

Implementasi Sistem Monitoring Gas Fumigasi Berbasis Internet of Things Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani pada PT Boston Indo Global

Nasrul Khoiri¹, Ajar Rohmanu², Rudian Subagio Gurutno³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Panca Sakti
Bekasi, Bekasi, Indonesia

*Correspondence: nasrulkhoiri124@gmail.com, ajarrohmanu@gmail.com, rudian2011@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan Sistem Monitoring Gas Fumigasi berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan metode Fuzzy Mamdani pada PT Boston Indo Global. Permasalahan utama berawal dari proses pemantauan konsentrasi gas fumigasi yang masih dilakukan secara manual menggunakan alat deteksi portabel, sehingga belum dapat dipantau secara real-time dan jarak jauh, serta belum tersedia klasifikasi otomatis tingkat bahaya gas. Penelitian menggunakan pendekatan penelitian dan pengembangan (R&D) dengan kombinasi teknik kualitatif dan kuantitatif, meliputi observasi, wawancara, dan studi dokumentasi. Sistem dikembangkan melalui tahapan penelitian pendahuluan, analisis kebutuhan, rancangan model, serta validasi, evaluasi, dan revisi, dengan memadukan mikrokontroler ESP32, sensor gas MQ-6, sensor BME280, layar TFT LCD, indikator LED dan buzzer, serta website monitoring berbasis Node.js, Vite, TypeScript, dan basis data PostgreSQL. Metode Fuzzy Mamdani diterapkan melalui tahap fuzzifikasi, pembentukan rule base, inferensi, dan defuzzifikasi rata-rata terbobot untuk mengklasifikasikan kondisi gas ke dalam tiga kategori, yaitu Aman, Perlu Penambahan Gas, dan Bahaya. Hasil validasi kelompok ahli memperoleh rata-rata skor 4,45 dan penilaian kelompok pengguna potensial memperoleh rata-rata skor 4,51, keduanya berada pada kategori Sangat Baik. Pengujian Black Box terhadap dua belas skenario menunjukkan seluruh skenario berstatus Valid dengan tingkat keberhasilan 100%. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem layak digunakan dan mampu meningkatkan efektivitas pemantauan serta keselamatan kerja pada kegiatan fumigasi. Penelitian ini masih terbatas pada satu lokasi penelitian dan belum mencakup jenis gas fumigasi lain di luar gas fosfin.

Kata Kunci: Internet of Things; Fuzzy Mamdani; Monitoring Gas Fumigasi; ESP32; Black Box Testing; Keselamatan Kerja

ABSTRACT

This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based fumigation gas monitoring system using the Mamdani Fuzzy method at PT Boston Indo Global. The primary issue stems from the fact that fumigation gas concentration monitoring is currently performed manually using portable detection devices; consequently, real-time and remote monitoring are unavailable, and there is no automated classification of gas hazard levels. The study employs a Research and Development (R&D) approach combining qualitative and quantitative techniques, including observation, interviews, and document analysis. The system was developed through stages comprising preliminary research, requirements analysis, model design, and validation, evaluation, and revision. It integrates an ESP32 microcontroller, MQ-6 gas sensor, BME280 sensor, TFT LCD screen, LED indicators, and a buzzer, alongside a monitoring website built using Node.js, Vite, TypeScript, and a PostgreSQL database. The Mamdani Fuzzy method is applied through fuzzification, rule base formation, inference, and weighted average defuzzification to classify gas conditions into three categories: Safe, Gas Addition Required, and Hazardous. Validation by an expert group yielded an average score of 4.45, while potential users gave an average score of 4.51; both ratings fall into the "Very Good" category. Black Box testing across twelve scenarios confirmed that all scenarios were valid, achieving a 100% success rate. These findings indicate that the system is suitable for use and capable of enhancing monitoring effectiveness and workplace safety during fumigation activities. This study is limited to a single research location and does not cover fumigation gases other than phosphine.

