



Sistem Monitoring Kualitas Udara Ruang Kerja Berbasis IoT Menggunakan Sensor M-135

Rasim¹, Dwipa Handayani^{2*}, Carudin³, Achmad Noeman⁴, Mugiarto⁵

¹ Bhayangkara Jakarta Raya University/informatics
Jalan Raya Perjuangan No.81, Bekasi, +6288955882,
e-mail : rasim@dsn.ubharajaya.ac.id

^{2*} Bhayangkara Jakarta Raya University/informatics
Jalan Raya Perjuangan No.81, Bekasi, +6288955882,
e-mail : dwipa.handayani@dsn.ubharajaya.ac.id

³ Bani Saleh University/information & digital technology
Jalan Mayor Madmuin Hasibuan No.68, Bekasi, +6288955882,
e-mail : carudin@ubs.ac.id

⁴ Bhayangkara Jakarta Raya University/informatics
Jalan Raya Perjuangan No.81, Bekasi, +6288955882,
e-mail : achmad.noeman@dsn.ubharajaya.ac.id

⁵ Bhayangkara Jakarta Raya University/informatics
Jalan Raya Perjuangan No.81, Bekasi, +6288955882,
e-mail : mugiarto@dsn.ubharajaya.ac.id

ARTICLE INFO

History of the article:

Received 9 Juli 2026

Received in revised form 13 Agustus 2026

Accepted 14 Agustus 2026

Available online 22 Agustus 2026

Keywords:

Internet of Things; kualitas udara; karbon monoksida; MQ-135; ESP32

* Correspondence:

Telepon :

-

E-mail:

dwipa.handayani@dsn.ubharajaya.ac.id

ABSTRACT

Pemantauan kualitas udara dalam ruangan penting dilakukan di tempat kerja karena paparan gas berbahaya dapat terjadi tanpa adanya tanda-tanda yang dapat dideteksi secara langsung oleh indra

manusia. Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan mengintegrasikan sensor MQ-135, pengendali ESP32, tampilan lokal LED Matrix P10, dan platform pemantauan web Ganesha16. Kebaruan penelitian ini terletak pada penyampaian informasi lingkungan secara simultan melalui tampilan publik lokal dan akses web jarak jauh dalam satu arsitektur terintegrasi. Sistem dikembangkan menggunakan metode *prototyping*, yang mencakup analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi prototipe, pengujian fungsional, evaluasi, dan penyempurnaan. Pengujian berkelanjutan dilakukan selama tiga hari di lingkungan tempat kerja dan menghasilkan 1.090 catatan pemantauan. Nilai rata-rata Indeks Kualitas Udara adalah 41,84 (dikategorikan baik), sementara kelima skenario fungsional, meliputi pembacaan sensor, transmisi data, tampilan LED Matrix, pemantauan web, dan komunikasi *real-time* berjalan dengan sukses. Hasil ini menunjukkan bahwa arsitektur yang diusulkan mampu mendukung pemantauan kualitas udara dalam ruangan secara *real-time* dan mudah diakses. Namun, karena sensor MQ-135 merespons berbagai jenis gas, prototipe ini lebih tepat digunakan sebagai

sistem pemantauan kualitas udara tahap awal dibandingkan sebagai instrumen presisi untuk mengukur konsentrasi karbon monoksida.

PENDAHULUAN

Kualitas udara dalam ruangan merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kesehatan, kenyamanan, dan produktivitas manusia, khususnya pada lingkungan kerja yang menggunakan sistem ventilasi buatan seperti *Air Conditioning* (AC). Meningkatnya aktivitas perkotaan, penggunaan bahan bakar fosil, serta emisi kendaraan bermotor dan aktivitas industri menyebabkan penurunan kualitas udara yang berdampak terhadap kesehatan manusia. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa kualitas udara dalam ruangan (*Indoor Air Quality* atau IAQ) memiliki hubungan erat dengan kesehatan penghuni bangunan, sehingga pemantauan kualitas udara secara berkelanjutan menjadi bagian penting dalam mendukung keselamatan dan kesehatan kerja. Penerapan sistem *monitoring* berbasis *Internet of Things* memungkinkan proses pengawasan kualitas udara dilakukan secara berkelanjutan sehingga perubahan kondisi lingkungan dapat diketahui lebih cepat sebagai dasar pengambilan tindakan preventif [1], [2], [3].

