

ANALISIS PERFORMA PROTOKOL MQTT PADA SISTEM MONITORING GAS BERBAHAYA MENGGUNAKAN SENSOR MQ135 TERINTEGRASI ANDROID

Nindayu Indrasari¹, Ardianto Syaifur Rohman², Tunjung Genarsih^{3*}, Sihmaulana Dwianto⁴, Angga Dwinanda⁵, Salsabila Liandra Putri⁶, Qanita⁷

¹SMA Negeri 01 Jember

^{2,3,4,5,6}Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Politeknik Negeri Jember

⁷Program Studi Teknik Energi Terbarukan, Politeknik Negeri Jember

Email: nindayuindrasari774@gmail.com, ardianto.sr@polije.ac.id, tunjung.genarsih@polije.ac.id*, sihmaulana@polije.ac.id, angga.dwinanda@polije.ac.id, salsabila.liandra@polije.ac.id, qanita@polije.ac.id

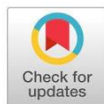
Info Artikel

Histori Artikel:

Diterima Apr 22, 2026

Direvisi Apr 26, 2026

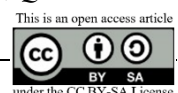
Disetujui Apr 30, 2026



ABSTRACT

This study analyzes the performance of the Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol in a hazardous gas monitoring system using an MQ135 sensor and an ESP8266 NodeMCU microcontroller, integrated with a Flutter-based Android application. The monitored gases include CO, NO₂, CO₂, and SO₂, based on the threshold limits set by Permenaker No. 5 of 2018. The objective of this study is to evaluate MQTT Quality of Service (QoS) parameters, including delay, jitter, packet loss, and throughput, across three QoS levels (0, 1, and 2). Sensor validation was conducted using the Repeatability Test and Threshold Detection Test. The results show that the sensor demonstrates good reliability with CV values ranging from 1.92% to 3.78% and an average detection success rate of 98.9%. MQTT testing indicates that QoS 0 achieves the lowest delay (42.3 ms), jitter (3.12 ms), and zero packet loss, and the highest throughput (18.6 kbps). Additionally, the system provides real-time notification with an average response time below 500 ms. However, QoS 1 is identified as the optimal configuration, balancing delivery reliability and network efficiency for real-time laboratory safety monitoring systems.

Keywords: MQTT; MQ135; ESP8266; Android; Gas Monitoring; IoT; QoS



ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis performa protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) pada sistem monitoring gas berbahaya berbasis sensor MQ135 dan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 yang terintegrasi dengan aplikasi Android berbasis Flutter. Parameter gas yang dipantau meliputi CO, NO₂, CO₂, dan SO₂ sesuai ambang batas Permenaker No. 5 Tahun 2018. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi Quality of Service (QoS) MQTT (delay, jitter, packet loss, dan throughput) pada tiga level QoS (0, 1, dan 2). Validasi sensor dilakukan melalui Repeatability Test dan Threshold Detection Test. Hasil menunjukkan sensor memiliki reliabilitas baik dengan CV 1,92%–3,78% dan tingkat keberhasilan deteksi 98,9%. Pengujian MQTT menunjukkan QoS 0 menghasilkan delay terendah (42,3 ms), jitter 3,12 ms, tanpa packet loss, dan throughput tertinggi 18,6 kbps. Selain itu, sistem mampu memberikan respons notifikasi secara real-time dengan waktu rata-rata di bawah 500 ms. Namun, QoS 1 dipilih sebagai konfigurasi optimal karena memberikan keseimbangan antara keandalan pengiriman dan efisiensi jaringan untuk sistem monitoring real-time di laboratorium sekolah.

Kata Kunci: MQTT; MQ135; ESP8266; Android; Monitoring Gas; IoT; QoS

Penulis Korespondensi:

Tunjung Genarsih,

Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Jurusan Teknik

Politeknik Negeri Jember,

Jl Mastrap 164 Jember,

tunjung.genarsih@polije.ac.id



1. PENDAHULUAN

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di lingkungan laboratorium sekolah merupakan isu yang semakin mendapat perhatian serius dalam dunia pendidikan [1]. Laboratorium kimia dan fisika di sekolah menengah atas maupun kejuruan berpotensi menghasilkan berbagai gas berbahaya selama kegiatan praktikum, antara lain Karbon Monoksida (CO) dari pembakaran tidak sempurna, Nitrogen Dioksida (NO₂) dari reaksi asam nitrat, Karbon Dioksida (CO₂) dari reaksi fermentasi dan pembakaran, serta Sulfur Dioksida (SO₂) dari reaksi senyawa belerang. Paparan keempat gas tersebut di atas Nilai Ambang Batas (NAB) yang ditetapkan berdasarkan Peraturan Menteri Ketenagakerjaan RI Nomor 5 Tahun 2018, yakni CO sebesar 25 ppm, NO₂ sebesar 3 ppm, CO₂ sebesar 800 ppm, dan SO₂ sebesar 10 ppm, dapat menimbulkan gangguan kesehatan serius mulai dari iritasi saluran pernapasan hingga keracunan akut yang mengancam jiwa [2].

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) telah membuka peluang besar dalam pengembangan sistem monitoring lingkungan secara *real-time* dengan biaya yang terjangkau. IoT sebagai paradigma komputasi memungkinkan objek fisik dilengkapi sensor, perangkat lunak, dan konektivitas jaringan untuk mengumpulkan serta bertukar data secara mandiri [3]. Dalam konteks sistem keselamatan, IoT memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara berkelanjutan dan pengiriman notifikasi peringatan secara otomatis [4]. Penelitian [5] menyatakan bahwa ekosistem IoT mencakup berbagai protokol komunikasi seperti MQTT, CoAP, dan XMPP yang masing-masing memiliki karakteristik berbeda dalam hal efisiensi sumber daya, keandalan pengiriman data, dan keamanan komunikasi. Di antara protokol-protokol tersebut, MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) menjadi yang paling banyak diadopsi. Menurut survei Eclipse Foundation tahun 2024, tingkat penggunaan MQTT mencapai 56% meningkat 7% dari tahun sebelumnya serta membutuhkan hingga 80% lebih sedikit *bandwidth* jaringan dibandingkan protokol HTTP untuk volume data yang sama [6].