Keywords: Internet of Things; Mamdani Fuzzy; Fumigation Gas Monitoring; ESP32; Black Box Testing; Workplace Safety

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi yang pesat telah membawa perubahan signifikan di berbagai sektor, termasuk jasa pengendalian hama melalui fumigasi. Fumigasi merupakan metode pengendalian hama menggunakan gas kimia, seperti gas fosfin (PH₃) dan metil bromida, yang memiliki tingkat toksisitas tinggi dan berpotensi membahayakan kesehatan manusia apabila terpapar dalam konsentrasi tertentu. Internet of Things (IoT) menjadi salah satu teknologi yang banyak dimanfaatkan untuk mendukung proses monitoring, pengumpulan data, dan pengendalian secara otomatis serta real-time pada aktivitas yang menuntut tingkat keamanan tinggi seperti fumigasi.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan efektivitas penerapan IoT dan metode Fuzzy Mamdani dalam sistem monitoring gas. Al-Talib dkk. (2024) menjelaskan bahwa sistem monitoring gas berbasis IoT mampu memantau kondisi lingkungan secara real-time serta meningkatkan efektivitas pengawasan gas berbahaya, sedangkan Scorpionius dan Yakub (2024) menunjukkan bahwa metode Fuzzy Mamdani efektif digunakan untuk mengolah data sensor menjadi keputusan otomatis. Penelitian sejenis lainnya, seperti Arif dan Astutik (2024) serta Wicaksana dan Hirzan (2024), menerapkan logika fuzzy pada sistem pendeteksi kebocoran gas LPG berbasis IoT, sedangkan Ilfa dkk. (2025) mengombinasikan metode threshold dan fuzzy logic untuk deteksi dini gangguan pada objek pemantauan lain. Namun demikian, penelitian-penelitian tersebut umumnya masih menggunakan ambang batas (threshold) yang bersifat tetap dan belum diterapkan secara khusus pada konteks pemantauan gas fumigasi yang membutuhkan penyesuaian ambang batas terhadap dosis gas awal dan durasi setiap sesi fumigasi.

Hasil observasi awal di PT Boston Indo Global, perusahaan jasa fumigasi dan pengendalian hama yang berlokasi di Bekasi, menunjukkan bahwa proses pemantauan gas fumigasi di gudang penyimpanan maupun area kontainer masih dilakukan secara manual menggunakan alat deteksi portabel. Kondisi tersebut menyebabkan pemantauan belum dapat dilakukan secara real-time dan jarak jauh, serta mengharuskan petugas melakukan pengecekan langsung di area kerja yang berisiko terpapar gas berbahaya. Permasalahan lain adalah belum adanya sistem klasifikasi otomatis tingkat bahaya gas, sehingga pengambilan keputusan masih bergantung pada pengamatan manual petugas di lapangan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan Sistem Monitoring Gas Fumigasi Berbasis Internet of Things Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani, dengan tujuan: (1) merancang dan mengembangkan sistem monitoring gas fumigasi berbasis IoT menggunakan sensor gas dan mikrokontroler ESP32 yang mampu memantau konsentrasi gas secara otomatis dan real-time; (2) menerapkan metode Fuzzy Mamdani untuk menentukan tingkat bahaya gas fumigasi berdasarkan data sensor; dan (3) menghasilkan website monitoring yang menampilkan informasi konsentrasi gas, status tingkat bahaya, dan riwayat pengukuran secara real-time untuk mendukung pengawasan dan pengambilan keputusan.

METODE

2.1. Desain dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian dan pengembangan (Research and Development) yang berorientasi pada produk berupa sistem monitoring gas fumigasi berbasis IoT, dengan kombinasi pendekatan kualitatif dan kuantitatif sebagaimana dijelaskan oleh Sugiyono (2021). Pendekatan kualitatif digunakan untuk memperoleh informasi mengenai kondisi monitoring gas fumigasi yang berjalan saat ini dan kebutuhan pengguna, sedangkan pendekatan kuantitatif digunakan untuk menganalisis data hasil pembacaan sensor, pengujian sistem, dan hasil klasifikasi Fuzzy Mamdani. Proses penelitian meliputi tahap penelitian pendahuluan, analisis kebutuhan, rancangan model, serta validasi, evaluasi, dan revisi hingga diperoleh model yang sesuai dengan kebutuhan pengguna.

2.2. Tempat, Waktu, dan Sasaran Penelitian

Penelitian dilaksanakan di lingkungan kerja PT Boston Indo Global, Bekasi, yang bergerak di bidang jasa fumigasi dan pengendalian hama, mencakup pula area lapangan tempat kegiatan fumigasi berlangsung, seperti gudang penyimpanan dan area kontainer di Pelabuhan Tanjung Priok. Penelitian berlangsung selama enam bulan, dimulai dari observasi dan studi pendahuluan hingga penyusunan laporan akhir. Sasaran penelitian dipilih menggunakan teknik purposive sampling (Lenaini, 2021) dan meliputi petugas fumigasi, supervisor atau penanggung jawab operasional, teknisi/operator sistem, pihak manajemen perusahaan, dua orang pakar di bidang IoT dan keselamatan kerja (K3),

serta enam pengguna potensial yang terdiri atas petugas fumigasi dan supervisor sebagai penilai sistem.