Salah satu polutan udara yang berbahaya adalah karbon monoksida (CO), yaitu gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak memiliki rasa sehingga sulit dideteksi secara langsung oleh manusia. Paparan karbon monoksida dalam konsentrasi tertentu dapat menyebabkan gangguan kesehatan, kehilangan kesadaran, bahkan kematian. Oleh karena itu, diperlukan sistem *monitoring* yang mampu mendeteksi keberadaan gas karbon monoksida secara otomatis dan menyampaikan informasi kondisi udara secara cepat, akurat, serta mudah diakses oleh pengguna. Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan proses pemantauan kualitas udara dilakukan secara *real-time* melalui jaringan internet sehingga dapat meningkatkan kewaspadaan terhadap potensi bahaya pencemaran udara di lingkungan kerja. Integrasi ESP32 dengan sensor gas pada sistem *monitoring* modern terbukti mampu menyediakan komunikasi data secara *real-time* melalui jaringan *Wi-Fi* sehingga meningkatkan efektivitas pemantauan kondisi udara di berbagai lingkungan kerja [4], [5], [6].

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem *monitoring* kualitas udara berbasis IoT dengan memanfaatkan sensor MQ-135, MQ-7, dan mikrokontroler ESP32 untuk mengukur kadar gas pencemar serta mengirimkan data ke platform *monitoring* berbasis web maupun aplikasi bergerak. Hanum dan Elfizon (2023) mengembangkan sistem *monitoring* kualitas udara menggunakan ESP32, sensor MQ-135, sensor MQ-7, LCD, dan Telegram sebagai media notifikasi. Sementara itu, *Muttaqin et al.* (2024) mengembangkan sistem *monitoring* kualitas udara berbasis IoT menggunakan sensor MQ-135 dan DHT11 yang mampu menampilkan data hasil pengukuran secara daring. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa sistem *monitoring* berbasis IoT mampu meningkatkan efektivitas pemantauan kualitas udara melalui pengiriman data secara *real-time* dan penyimpanan data pada server sehingga memudahkan proses *monitoring* dari lokasi yang berbeda [5].

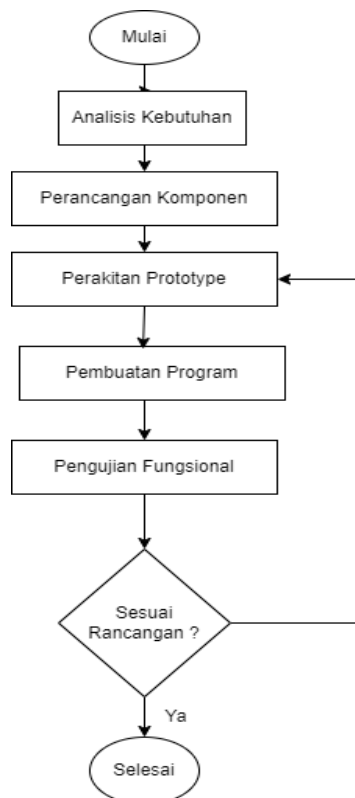
Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada pemantauan kualitas udara menggunakan *dashboard* berbasis web, aplikasi seluler, atau media notifikasi tertentu. Integrasi media tampilan lokal menggunakan LED Matrix P10 yang dikombinasikan dengan platform *monitoring* berbasis web dalam satu sistem masih relatif terbatas. Selain itu, sebagian penelitian lebih menitikberatkan pada *monitoring* kualitas udara secara umum tanpa memberikan fokus pada pemantauan gas karbon monoksida di lingkungan kerja. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang masih dapat dikembangkan melalui perancangan sistem *monitoring* yang mampu mengintegrasikan sensor MQ-135, ESP32, LED Matrix P10, dan platform *monitoring* berbasis web untuk menghasilkan informasi kualitas udara secara *real-time*, mudah dipantau, dan mudah diimplementasikan pada lingkungan kerja.