MQTT beroperasi melalui model *broker-client* di mana sebuah MQTT *broker* berperan sebagai penghubung dan pengatur transmisi data antara *publisher* (perangkat sensor) dan *subscriber* (aplikasi penerima) [7]. Protokol ini mendukung tiga level *Quality of Service* (QoS): QoS 0 (*at most once/fire-and-forget*), QoS 1 (*at least once* dengan *acknowledgment* PUBACK), dan QoS 2 (*exactly once* dengan mekanisme *handshake* empat

langkah). Pemilihan level QoS berimplikasi langsung pada performa sistem, khususnya dalam aspek *delay*, *jitter*, *packet loss*, dan *throughput*. Dalam sistem keselamatan berbasis IoT, kualitas komunikasi data merupakan faktor kritis yang menentukan apakah notifikasi darurat dapat diterima pengguna tepat waktu. Keterlambatan pengiriman pesan, meskipun hanya beberapa ratus milidetik, dapat berdampak nyata pada keselamatan pengguna laboratorium.

Untuk deteksi gas berbahaya pada sistem berbasis IoT berbiaya rendah, sensor MQ135 merupakan pilihan yang umum digunakan [8], [9]. Sensor gas semikonduktor ini mampu mendeteksi berbagai jenis gas berbahaya termasuk CO, NO₂, CO₂, dan SO₂ dengan rentang deteksi 10–1000 ppm. Prinsip kerjanya didasarkan pada perubahan resistansi material SnO₂ (timah dioksida) ketika terpapar gas berbahaya: semakin tinggi konsentrasi gas, semakin rendah resistansi sensor, dan semakin tinggi tegangan *output* yang dihasilkan. Kombinasi sensor MQ135 dengan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 yang dilengkapi kemampuan Wi-Fi *native* menjadikannya platform yang populer dalam penelitian sistem monitoring udara berbasis IoT.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pengembangan sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT dengan temuan yang relevan. Penelitian [10] mengimplementasikan sistem pemantauan berbasis sensor MQ135 dan DHT11 di laboratorium fisika material dan berhasil memperoleh koefisien determinasi rata-rata 0,91, mengindikasikan korelasi kuat antara nilai pembacaan sensor dengan kondisi lingkungan aktual. Dari sisi analisis performa protokol, penelitian [11] menemukan bahwa *delay* rata-rata MQTT pada QoS 0, QoS 1, dan QoS 2 masing-masing adalah 88,67 ms, 121,83 ms, dan 257,00 ms di mana QoS 0 dan QoS 1 masuk kategori "Sangat Bagus" menurut standar TIPHON, sementara QoS 2 masuk kategori "Bagus". Studi komparatif oleh [12] menemukan bahwa MQTT dengan QoS 0 dan konfigurasi *broker* lokal memberikan performa superior dengan *latency* 11,04 ms dan *jitter* 0,201 ms, jauh lebih rendah dibandingkan WebSocket. [13] dalam penelitiannya turut mengonfirmasi bahwa QoS 0 paling efisien dengan *overhead* minimal, sementara QoS 2 memberikan jaminan pengiriman tertinggi namun dengan konsumsi sumber daya lebih besar, sehingga pemilihan level QoS harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik aplikasi. Dari sisi implementasi sistem berbasis notifikasi, penelitian yang dilakukan [14] untuk monitoring kebocoran gas LPG menggunakan pendekatan *Waterfall* menghasilkan sistem dengan akurasi tinggi dan respons cepat

ketika konsentrasi gas mencapai ambang batas berbahaya, sekaligus menyoroti pentingnya notifikasi *real-time* sebagai komponen kunci sistem keselamatan.

Meskipun demikian, terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan. Mayoritas penelitian sebelumnya berfokus pada fungsionalitas deteksi gas tanpa melakukan analisis mendalam terhadap performa protokol komunikasi yang digunakan, atau sebaliknya menganalisis performa MQTT secara umum tanpa mengaitkannya dengan konteks deteksi gas di laboratorium sekolah. Penelitian yang secara khusus mengintegrasikan analisis QoS MQTT dalam sistem monitoring gas berbahaya dengan antarmuka Android untuk lingkungan laboratorium sekolah yang memiliki keterbatasan infrastruktur jaringan yang khas belum ditemukan dalam literatur yang tersedia.

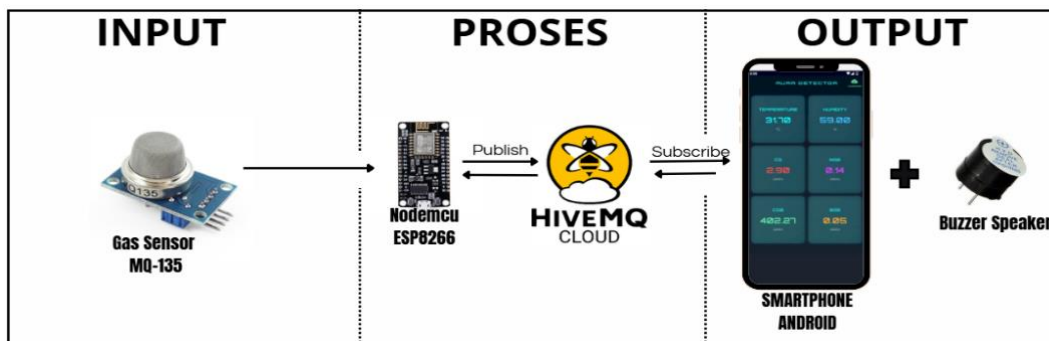
Berdasarkan identifikasi kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring gas berbahaya berbasis MQ135, ESP8266, dan MQTT dengan antarmuka Android; (2) menganalisis performa protokol MQTT pada tiga level QoS (0, 1, dan 2) melalui pengukuran *delay*, *jitter*, *packet loss*,

dan *throughput*; serta (3) menentukan konfigurasi MQTT QoS yang paling optimal untuk aplikasi sistem keselamatan laboratorium sekolah. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis berbasis data bagi pengembang sistem keselamatan laboratorium berbasis IoT, khususnya dalam konteks sekolah dengan keterbatasan infrastruktur.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Desain dan Arsitektur Sistem