2.3. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui empat teknik yang saling melengkapi. Observasi dilakukan secara langsung terhadap proses fumigasi dan kegiatan monitoring gas yang berjalan di lokasi penelitian. Wawancara dilakukan kepada petugas fumigasi, supervisor, dan teknisi/operator untuk memperoleh kebutuhan pengguna. Studi dokumentasi dilakukan terhadap Standar Operasional Prosedur (SOP) fumigasi dan laporan hasil pengukuran gas perusahaan, sedangkan studi pustaka dilakukan terhadap buku, jurnal ilmiah, dan referensi terkait IoT, ESP32, sensor gas MQ-6, website monitoring, dan metode Fuzzy Mamdani.

2.4. Tahapan Pengembangan Sistem

Pengembangan model mengacu pada tahapan penelitian dan pengembangan (Sugiyono, 2021), yaitu penelitian pendahuluan, analisis kebutuhan, rancangan model, serta validasi, evaluasi, dan revisi. Pada tahap penelitian pendahuluan ditemukan kesenjangan antara kondisi ideal, yaitu pemantauan gas yang seharusnya real-time, akurat, dan berkelanjutan, dengan kenyataan di lapangan berupa pemantauan manual menggunakan alat ukur portabel yang berisiko menimbulkan keterlambatan informasi dan paparan gas bagi petugas. Analisis kebutuhan menghasilkan tujuh kebutuhan fungsional, di antaranya pembacaan data sensor gas MQ-6 dan sensor lingkungan BME280 secara real-time, pengolahan data menggunakan metode Fuzzy Mamdani untuk menentukan status Aman, Perlu Penambahan Gas, atau Bahaya, penyajian hasil pada layar TFT LCD, pengiriman data ke server melalui jaringan Wi-Fi, penyimpanan data monitoring, penyajian data pada website secara real-time kepada supervisor, serta pencatatan data sesi fumigasi. Kebutuhan nonfungsional mencakup aspek kinerja, keandalan, kemudahan penggunaan, dan akurasi klasifikasi.

Rancangan model dituangkan menggunakan Unified Modeling Language (UML), yaitu Use Case Diagram, Activity Diagram, Class Diagram, dan Sequence Diagram (Nugraha & Kurniawan, 2022), dengan dua aktor utama, yaitu Petugas Fumigasi yang mengisi data sesi fumigasi dan memantau kondisi gas, serta Supervisor yang memantau kondisi gas, dashboard, dan laporan hasil monitoring secara real-time. Alur sistem dimulai dari pengisian data sesi fumigasi, pembacaan sensor MQ-6 dan BME280 oleh ESP32, pengolahan data menggunakan metode Fuzzy Mamdani, penyajian hasil pada layar TFT LCD serta indikator LED dan buzzer, hingga pengiriman data melalui jaringan Wi-Fi menuju server dan penyajiannya pada website monitoring secara real-time.

2.5. Perancangan dan Teknologi Sistem

Sistem dirancang dengan arsitektur client-server berbasis IoT, terdiri atas perangkat input berupa sensor gas MQ-6 dan sensor lingkungan BME280, modul Real Time Clock DS3231 sebagai penanda waktu pembacaan, mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali dan media komunikasi data melalui jaringan Wi-Fi, perangkat output berupa layar TFT LCD, indikator LED (hijau, kuning, merah), dan buzzer, serta server, basis data, dan website monitoring (Sudarmawan, Sasmito, & Primaswara, 2021). Firmware mikrokontroler dikembangkan menggunakan bahasa C/C++ pada Arduino IDE/PlatformIO, sedangkan website monitoring dibangun menggunakan Node.js, Vite, dan TypeScript pada sisi backend, HTML5, CSS3, TypeScript, dan Bootstrap 5 pada sisi frontend, dengan basis data relasional PostgreSQL dan komunikasi data menggunakan protokol HTTP REST API, sejalan dengan praktik arsitektur IoT berbasis web dan aplikasi yang diterapkan pada penelitian sejenis (Setiaji, Sumarahinsih, & Subairi, 2022).