Selain aspek penyajian informasi, evaluasi sensor juga perlu dibedakan dari evaluasi sistem. MQ-135 merupakan sensor gas berbiaya rendah yang dapat digunakan untuk menangkap perubahan kualitas udara, tetapi responsnya tidak hanya berasal dari CO. Oleh sebab itu, penelitian ini tidak menempatkan keluaran sensor sebagai pengukuran laboratorium konsentrasi CO. Fokus evaluasi diarahkan pada kemampuan prototipe menjalankan proses akuisisi, pengiriman, penyajian, dan pencatatan data secara berkelanjutan. Dengan batasan tersebut, pertanyaan penelitian diarahkan pada tiga aspek: apakah komponen dapat terintegrasi secara fungsional, apakah informasi dapat disajikan secara lokal dan jarak jauh, serta bagaimana ringkasan kondisi kualitas udara selama periode pengujian. Pembatasan ruang lingkup ini memperjelas posisi kontribusi dan mencegah interpretasi berlebihan terhadap kemampuan sensor.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan menggunakan pendekatan *engineering research* dengan metode *Prototype* untuk mengembangkan sistem *monitoring* kualitas udara berbasis IoT. Metode *Prototype* dipilih karena memungkinkan pengembangan dilakukan secara *iteratif* melalui identifikasi kebutuhan, perancangan, implementasi, pengujian, evaluasi, dan penyempurnaan sampai fungsi sistem sesuai dengan kebutuhan pengguna [3], [7]. Pendekatan tersebut digunakan karena penelitian melibatkan integrasi perangkat keras, perangkat lunak, komunikasi data, dan antarmuka *monitoring* dalam satu prototipe.

Alur penelitian terdiri atas analisis kebutuhan, perancangan komponen, perakitan prototipe, pembuatan program, pengujian fungsional, serta evaluasi kesesuaian rancangan. Apabila fungsi yang diuji belum sesuai, perbaikan dilakukan pada tahap perakitan atau pemrograman sebelum pengujian diulang. Alur tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.