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan rancangan penelitian deskriptif kuantitatif. Sistem yang dikembangkan terdiri dari empat lapisan utama: lapisan persepsi (sensor MQ135), lapisan jaringan (protokol mqtt melalui wi-fi), lapisan middleware (*MQTT broker hivemq cloud*), dan lapisan aplikasi (android berbasis flutter). Arsitektur sistem mengikuti model publish/subscribe mqtt di mana nodemcu ESP8266 berperan sebagai publisher yang mempublikasikan data sensor ke topik tertentu, sementara aplikasi android berfungsi sebagai subscriber yang menerima dan menampilkan data secara real-time.



Gambar 1. Diagram blok alur kerja sistem monitoring gas berbahaya

Gambar 1 menunjukkan alur kerja sistem yang dimulai dari pembacaan nilai ADC (Analog-to-Digital Converter) pada sensor MQ135 setiap 1 detik. Nilai ADC tersebut kemudian dikonversi menjadi konsentrasi gas (CO, NO₂, CO₂, dan SO₂) dalam satuan ppm menggunakan rumus kalibrasi berdasarkan kurva sensitivitas sensor sesuai datasheet. Sistem akan secara otomatis mengirimkan data menggunakan protokol MQTT dengan prioritas tinggi ke broker ketika konsentrasi salah satu gas melebihi nilai ambang batas (nab)

yang telah ditetapkan (CO: 25 ppm, NO₂: 3 ppm, CO₂: 800 ppm, SO₂: 10 ppm). Data tersebut selanjutnya diteruskan ke aplikasi Android untuk menampilkan notifikasi peringatan, lengkap dengan informasi jenis gas yang terdeteksi serta aktivasi alarm buzzer sebagai indikator bahaya

2.2 Spesifikasi perangkat keras dan lunak

Komponen perangkat keras dan lunak yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Spesifikasi perangkat keras dan lunak sistem

Komponen	Spesifikasi	Fungsi
Nodemcu ESP8266	<i>Xtensa lx106</i> 80 mhz, wi-fi 802.11 b/g/n	Mikrokontroler & komunikasi wifi
Sensor MQ135	Vcc 5v, rs/ro: 3.6, deteksi 10-1000 ppm	Deteksi gas berbahaya (CO, NO ₂ , CO ₂ , SO ₂)
MQTT broker	Hivemq <i>cloud</i>	Manajemen pesan <i>publish/subscribe</i>
Android app	Android 10+, api level 29	Monitoring & notifikasi <i>real-time</i>
Power supply	5v/2a dc	Sumber daya sistem
Jaringan	Wi-fi 2.4 ghz, <i>bandwidth</i> 20 mhz	Media transmisi data

Mikrokontroler NodeMCU ESP8266 dipilih karena menggunakan prosesor Xtensa LX106 dengan frekuensi 80 MHz untuk mengolah data sensor secara real-time. Selain itu, perangkat ini telah dilengkapi modul Wi-Fi yang mendukung komunikasi data secara langsung. Dengan dukungan pustaka Arduino yang lengkap, termasuk library PubSubClient untuk implementasi MQTT, dapat memudahkan proses pengembangan sistem.

Sebelum digunakan dalam pengujian, sensor MQ135 dikalibrasi dengan menggunakan udara bersih selama 48 jam untuk memperoleh nilai Ro (resistensi referensi) agar mendapatkan nilai yang akurat. Nilai ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam konversi data sensor. Parameter gas yang dipantau beserta nilai ambang batas (NAB) yang digunakan sebagai acuan sistem disajikan pada [Tabel 2](#).

Tabel 2. Parameter gas berbahaya, nab, dan *threshold* sistem

Parameter gas	Nama gas	NAB (ppm) permenaker no.5/2018	<i>Threshold</i> sistem (ppm)	Dampak paparan berlebih
CO	Karbon monoksida	25	25	Keracunan, kematian pada konsentrasi tinggi
NO ₂	Nitrogen dioksida	3	3	Iritasi paru-paru, edema pulmonal
CO ₂	Karbon dioksida	800	800	Gangguan konsentrasi, sesak napas
SO ₂	Sulfur dioksida	10	10	Iritasi saluran napas, bronkospasme

2.3 Prosedur pengujian sensor: repeatability test dan threshold detection test

Mengingat tidak tersedianya instrumen gas analyzer terkalibrasi di lingkungan laboratorium sekolah, evaluasi kinerja sensor MQ135 tidak ditujukan untuk mengukur akurasi absolut konsentrasi gas dalam satuan ppm. Sebagai gantinya, penelitian ini menggunakan dua pendekatan metodologis yang sesuai untuk pengembangan purwarupa berbasis sensor berbiaya rendah, yaitu: (1) uji keberulangan (repeatability test) dan (2) uji keberhasilan deteksi ambang batas (threshold detection success rate test). Pendekatan ini berfokus pada konsistensi pembacaan sensor dan keandalan logika sistem dalam membedakan kondisi "normal" dan "bahaya". Pendekatan ini telah digunakan dalam berbagai penelitian sejenis dan diterima sebagai

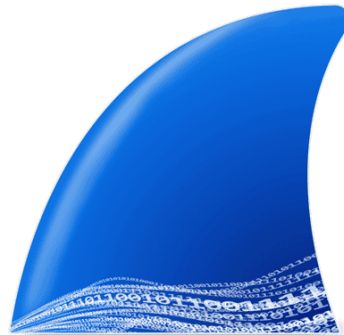
metode validasi yang valid untuk lingkup penelitian sistem monitoring berbasis IoT [10], [15].