2.6. Teknik Validasi dan Pengujian

Kelayakan model dievaluasi secara teoritik, yaitu kesesuaian dengan prinsip Research and Development, arsitektur IoT, rekayasa perangkat lunak, manajemen basis data, dan standar

keselamatan dan kesehatan kerja (K3), serta secara empiris melalui kuesioner berskala Likert 1–5 yang diisi oleh kelompok ahli dan kelompok pengguna potensial. Kategori penilaian ditentukan dengan interval $(5 - 1) \div 5 = 0,80$, sehingga rata-rata 4,21–5,00 dikategorikan Sangat Baik. Pengujian fungsional menggunakan Black Box Testing yang mengacu pada praktik penyusunan skenario pengujian berbasis tampilan dan fungsi aplikasi (Jurnal Comasie, 2021), diterapkan terhadap dua belas skenario yang mencakup pembacaan sensor, koneksi Wi-Fi, klasifikasi Fuzzy Mamdani, tampilan perangkat, serta pengelolaan data pada website monitoring.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Analisis Kebutuhan dan Perancangan

Hasil analisis kebutuhan menegaskan bahwa pemantauan gas fumigasi di PT Boston Indo Global masih dilakukan secara manual, belum real-time, dan belum memiliki klasifikasi otomatis tingkat bahaya gas. Berdasarkan kebutuhan tersebut ditetapkan tujuh kebutuhan fungsional dan empat aspek kebutuhan nonfungsional (kinerja, keandalan, kemudahan penggunaan, dan akurasi) sebagai dasar perancangan sistem. Sistem melibatkan dua aktor dengan hak akses yang berbeda sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hak Akses Aktor pada Sistem

Fungsi	Petugas Fumigasi	Supervisor
Mengisi data sesi fumigasi	Ya	-
Melihat konsentrasi gas real-time	Ya	Ya
Melihat status tingkat bahaya gas	Ya	Ya
Melihat dashboard monitoring	-	Ya
Melihat riwayat monitoring	Ya	Ya
Melihat laporan hasil monitoring	-	Ya
Menerima indikator/notifikasi kondisi gas	Ya	-

Sumber: Data diolah peneliti, 2026

3.2. Hasil Implementasi Sistem

Implementasi menghasilkan dua modul yang terintegrasi, yaitu perangkat IoT dan website monitoring. Pada sisi perangkat keras, ESP32 membaca konsentrasi gas dari sensor MQ-6 serta suhu, kelembapan, dan tekanan udara dari sensor BME280, kemudian menampilkan hasilnya pada layar TFT LCD beserta status hasil klasifikasi Fuzzy Mamdani, indikator LED hijau/kuning/merah, dan buzzer sebagai peringatan pada kategori Bahaya. Data yang sama dikirim melalui jaringan Wi-Fi menuju server dan disimpan ke basis data PostgreSQL. Pada sisi website, dashboard menampilkan tanggal dan waktu, data sensor BME280, konsentrasi gas MQ-6, durasi fumigasi, dan status dosis fumigasi, dilengkapi status koneksi perangkat, serta modul input sesi fumigasi, riwayat sesi, dan laporan yang dapat diunduh.

3.3. Implementasi dan Pengujian Metode Fuzzy Mamdani

Metode Fuzzy Mamdani diterapkan menggunakan ambang batas yang bersifat dinamis, mengikuti dosis gas awal yang dipilih saat sesi fumigasi dimulai serta checkpoint durasi sejak distribusi gas dianggap selesai. Ambang batas berupa tiga titik, yaitu B (batas bawah), A (standar), dan C (batas atas), sebagaimana dicontohkan pada Tabel 2 untuk dosis 16 g/m³. Nilai konsentrasi gas (x) kemudian difuzzifikasi ke tiga himpunan Rendah, Sedang, dan Tinggi menggunakan fungsi keanggotaan berbasis B, A, dan C.