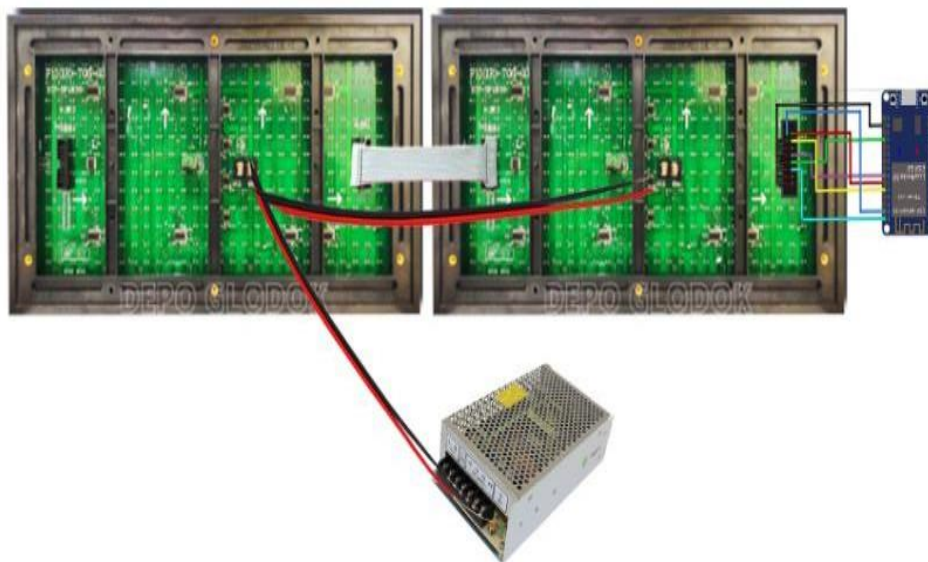


Gambar 1. Diagram penelitian

1. Arsitektur Sistem dan Instrumen

Objek penelitian berupa prototipe sistem *monitoring* kualitas udara pada ruang kerja. Perangkat keras utama terdiri atas sensor MQ-135 sebagai perangkat akuisisi data, ESP32 sebagai pengendali utama dan pengirim data melalui jaringan *Wi-Fi*, LED Matrix P10 sebagai media informasi lokal, *buzzer* sebagai indikator peringatan, adaptor daya, dan jaringan internet. Perangkat lunak dikembangkan menggunakan bahasa C++ melalui Arduino IDE dan diintegrasikan dengan platform IoT Ganesha16 untuk menampilkan data *monitoring* secara *real-time*.

Arsitektur sistem dirancang agar hasil pembacaan sensor diproses oleh mikrokontroler, diteruskan ke tampilan lokal, dan dikirim ke server *monitoring*. Komunikasi pada program menggunakan konektivitas *Wi-Fi* dan pustaka *HTTP client*, sebagaimana terlihat pada implementasi perangkat lunak. Dengan rancangan tersebut, pengguna di lokasi dapat melihat informasi melalui LED Matrix P10, sedangkan pengguna jarak jauh dapat mengakses data melalui platform web. Rancangan hubungan komponen ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perancangan komponen

Tabel 1. Konfigurasi utama sistem

Parameter	Konfigurasi
Sensor utama	MQ-135
Pengendali	ESP32
Media lokal	LED Matrix P10 dan <i>buzzer</i>
Konektivitas	<i>Wi-Fi</i>
Platform <i>monitoring</i>	Ganesha16 berbasis web
Pemrograman	C++ melalui Arduino IDE
Metode pengembangan	<i>Prototype</i>
Metode pengujian	Black Box Testing
Durasi pengujian	3 hari
Jumlah data	1,090 rekaman

2. Prosedur Pengembangan *Prototype*

Analisis kebutuhan dilakukan dengan mengidentifikasi kebutuhan fungsional dan non fungsional sistem. Kebutuhan fungsional mencakup pembacaan sensor, pengiriman data, penyajian informasi pada LED Matrix P10, penyajian data pada platform web, dan komunikasi *real-time*. Kebutuhan non fungsional mencakup konektivitas internet, kestabilan operasi, kemudahan penggunaan, serta kontinuitas penyajian informasi.

Perancangan sistem dilakukan dengan menyusun hubungan antar komponen, jalur komunikasi data, rancangan tampilan lokal, dan rancangan antarmuka web. Perakitan prototipe kemudian dilakukan dengan mengintegrasikan sensor, mikrokontroler, LED Matrix P10, *buzzer*, catu daya, dan jaringan komunikasi. Implementasi fisik prototipe ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Program dikembangkan melalui Arduino IDE untuk membaca nilai sensor, menjalankan logika *monitoring*, mengelola koneksi *Wi-Fi*, serta mengirimkan data ke server. Implementasi program menggunakan pustaka *WiFi* dan *HTTP Client* untuk membentuk koneksi dengan server Ganesha16. Cuplikan implementasi program dan integrasi server ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.