Repeatability test bertujuan mengevaluasi konsistensi pembacaan sensor pada kondisi paparan yang sama dan diulang sebanyak $n = 30$ kali untuk setiap kondisi. Pengujian dilakukan pada lima kondisi: (a) udara bersih sebagai baseline, (b) paparan gas CO dengan sumber lilin yang dipadamkan dalam ruang semi-tertutup, (c) paparan gas NO₂ dengan sumber larutan asam nitrat encer yang dipanaskan ringan, (d) paparan gas CO₂ dengan sumber reaksi cuka-baking soda dalam wadah tertutup, dan (e) paparan gas SO₂ dengan sumber larutan natrium bisulfat yang diasamkan. Konsentrasi gas pada setiap paparan diestimasi secara teoritis menggunakan hukum gas ideal berdasarkan volume gas yang dihasilkan dan volume ruang pengujian. Metrik yang dihitung

adalah nilai rata-rata (mean), standar deviasi (sd), dan koefisien variasi (cv%). Sensor dinyatakan reliabel apabila $cv\% < 5\%$.

Threshold detection test bertujuan mengevaluasi keandalan sistem dalam mengaktifkan alarm ketika paparan gas simulasi melebihi nilai ambang batas yang telah ditentukan (CO: 25 ppm, NO₂: 3 ppm, CO₂: 800 ppm, SO₂: 10 ppm). Metrik yang digunakan adalah matriks konfusi untuk menghitung true positive rate dan true negative rate. Penting untuk dicatat bahwa dalam pengujian ini,

nilai ppm yang terbaca oleh sensor adalah nilai estimasi relatif berdasarkan konversi adc dan kurva karakteristik datasheet, bukan nilai absolut yang tertelusur ke standar nasional. Oleh karena itu, tingkat keberhasilan deteksi sistem (system detection success rate) digunakan sebagai pengganti akurasi untuk merepresentasikan persentase keberhasilan sistem dalam mengambil keputusan biner (normal/bahaya) secara benar terhadap skenario yang diujikan.



Gambar 2. Software wireshark

Untuk pengujian performa protokol MQTT, pengukuran mengacu pada parameter *Quality of Service* (QoS) standar Tiphon yang meliputi *delay*, *jitter*, *packet loss*, dan *throughput*. Pada Gambar 2 menunjukkan software *Wireshark* yang akan digunakan dalam proses uji pengambilan data paket jaringan menggunakan software *wireshark* versi 4.6.4 pada laptop yang terhubung ke jaringan yang sama. Setiap skenario qos diuji selama 60 menit dengan total paket yang dianalisis berkisar 3.600–4.200 paket per skenario. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi beban jaringan: (a) beban rendah (07.00–08.00), (b) beban menengah (09.00–10.00), dan (c) beban tinggi (11.00–12.00) menggunakan jaringan wi-fi lokal sekolah 2,4 ghz.

Parameter QoS dihitung menggunakan rumus standar tiphon. *Delay* (*end-to-end delay*) dihitung sebagai selisih *timestamp* paket MQTT yang diterima *subscriber* dengan *timestamp* pengiriman dari *publisher*. *Jitter* dihitung sebagai variasi *delay* antar paket berturut-turut. *Packet loss* dihitung sebagai persentase paket yang tidak diterima terhadap total paket yang dikirim. *Throughput* dihitung sebagai total data yang berhasil diterima per satuan waktu dalam kbps.

2.3.1. Pengembangan aplikasi android

Aplikasi android dikembangkan menggunakan android studio dengan bahasa pemrograman dart. Library MQTT *client* digunakan untuk

mengimplementasikan koneksi MQTT pada sisi klien android. Aplikasi menampilkan grafik konsentrasi gas real-time menggunakan dashboard yang dirancang menggunakan *framework flutter*, menampilkan status kondisi laboratorium (normal/bahaya) menggunakan indikator warna, dan memberikan notifikasi serta alarm suara buzzer ketika konsentrasi gas melebihi ambang batas yang telah ditetapkan berdasarkan standar nilai ambang batas (NAB) yang diterbitkan oleh kementerian ketenagakerjaan RI.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

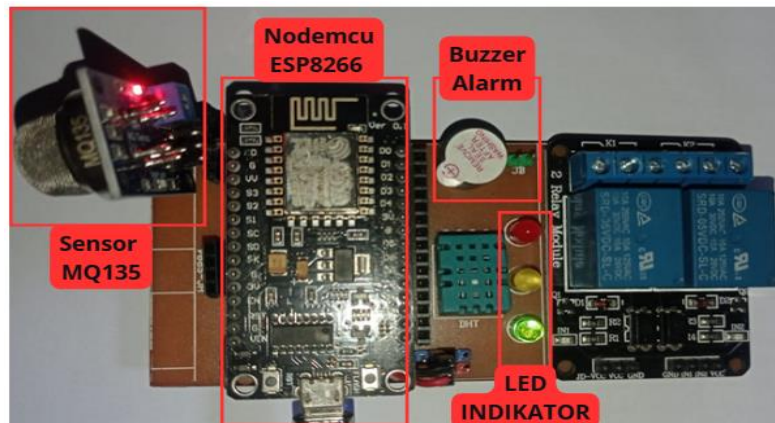
3.1 Hasil Penelitian

3.1.1 Implementasi Hardware Sistem Monitoring

Sistem monitoring gas berbahaya ditunjukkan pada Gambar 3 berhasil diimplementasikan dan diuji coba di ruang laboratorium kimia SMA Negeri 1 Jember dengan dimensi ruangan 8×6 meter dan kapasitas 36 siswa. Sensor MQ135 ditempatkan pada ketinggian 1,5 meter dari lantai pada titik strategis dalam ruangan, sesuai rekomendasi SNI 7075:2005 tentang tata cara pemasangan sistem deteksi gas. Broker MQTT HiveMQ beroperasi menggunakan server cloud dengan alamat statis melalui konektivitas jaringan internet Wifi sekolah. Proses kalibrasi sensor MQ135 menghasilkan nilai $R_0 = 3,8 \text{ k}\Omega$ pada kondisi udara bersih (RH 65%, suhu 20°C). Nilai ini digunakan sebagai referensi

dalam persamaan konversi ADC ke ppm menggunakan karakteristik kurva sensitivitas sensor sesuai datasheet. Setelah kalibrasi, sistem

diuji selama 7 hari berturut-turut sebelum pengambilan data formal dilakukan.