Tabel 2. Ambang Batas Fuzzy untuk Dosis 16 g/m³

Checkpoint Durasi (menit)	B (batas bawah)	A (standar)	C (batas atas)
2	7,1	9,6	12,1
4	5,5	8,0	10,5
12	3,1	5,6	8,1
24	2,3	4,8	7,3
48	1,5	4,0	6,5

Sumber: Data Hasil Peneliti, 2026

Basis aturan (rule base) yang diterapkan terdiri atas tiga aturan sederhana yang memetakan setiap himpunan fuzzy ke kategori output, sebagaimana disajikan pada Tabel 3. Setiap kategori output diwakili nilai singleton (Perlu Penambahan Gas = 20, Aman = 50, Bahaya = 80), dan skor akhir (z) dihitung melalui defuzzifikasi rata-rata terbobot: $z = (\mu_{\text{Rendah}} \times 20 + \mu_{\text{Sedang}} \times 50 + \mu_{\text{Tinggi}} \times 80) \div (\mu_{\text{Rendah}} + \mu_{\text{Sedang}} + \mu_{\text{Tinggi}})$. Skor z dipetakan menjadi status akhir dengan aturan $z \geq 65 \rightarrow$ Bahaya, $z \leq 35 \rightarrow$ Perlu Penambahan Gas, dan $35 < z < 65 \rightarrow$ Aman.

Tabel 3. Rule Base Fuzzy Mamdani

Aturan	Kondisi	Kategori Output
R1	IF Konsentrasi Gas RENDAH	Perlu Penambahan Gas
R2	IF Konsentrasi Gas SEDANG	Aman
R3	IF Konsentrasi Gas TINGGI	Bahaya

Sumber: Data Hasil Peneliti, 2026

Verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil sistem terhadap perhitungan manual pada data uji coba fumigasi Sesi #1 (dosis 16 g/m³, durasi target 12 menit, lokasi PT Boston Indo Global). Pada pembacaan sensor $x = 9,60$ g/m³ dengan $B = 7,10$, $A = 9,60$, dan $C = 12,10$, diperoleh $\mu_{\text{Rendah}} = 0$, $\mu_{\text{Sedang}} = 1,00$, dan $\mu_{\text{Tinggi}} = 0$, sehingga $z = (0 \times 20 + 1,00 \times 50 + 0 \times 80) \div 1,00 = 50,0$ dan status ditetapkan Aman. Hasil perhitungan manual ini sama persis dengan skor dan status yang tercatat sistem, sehingga mengonfirmasi bahwa rule base dan formula rata-rata terbobot pada firmware telah bekerja sesuai rancangan. Secara keseluruhan, pengujian Sesi #1 menghasilkan rentang nilai sensor antara 5,80–14,90 g/m³ (rata-rata 10,23 g/m³) dengan pola kenaikan skor fuzzy yang searah dengan kenaikan konsentrasi gas dan pengelompokan tiga kategori keluaran yang konsisten tanpa tumpang tindih.

3.4. Hasil Validasi Ahli dan Pengguna

Validasi oleh dua pakar di bidang IoT dan keselamatan kerja (K3) menghasilkan rata-rata total 4,45 dengan kategori Sangat Baik, dengan nilai tertinggi pada aspek kelengkapan fungsi website monitoring (4,58), sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Validasi Kelompok Ahli

Aspek Penilaian	Rata-rata	Kategori
Ketepatan klasifikasi tingkat bahaya gas	4,47	Sangat Baik
Kelengkapan fungsi website monitoring	4,58	Sangat Baik

Aspek Penilaian	Rata-rata	Kategori
Kinerja koneksi perangkat IoT	4,33	Sangat Baik
Keamanan data monitoring	4,40	Sangat Baik
Rata-rata Total	4,45	Sangat Baik

Sumber: Data Hasil Peneliti, 2026

Penilaian oleh enam pengguna potensial (tiga petugas fumigasi dan tiga supervisor) menghasilkan rata-rata total 4,51 dengan kategori Sangat Baik, dengan aspek tertinggi pada keandalan sistem dan kepuasan pengguna (4,60), sebagaimana disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Penilaian Kelompok Pengguna Potensial

Aspek Penilaian	Rata-rata	Kategori
Kemudahan menggunakan website monitoring	4,44	Sangat Baik
Kejelasan tampilan dashboard dan TFT LCD	4,48	Sangat Baik
Manfaat sistem bagi keselamatan kerja	4,44	Sangat Baik
Kepuasan pengguna secara umum	4,60	Sangat Baik
Rata-rata Total	4,51	Sangat Baik

Sumber: Data Hasil Peneliti, 2026

Berdasarkan hasil penilaian kedua kelompok, sistem monitoring gas fumigasi dinyatakan layak secara empiris, baik dari sudut pandang ahli teknis maupun pengguna potensial di lapangan.