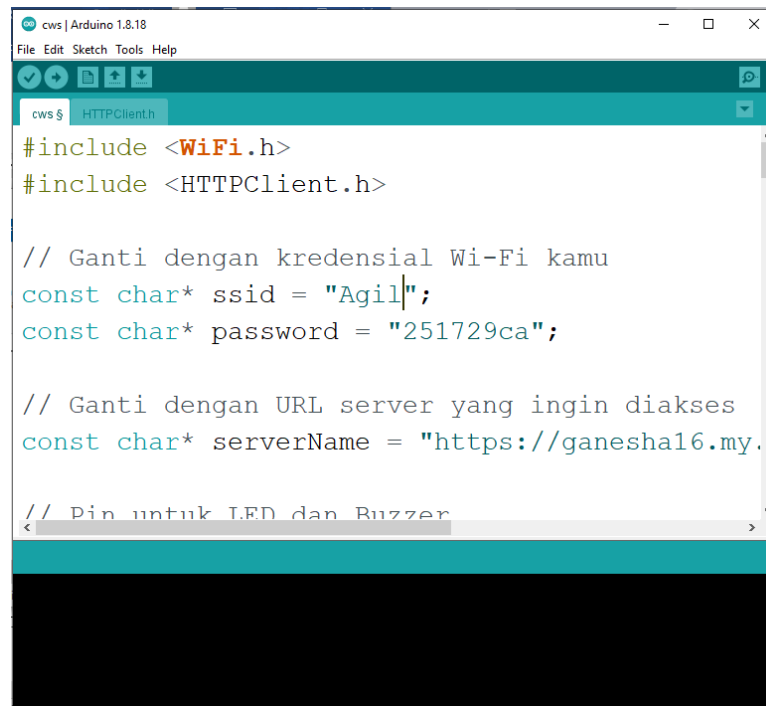
Setelah integrasi selesai, pengujian fungsional dilakukan untuk memeriksa kesesuaian keluaran aktual dengan kebutuhan sistem. Hasil pengujian digunakan sebagai dasar evaluasi dan penyempurnaan prototipe. Siklus perbaikan dihentikan ketika seluruh fungsi utama dapat berjalan sesuai rancangan.



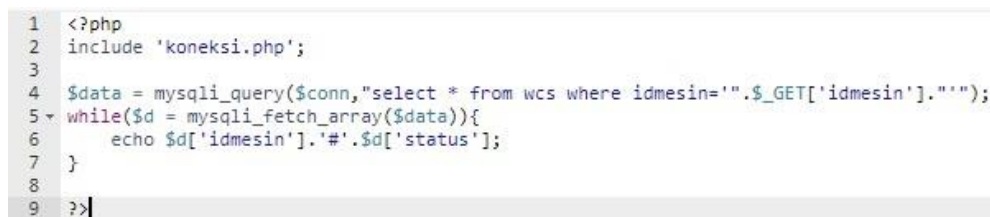
Gambar 3. Implementasi rangkaian prototipe



Gambar 4. *Casing* LED matrix P10



Gambar 5. Implementasi program pada Arduino IDE



Gambar 6. Integrasi server dengan mikrokontroler

3. Pengumpulan dan Pengujian Data

Data dikumpulkan melalui pengujian operasional prototipe pada lingkungan ruang kerja selama tiga hari secara kontinu. Data yang diperoleh berupa hasil *monitoring* kualitas udara dari sensor MQ-135 yang diproses oleh sistem dan dikirimkan menuju platform Ganesha16. Selama periode pengujian, sebanyak 1,090 rekaman berhasil diperoleh. Data tersebut digunakan untuk menghitung ringkasan nilai *Air Quality Index* (AQI) yang ditampilkan oleh sistem serta untuk mengevaluasi kontinuitas proses *monitoring*.

Pengujian fungsional dilakukan menggunakan Black Box Testing. Lima fungsi utama diuji, yaitu pembacaan sensor MQ-135, pengiriman data dari mikrokontroler ke server, tampilan LED Matrix P10, *monitoring* pada platform web, dan komunikasi sistem secara *real-time*. Setiap skenario dinyatakan berhasil apabila hasil aktual sesuai dengan keluaran yang ditetapkan pada rancangan. Pengujian ini digunakan untuk menilai fungsi sistem, bukan untuk menyatakan akurasi laboratorium sensor terhadap konsentrasi CO.

4. Analisis Data

Analisis dilakukan secara deskriptif. Hasil *monitoring* diringkaskan berdasarkan lama pengujian, jumlah data terekam, nilai rata-rata AQI, dan kategori kualitas udara yang dihasilkan

sistem. Keberhasilan fungsi sistem dianalisis dengan membandingkan keluaran aktual pada setiap skenario Black Box Testing terhadap keluaran yang diharapkan. Selain itu, pembahasan difokuskan pada konsistensi transmisi data, aksesibilitas informasi melalui dua media, keterbatasan sensor MQ-135, dan implikasi penerapan prototipe sebagai sistem pemantauan dini.