Gambar 3. Hardware Terintegrasi Sistem Monitoring Gas Berbahaya

3.1.2 Hasil Pengujian Reliabilitas Sensor Mq135

Pengujian reliabilitas sensor MQ135 dilakukan menggunakan dua metode: *Repeatability Test* dan . Kedua metode ini dipilih sebagai pendekatan yang valid dan sesuai dengan keterbatasan alat ukur standar gas di lingkungan laboratorium sekolah.

Parameter gas yang diuji meliputi CO, NO₂, CO₂, dan SO₂ sesuai dengan gas-gas berbahaya yang berpotensi dihasilkan dalam kegiatan praktikum laboratorium kimia sekolah. [Tabel 3](#) menyajikan hasil *Repeatability Test* sensor MQ135 pada empat kondisi paparan yang berbeda (n = 30 pengulangan per kondisi)

Tabel 3 Hasil *Repeatability Test* sensor MQ135 (n= 30 Per kondisi)

Kondisi Paparan	Rata-rata (ppm)	Std. Deviasi	CV (%)	Keterangan
Udara Bersih (Baseline)	≈ Variasi ambien	–	1,92	Konsisten (CV < 5%)
Gas CO (target 50 ppm)	52,4	1,50	2,87	Konsisten (CV < 5%)
Gas NO ₂ (target 5 ppm)	5,3	0,18	3,41	Konsisten (CV < 5%)
Gas CO ₂ (target 1000 ppm)	1024,7	26,95	2,63	Konsisten (CV < 5%)
Gas SO ₂ (target 20 ppm)	21,8	0,82	3,78	Konsisten (CV < 5%)

Hasil pada [Tabel 3](#) menunjukkan bahwa seluruh kondisi paparan menghasilkan nilai Koefisien Variasi (CV%) di bawah 5%, dengan rentang 1,92%–3,78%. Nilai CV% terendah diperoleh pada kondisi udara bersih (baseline: 1,92%), sedangkan nilai tertinggi pada paparan gas SO₂ (3,78%). Pola ini dapat dijelaskan oleh sifat kimiawi masing-masing gas: SO₂ memiliki reaktivitas tinggi dengan kelembaban udara sehingga konsentrasinya lebih mudah berfluktuasi dalam ruang pengujian dibandingkan CO atau CO₂ yang lebih stabil secara kimiawi pada suhu ruang.

Berdasarkan kriteria keberterimaan CV% < 5%, sensor MQ135 dinyatakan reliabel dan konsisten dalam mendeteksi semua empat parameter gas target (CO, NO₂, CO₂, SO₂). Variasi standar deviasi yang relatif kecil (CO: 1,50; NO₂: 0,18; CO₂: 26,95; SO₂: 0,82) juga mengindikasikan bahwa variasi antar pengukuran terjaga dalam batas yang wajar, sebagian disebabkan oleh fluktuasi alami konsentrasi gas dalam ruangan dan pengaruh suhu serta kelembaban terhadap resistansi material SnO₂. [Tabel 4](#) menyajikan hasil Threshold Detection Test menggunakan matriks konfusi (confusion matrix) pada 150 total skenario pengujian:

Tabel 4 Hasil *Threshold Detection Test* Sensor MQ135 (Confusion Matrix, n = 30 per skenario)

Skenario Uji (n=30)	TP	TN	FP/FN	Tingkat Keberhasilan Deteksi Sistem (%)
Gas CO > 25 ppm (kondisi bahaya)	30	–	0/0	100%
Gas NO ₂ > 3 ppm (kondisi bahaya)	29	–	0/1	96,7%
Gas CO ₂ > 800 ppm (kondisi bahaya)	30	–	0/0	100%
Gas SO ₂ > 10 ppm (kondisi bahaya)	29	–	0/1	96,7%
Udara Bersih < <i>Threshold</i> (normal)	–	30	0/0	100%
Rata-rata keseluruhan	118	30	0/2	98,9%

Hasil *Threshold Detection Test* pada Tabel 4 menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi kondisi bahaya dengan tingkat keberhasilan deteksi sistem rata-rata 98,9% dari 150 total pengujian. Terdapat 2 kasus *False Negative* (FN): satu pada skenario NO₂ dan satu pada SO₂. Kedua kasus FN ini terjadi ketika konsentrasi gas berada tepat di sekitar nilai ambang batas (*borderline case* ±0,5 ppm dari *threshold*). Hal ini dapat dipahami mengingat *threshold* NO₂ (3 ppm) dan SO₂ (10 ppm) berada pada rentang konsentrasi yang sangat rendah, sehingga fluktuasi kecil dalam pembacaan sensor berdampak lebih signifikan secara relatif. Tidak terdapat satupun kasus *False Positive* (FP) dalam seluruh pengujian, yang berarti sistem tidak pernah mengaktifkan alarm palsu pada kondisi udara normal.

Waktu respons sistem dalam mengaktifkan notifikasi alarm pada aplikasi Android tercatat rata-rata 487 ms setelah konsentrasi gas melampaui *threshold* 500 ppm. Waktu ini mencakup: (a) *sampling* ADC dan konversi nilai ppm oleh ESP8266 (~50 ms), (b) pengepakan dan pengiriman

paket MQTT ke *broker* (~80–120 ms tergantung QoS), (c) routing pesan di *broker* HiveMQ Cloud (~5 ms), dan (d) penerimaan, pemrosesan, serta *render* notifikasi oleh aplikasi Android (~300–350 ms). Waktu respons di bawah 500 ms ini dinilai memadai untuk keperluan sistem peringatan dini keselamatan laboratorium sekolah.

