, R. Y., & Saputra, G. A. (2022). Implementasi Fuzzy Inference System (FIS) metode Tsukamoto untuk monitoring kualitas udara. *Jurnal Komputasi*, 10(1), 23–34. <https://doi.org/10.23960/komputasi.v10i1.2962>
- Espressif Systems. (2021). *ESP32 series datasheet*. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s2_datasheet_en.pdf
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Hanwei Electronics. (n.d.). *MQ-7 carbon monoxide gas sensor datasheet*. <https://www.pololu.com/product/1482>
- Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15(14), 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>
- Jang, J. S. R., Sun, C. T., & Mizutani, E. (1997). *Neuro-fuzzy and soft computing: A computational approach to learning and machine intelligence*. Prentice Hall.
- Kayacan, E., & Khanesar, M. A. (2016). Fundamentals of Type-1 fuzzy logic theory. In *Fuzzy neural networks for real time control applications* (pp. 13–24). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802687-8.00002-5>
- Kusumadewi, S., & Purnomo, H. (2010). *Aplikasi logika fuzzy untuk pendukung keputusan*. Graha Ilmu.
- Majidah, Z., Bianto, M. A., & Saputra, B. D. (2024). Implementasi fuzzy logic Mamdani untuk monitoring kualitas udara berbasis IoT. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Komunikasi (JUPTIK)*, 2(1), 1–6. <https://doi.org/10.52060/juption.v2i1.2091>

- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2)
- Ross, T. J. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Rizky, R., & Hakim, Z. (2020). Implementasi metode Fuzzy Sugeno untuk sistem pengukuran kualitas udara di Kota Pandeglang berbasis Internet of Things (IoT). *Syntax: Jurnal Informatika*, 9(1), 15–25. <https://doi.org/10.35706/syji.v9i1.3439>
- Syofian, S., Setiawan, A., Fathan, M., & Siregar, R. (2025). CO detection in high-mileage vehicle cabins and traffic density analysis using fuzzy logic. *JUITA: Jurnal Informatika*, 13(2), 229–234. <https://doi.org/10.30595/juita.v13i2.26854>
- Wei, D., Nielsen, F., Karlsson, H., Ekberg, L., & Dalenbäck, J. O. (2023). Vehicle cabin air quality: Influence of air recirculation on energy use, particles, and CO₂. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 43387–43402. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25219-x>
- Zain, N. M., Amir, M., Mohd, R., & Paidi, Z. (2024). The development of an IoT-based air quality monitoring system using the Blynk application. *Journal of Computing Research and Innovation*, 9(1). <https://doi.org/10.24191/jcrinn.v9i1.426>