3.5. Hasil Pengujian Black Box

Pengujian dilakukan terhadap dua belas skenario yang mencakup pembacaan sensor gas dan lingkungan, koneksi Wi-Fi, klasifikasi Fuzzy Mamdani pada tiga kategori status, tampilan TFT LCD, serta pengelolaan data sesi, penyimpanan, dashboard, riwayat, laporan, dan pencarian data pada website monitoring. Hasil pengujian dirangkum pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi Pengujian Black Box

Modul yang Diuji	Kasus Uji	Valid	Tidak Valid
Akuisisi sensor gas dan lingkungan (MQ-6, BME280)	2	2	0
Koneksi Wi-Fi dan tampilan TFT LCD	2	2	0
Klasifikasi Fuzzy Mamdani (Aman, Waspada, Bahaya)	3	3	0
Input sesi fumigasi dan penyimpanan data	2	2	0
Dashboard, riwayat, laporan, dan pencarian data	3	3	0
Total	12	12	0

Sumber: Data Hasil Peneliti, 2026

Rekapitulasi pengujian menunjukkan bahwa seluruh dua belas skenario berstatus Valid, sehingga diperoleh tingkat keberhasilan pengujian sebesar 100%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh fungsi sistem, mulai dari akuisisi data sensor, klasifikasi tingkat bahaya menggunakan metode Fuzzy Mamdani, hingga penyajian informasi pada perangkat dan website monitoring, telah berjalan sesuai dengan kebutuhan fungsional dan rancangan sistem.

3.6. Pembahasan

Penerapan metode Fuzzy Mamdani dengan ambang batas dinamis pada penelitian ini memberikan pendekatan yang berbeda dibandingkan penelitian terdahulu yang umumnya menggunakan satu domain ambang batas tetap. Arif dan Astutik (2024) serta Wicaksana dan Hirzan (2024) menerapkan logika fuzzy pada sistem pendeteksi kebocoran gas LPG dengan ambang batas yang relatif tetap, sedangkan Ilfa dkk. (2025) mengombinasikan metode threshold dan fuzzy logic untuk deteksi dini gangguan pada objek pemantauan lain. Pada penelitian ini, ambang batas B, A, dan C disesuaikan secara dinamis terhadap dosis gas awal dan checkpoint durasi setiap sesi fumigasi, sehingga transisi status Aman, Perlu Penambahan Gas, dan Bahaya lebih relevan dengan karakteristik proses fumigasi yang berubah seiring waktu distribusi gas, sejalan dengan temuan Al-Talib dkk. (2024) dan Scorpionius dan Yakub (2024) bahwa integrasi IoT dan Fuzzy Mamdani meningkatkan efektivitas monitoring dan keselamatan kerja.

Dari sisi operasional, integrasi tiga jalur keluaran (layar TFT LCD, indikator LED dan buzzer, serta website monitoring) memberikan informasi status bahaya secara langsung kepada petugas di lapangan tanpa harus mengakses website terlebih dahulu, sekaligus menyediakan pemantauan jarak jauh bagi supervisor. Hal ini mengurangi ketergantungan pada pengecekan manual menggunakan alat deteksi portabel yang sebelumnya berisiko meningkatkan paparan gas terhadap petugas. Nilai validasi ahli (4,45) dan penilaian pengguna potensial (4,51) yang sama-sama berada pada kategori Sangat Baik, disertai Pass Rate pengujian Black Box sebesar 100%, menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan telah memenuhi kebutuhan fungsional dan diterima dengan baik oleh calon pengguna di lingkungan PT Boston Indo Global.