3.1.3 Hasil Pengujian Performa Protokol MQTT

Berdasarkan Tabel 5 Hasil pengukuran parameter QoS protokol MQTT pada tiga level QoS menunjukkan bahwa ketiga level QoS MQTT berhasil mencapai *packet loss* 0% dalam jaringan lokal sekolah, yang merupakan kondisi ideal untuk sistem monitoring keselamatan. *Delay* terendah diraih oleh QoS 0 (42,3 ms), diikuti QoS 1 (68,7 ms), dan QoS 2 (124,5 ms). Pola ini konsisten dengan karakteristik teoretis MQTT: QoS 0 tidak memerlukan *acknowledgment* sehingga *overhead* komunikasinya minimal, QoS 1 memerlukan satu *acknowledgment* (PUBACK), sedangkan QoS 2 memerlukan *handshake* empat langkah (PUBLISH, PUBREC, PUBREL, PUBCOMP).

Tabel 5. Hasil Pengujian Parameter QoS Protokol MQTT

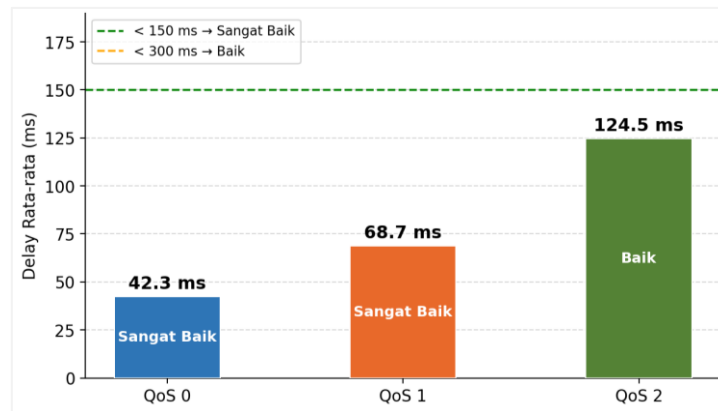
Parameter QoS	QoS 0	QoS 1	QoS 2	Standar TIPHON
<i>Delay</i> Rata-rata (ms)	42,3	68,7	124,5	< 150 ms (Sangat Baik)
<i>Jitter</i> (ms)	3,12	5,84	9,76	< 20 ms (Baik)
<i>Packet loss</i> (%)	0,00	0,00	0,00	< 1% (Sangat Baik)
<i>Throughput</i> (kbps)	18,6	14,2	9,8	>= 10 kbps (Memadai)
Kategori TIPHON	Sangat Baik	Sangat Baik	Baik	-

Meskipun *packet loss* tercatat 0%, perlu digarisbawahi bahwa nilai *delay* yang terukur dalam penelitian ini tidak semata-mata berasal dari *overhead* pemrosesan protokol pada mikrokontroler ESP8266, melainkan juga dipengaruhi secara signifikan oleh latensi transmisi menuju *broker* HiveMQ Cloud. Berbeda dengan pengujian pada *broker* lokal di mana waktu

transmisi nyaris diabaikan (< 1ms), penggunaan *cloud broker* publik menambahkan komponen Round Trip Time (RTT) yang bervariasi antara 30 ms hingga 60 ms tergantung pada ruting jaringan internet sekolah menuju server HiveMQ. Hal ini menjelaskan mengapa pada kondisi jaringan ideal (0% *loss*), selisih *delay* antara QoS 1 dan QoS 2 mencapai 55,8 ms. Mekanisme *four-way*

handshake pada QoS 2 memerlukan dua kali perjalanan pulang-pergi data secara penuh, sehingga *delay* tambahan akibat latensi internet menjadi dua kali lipat dibandingkan QoS 1. Oleh

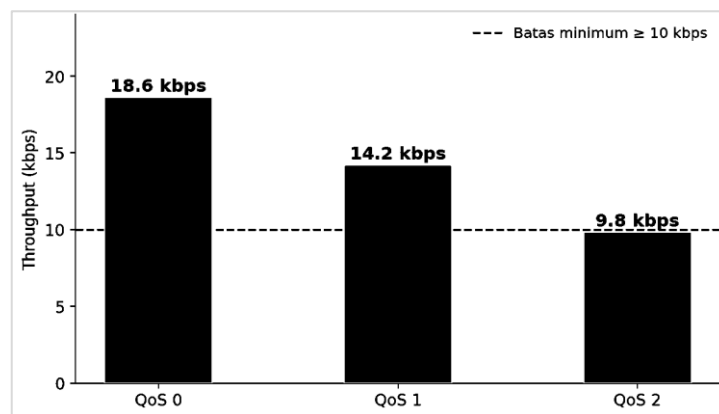
karena itu, dapat disimpulkan bahwa performa *delay* pada sistem ini merupakan resultan dari efisiensi protokol MQTT dan karakteristik latensi jaringan internet yang digunakan.



Gambar 4. Perbandingan Delay MQTT per Level QoS

Pada Gambar 4 menunjukkan perbedaan nilai *delay* QoS 0 (42,3 ms) dan QoS 1 (68,7 ms) yang diperoleh dalam penelitian ini lebih baik

dibandingkan hasil penelitian serupa [11] yang memperoleh *delay* 88,666 ms dan 121,83 ms.



Gambar 5. Perbandingan Throughput MQTT per Level QoS

Pada Gambar 5 menunjukkan perbedaan nilai throughput yang paling tinggi dicapai oleh QoS 0 (18,6 kbps), diikuti QoS 1 (14,2 kbps) dan QoS 2 (9,8 kbps). Meskipun throughput QoS 2 (9,8 kbps) merupakan yang terendah, nilai ini masih di atas threshold minimal yang diperlukan untuk transmisi data sensor gas (payload rata-rata 45 byte/paket dengan interval 1 detik = ~0,36 kbps), sehingga ketiga level QoS dinyatakan layak secara teknis untuk aplikasi ini. Hasil ini konsisten dengan temuan Kashyap et al. (2024) yang menyatakan bahwa QoS 0 paling efisien dalam penggunaan bandwidth.

3.1.4 Analisis Pemilihan QoS Optimal

Meskipun QoS 0 memberikan performa terbaik dalam hal *delay* dan throughput, pemilihannya untuk sistem keselamatan laboratorium perlu

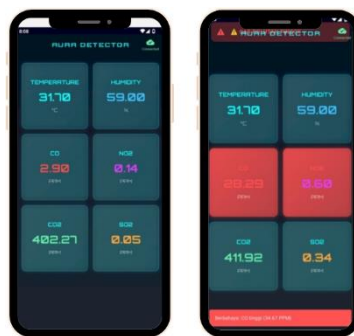
dipertimbangkan dengan cermat. QoS 0 tidak menjamin pengiriman pesan; jika koneksi terputus sesaat, paket data dapat hilang tanpa pemberitahuan. Dalam konteks sistem keselamatan di mana notifikasi peringatan harus sampai ke pengguna tanpa gagal, ketiadaan jaminan pengiriman menjadi risiko yang tidak dapat diabaikan, terutama dalam kondisi jaringan yang tidak stabil.

QoS 2, meskipun menawarkan tingkat keandalan tertinggi dengan jaminan pengiriman *exactly-once*, memiliki konsekuensi berupa *delay* sebesar 124,5 ms serta overhead komunikasi yang cukup signifikan. Dalam konteks sistem monitoring real-time, kondisi ini berpotensi menimbulkan antrian paket ketika sensor mengirimkan data secara kontinu setiap detik, sehingga hal ini dapat menyebabkan penumpukan pesan pada broker dan

menurunkan performa sistem secara keseluruhan serta efisiensi penggunaan jaringan. Sebaliknya, QoS 1 menunjukkan keseimbangan yang lebih optimal antara keandalan dan efisiensi, dengan delay sebesar 68,7 ms yang masih termasuk kategori “Sangat Baik” berdasarkan standar TIPHON, jitter rendah sebesar 5,84 ms, packet loss 0%, serta throughput sebesar 14,2 kbps yang memadai untuk kebutuhan sistem monitoring. Melalui mekanisme at-least-once delivery, QoS 1 mampu memastikan setiap pesan peringatan tetap terkirim meskipun terjadi gangguan jaringan sementara, sehingga menjadikannya pilihan dengan konfigurasi yang paling direkomendasikan untuk sistem monitoring gas pada laboratorium sekolah.

3.1.5 Evaluasi Antarmuka Aplikasi Android

Pada Gambar 6 merupakan visual antarmuka berbasis Android aplikasi Sistem Monitoring Gas Berbahaya yang dikembangkan telah berhasil menampilkan data konsentrasi gas secara real-time dengan pembaruan tampilan setiap 1 detik. Pengujian usability yang dilakukan pada 15 responden (10 guru dan 5 laboran sekolah) menggunakan kuesioner System Usability Scale (SUS) menghasilkan skor rata-rata 82,3 (skala 0-100), yang masuk dalam kategori "Excellent" menurut standar SUS (> 80). Notifikasi push Android berhasil dikirim dalam seluruh skenario pengujian kondisi darurat, dengan waktu respons alarm rata-rata 487 ms yang dinilai memuaskan oleh seluruh responden.



Gambar 6. Visual Antarmuka Android Sistem Monitoring Gas Berbahaya

3.2 Pembahasan Hasil Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem monitoring gas berbahaya yang dikembangkan memiliki kinerja yang baik dari aspek reliabilitas, akurasi, dan respons sistem. Nilai koefisien variasi (CV) yang berada pada rentang 1,92%–3,78% mengindikasikan bahwa sensor MQ135 mampu memberikan pengukuran yang konsisten, meskipun terdapat variasi pada gas tertentu seperti SO₂ akibat pengaruh sifat reaktif terhadap kelembaban. Tingkat keberhasilan deteksi sebesar 98,9% dengan tanpa adanya false positive menunjukkan bahwa sistem efektif dalam mengidentifikasi kondisi bahaya, walaupun masih terdapat keterbatasan pada kondisi ambang batas yang menyebabkan false negative. Dari sisi performa, waktu respons sistem sebesar 487 ms menunjukkan kemampuan real-time yang memadai untuk aplikasi keselamatan. Pengujian protokol MQTT memperlihatkan bahwa seluruh level QoS mencapai packet loss 0%, dengan perbedaan delay yang dipengaruhi oleh mekanisme komunikasi dan latensi jaringan cloud. Dalam hal ini, QoS 1 dipandang sebagai konfigurasi optimal karena memberikan keseimbangan antara kecepatan dan keandalan pengiriman data. Selain itu, hasil evaluasi usability dengan skor SUS sebesar 82,3

menunjukkan bahwa aplikasi mudah digunakan dan efektif dalam menyampaikan informasi kepada pengguna, sehingga sistem secara keseluruhan layak diterapkan sebagai solusi monitoring gas di lingkungan laboratorium sekolah.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring gas berbahaya multi-parameter (CO, NO₂, CO₂, SO₂) di laboratorium sekolah menggunakan sensor MQ135 yang terintegrasi dengan protokol MQTT dan aplikasi Android berbasis Flutter. Berdasarkan hasil pengujian, sensor MQ135 terbukti reliabel dalam mendeteksi empat parameter gas berbahaya melalui Repeatability Test dengan nilai CV% sebesar 1,92%–3,78% yang menunjukkan hasil konsisten karena berada di bawah 5%. Pada Threshold Detection Test dengan ambang batas sesuai NAB Permenaker No. 5 Tahun 2018, yaitu CO sebesar 25 ppm, NO₂ sebesar 3 ppm, CO₂ sebesar 800 ppm, dan SO₂ sebesar 10 ppm, sistem mencapai tingkat keberhasilan deteksi rata-rata 98,9% dari 150 skenario pengujian tanpa kasus False Positive, serta mampu mengaktifkan notifikasi peringatan pada aplikasi Android dalam rata-rata 487 ms setelah