3.7. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Implementasi dan pengujian dilakukan pada satu lokasi penelitian, yaitu PT Boston Indo Global, dengan jumlah validator ahli dan pengguna potensial yang relatif terbatas (dua pakar dan enam pengguna). Ambang batas fuzzy yang diterapkan dikalibrasi khusus untuk gas fosfin berdasarkan tabel referensi dosis dan durasi fumigasi, sehingga belum tentu dapat langsung diterapkan pada jenis gas fumigasi lain seperti metil bromida. Pengujian fungsional menggunakan Black Box Testing berfokus pada kesesuaian masukan dan keluaran fungsi tanpa memeriksa struktur kode program, dan hasil uji coba lapangan baru mencakup satu sesi fumigasi sebagai ilustrasi kinerja sistem.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan Sistem Monitoring Gas Fumigasi Berbasis Internet of Things menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor gas MQ-6, dan sensor BME280 sebagai unit akuisisi data lingkungan fumigasi secara real-time, yang disajikan melalui layar TFT LCD di lokasi fumigasi dan website monitoring yang dapat diakses dari jarak jauh oleh supervisor. Metode Fuzzy Mamdani berhasil diterapkan dengan ambang batas dinamis mengikuti dosis gas awal dan checkpoint durasi fumigasi untuk mengklasifikasikan kondisi gas ke dalam tiga kategori, yaitu Aman, Perlu Penambahan Gas, dan Bahaya, melalui tahapan fuzzifikasi, rule base, inferensi, dan defuzzifikasi rata-rata terbobot.

Validasi kelompok ahli (rata-rata 4,45) dan penilaian kelompok pengguna potensial (rata-rata 4,51) berada pada kategori Sangat Baik, sedangkan pengujian Black Box terhadap dua belas skenario menghasilkan tingkat keberhasilan 100%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem layak digunakan

dan mampu mengatasi permasalahan pemantauan gas fumigasi yang sebelumnya dilakukan secara manual serta belum memiliki klasifikasi otomatis tingkat bahaya gas. Penelitian lanjutan disarankan menambahkan fitur notifikasi otomatis melalui WhatsApp atau Telegram kepada supervisor pada kategori Bahaya, penambahan jenis sensor gas lain seperti metil bromida, pengembangan antarmuka aplikasi seluler, serta penerapan metode kecerdasan buatan lanjutan untuk meningkatkan akurasi klasifikasi tingkat bahaya gas. Secara operasional, PT Boston Indo Global disarankan menerapkan sistem ini secara penuh pada seluruh kegiatan fumigasi disertai kalibrasi berkala terhadap sensor MQ-6 dan BME280 serta pencadangan data monitoring secara rutin.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Talib, dkk. (2024). Sistem monitoring gas berbasis Internet of Things untuk pengawasan lingkungan secara real-time.
- Arif, M. Z., & Astutik, R. P. (2024). Sistem pendeteksi kebocoran gas pada LPG dan suhu ruangan berbasis protokol MQTT menggunakan metode fuzzy logic. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, 6(2), 109–120.
- Dwipangga, A. A. K., Abdillah, M., Apriansyah, M. F., & Saputra, R. A. (2024). Implementasi logika fuzzy Mamdani untuk monitoring kualitas udara dalam ruangan. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 8(3), 3967–3974. <https://doi.org/10.36040/jati.v8i3.9851>
- Ilfa, dkk. (2025). Sistem deteksi dini gangguan PLTMH berbasis IoT dengan metode threshold dan fuzzy logic. *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, 13(3S1).
- Jurnal Comasie. (2021). Perancangan aplikasi menggunakan pemodelan UML dan Star UML. *Jurnal Comasie*, 4(6).
- Lenaini, I. (2021). Teknik pengambilan sampel purposive dan snowball sampling. *Historis: Jurnal Kajian, Penelitian dan Pengembangan Pendidikan Sejarah*, 6(1).
- Nugraha, D. W., & Kurniawan, R. D. (2022). Unified Modelling Language (UML) untuk perancangan sistem informasi. *Jurnal Sistem Informasi (J-SIKA)*, 4(1), 12–18.
- Scorpionius, & Yakub. (2024). Penerapan metode fuzzy Mamdani dalam pengolahan data sensor gas menjadi keputusan otomatis.
- Setiaji, A., Sumarahinsih, A., & Subairi, S. (2022). Purwarupa robot pipe following pendeteksi kebocoran gas Internet of Things berbasis web dan aplikasi Android. *JASIEK (Jurnal Aplikasi Sains, Informasi, Elektronika dan Komputer)*, 4(1), 29–40.
- Sudarmawan, P. A., Sasmito, A. P., & Primaswara, R. (2021). Penerapan logika fuzzy pada sistem monitoring dan kontrol kandang ayam otomatis berbasis IoT. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 5(1), 315–320. <https://doi.org/10.36040/jati.v5i1.3265>
- Sugiyono. (2021). Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D. Bandung: Alfabeta.
- Wicaksana, & Hirzan. (2024). Pemantauan kebocoran gas dan panas udara dengan metode fuzzy berbasis IoT.