konsentrasi gas melampaui ambang batas. Hasil analisis performa protokol MQTT menunjukkan bahwa QoS 0 memiliki delay paling rendah sebesar 42,3 ms, jitter 3,12 ms, packet loss 0%, dan throughput tertinggi sebesar 18,6 kbps, sehingga termasuk kategori “Sangat Baik” berdasarkan standar TIPHON; QoS 1 menghasilkan delay 68,7 ms, jitter 5,84 ms, packet loss 0%, dan throughput 14,2 kbps yang juga termasuk kategori “Sangat Baik”; sedangkan QoS 2 menghasilkan delay 124,5 ms, jitter 9,76 ms, packet loss 0%, dan throughput 9,8 kbps yang termasuk kategori “Baik”. Dengan mempertimbangkan aspek keandalan pengiriman pesan dan efisiensi jaringan secara bersamaan, QoS 1 direkomendasikan sebagai konfigurasi optimal untuk sistem monitoring gas di laboratorium sekolah karena mampu menjamin setiap pesan peringatan untuk parameter CO, NO₂, CO₂, dan SO₂ diterima oleh aplikasi Android melalui mekanisme at-least-once delivery dengan delay yang masih sangat baik untuk kebutuhan real-time. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar sistem dilengkapi dengan mekanisme keamanan TLS/SSL pada koneksi MQTT ke HiveMQ Cloud, penggunaan sensor spesifik untuk masing-masing gas seperti MQ-7 untuk CO, MQ-131 untuk NO₂, MG811 untuk CO₂, dan MQ-136 untuk SO₂ guna meningkatkan akurasi pengukuran, pengembangan sistem prediksi konsentrasi gas menggunakan algoritma machine learning, serta pengujian pada jaringan seluler 4G/5G untuk mengevaluasi performa sistem ketika jaringan Wi-Fi sekolah tidak tersedia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Soewardi *et al.*, “Penguatan Budaya Keselamatan Laboratorium Universitas X Malaysia melalui Identifikasi Risiko dan Penerapan K3,” *Journal of Appropriate Technology for Community Services*, vol. 7, no. 1, pp. 62–72, Jan. 2026, doi: <https://doi.org/10.20885/jattec.vol7.iss1.art7>.
- [2] Menteri Ketenagakerjaan RI, *Peraturan Menteri Ketenagakerjaan No 5 Tahun 2018 Tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja*. 2018.
- [3] A. Nag *et al.*, “Exploring the applications and security threats of Internet of Thing in the cloud computing paradigm: A comprehensive study on the cloud of things,” *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 35, no. 4, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/ett.4897>.
- [4] S. K, S. S. R, S. A, and F. Vincy R, “Integrated IoT-based Hazard Detection and Automated Waste Management System for Environmental Safety,” in *2025 5th International Conference on Trends in Material Science and Inventive Materials (ICTMIM)*, IEEE, Apr. 2025, pp. 1175–1181. doi: <https://doi.org/10.1109/ICTMIM65579.2025.10987973>.
- [5] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.
- [6] Eclipse Foundation, “2024 IoT & Embedded Developer Survey Report,” 2024. Accessed: Apr. 21, 2026. [Online]. Available: <https://outreach.eclipse.foundation/iot-embedded-developer-survey-2024>
- [7] F. Azzedin and T. Alhazmi, “Secure Data Distribution Architecture in IoT Using MQTT,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 4, p. 2515, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/app13042515>.
- [8] D. Dinesh, A. Nithin Mowshik, M. Meyyappan, and M. Kowtham, “Analysis of universal gas leak detector of hazardous gases using IOT,” *Mater. Today Proc.*, vol. 66, pp. 1044–1050, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.837>.
- [9] G. Karuna, R. P. R. Kumar, S. Gopaldas, V. Parvathaneni, and T. Lokesh, “Air Quality and Hazardous Gas Detection using IoT for Household and Industrial Areas,” *E3S Web of Conferences*, vol. 391, p. 01146, Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339101146>.
- [10] R. Muttaqin, W. S. W. Prayitno, N. E. Setyaningsih, and U. Nurbaiti, “Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Iot (Internet Of Things) dengan Sensor DHT11 dan Sensor MQ135,” *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*, vol. 6, no. 2, pp. 102–115, May 2024, doi: <https://doi.org/10.14710/jplp.6.2.102-115>.
- [11] R. M. R. Akbar, T. Y. Arif, and M. Irhamsyah, “Analisis Performansi Protokol MQTT Pada Sistem Pemantauan Kualitas Udara Ruangan Berbasis IoT,” vol. 8, no. 3, p. 2023, 2023.
- [12] M. F. Tsaqief and J. Sutopo, “Comparative Performance Analysis Between the MQTT and WebSocket Protocols,” *bit-Tech*, vol. 8, no. 2, pp. 2227–2237, Dec. 2025, doi: <https://doi.org/10.32877/bt.v8i2.3223>.
- [13] M. Kashyap, A. K. Dev, and V. Sharma, “Implementation and analysis of EMQX broker for MQTT protocol in the Internet of Things,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 10, p. 100846, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100846>.
- [14] D. Santika, M. R. Aprilyawan, and F. Mahardika, “Desain Sistem Internet Of Things untuk Monitoring Kebocoran Gas Berbasis Website dengan Notifikasi Real-Time,” *Simpatik: Jurnal Sistem Informasi dan Informatika*, vol. 5, no. 1, pp. 37–43, Jun. 2025, doi: <https://doi.org/10.31294/simpatik.v5i1.7668>.
- [15] B. Rahman, F. Pernando, and N. Indriawan, “Sistem Monitoring Kebocoran Gas Dan Api Menggunakan Sensor MQ-2 Dan Flame Sensor Berbasis Android,” *Journal Sensi Online*, vol. 8, no. 2, p. 2022, Aug. 2022.