Interpretasi terhadap data sensor dibatasi pada indikator kualitas udara yang dihasilkan oleh prototipe. MQ-135 memiliki sensitivitas terhadap beberapa gas sehingga hasil penelitian tidak digunakan untuk menyatakan konsentrasi CO presisi. Pembatasan interpretasi ini penting agar evaluasi sistem tetap konsisten dengan karakteristik sensor dan tujuan penelitian sebagai pengembangan prototipe *monitoring* [12], [15].

Pada tahap analisis kebutuhan, fungsi sistem diturunkan dari alur penggunaan prototipe. Sensor harus menghasilkan masukan yang dapat dibaca pengendali. Pengendali harus mempertahankan koneksi jaringan, meneruskan data ke server, dan memperbarui tampilan lokal. LED Matrix P10 harus menampilkan informasi yang dapat dilihat pengguna di lokasi, sedangkan platform web harus menampilkan data yang dikirim oleh perangkat. *Buzzer* diposisikan sebagai komponen peringatan pada prototipe. Dari sisi non fungsional, sistem dirancang agar dapat beroperasi menggunakan jaringan *Wi-Fi* yang tersedia, mempertahankan penyajian data selama pengujian, dan menggunakan perangkat yang relatif mudah diperoleh. Pemisahan kebutuhan fungsional dan non fungsional digunakan agar pengujian tidak hanya memeriksa apakah perangkat menyala, tetapi juga apakah alur informasi dari sensor ke pengguna dapat diselesaikan.

Aliran data dimulai ketika program pada mikrokontroler diaktifkan dan koneksi *Wi-Fi* dibentuk. Setelah koneksi tersedia, nilai dari MQ-135 dibaca oleh program dan diproses sebagai data *monitoring*. Informasi kemudian digunakan untuk memperbarui media lokal dan dikirim ke alamat server Ganesha16 menggunakan mekanisme HTTP *client* pada program. Respons server digunakan untuk memastikan bahwa komunikasi dapat dilanjutkan pada siklus berikutnya. Proses ini dijalankan berulang selama sistem aktif. Struktur program tersebut sesuai dengan kebutuhan prototipe yang menggunakan komunikasi *request-response* sederhana. Pada implementasi ini, mekanisme komunikasi yang dievaluasi menggunakan pustaka HTTP *Client* dan URL *server* sehingga pertukaran data dilakukan melalui HTTP.

Pengujian Black Box disusun berdasarkan pasangan masukan, proses, keluaran yang diharapkan, dan keluaran aktual. Pada pengujian pembacaan sensor, keberhasilan ditentukan ketika sistem menerima nilai dari MQ-135. Pada pengujian komunikasi, keberhasilan ditentukan ketika data yang dikirim perangkat dapat diterima dan ditampilkan pada server. Pada pengujian LED Matrix P10, keberhasilan ditentukan ketika informasi *monitoring* muncul pada tampilan lokal. Pada pengujian platform web, keberhasilan ditentukan ketika pengguna dapat melihat data melalui Ganesha16. Pada pengujian *real-time*, keberhasilan ditentukan ketika data baru dapat memperbarui informasi selama sistem beroperasi. Definisi kriteria tersebut membuat status berhasil pada Tabel 3 memiliki dasar yang lebih jelas dibandingkan hanya menyatakan bahwa komponen berfungsi.

Pengujian selama tiga hari digunakan sebagai uji operasional awal terhadap prototipe. Selama periode tersebut, sistem menghasilkan 1,090 rekaman yang menjadi dasar ringkasan hasil. Rekaman digunakan untuk mengevaluasi kontinuitas fungsi *monitoring* dan menghitung nilai rata-rata AQI yang tersedia pada sistem. Analisis tidak digunakan untuk menghitung sensitivitas, selektivitas, atau galat konsentrasi CO karena selama pengujian tidak dilakukan perbandingan dengan alat referensi. Dengan demikian, parameter hasil yang dilaporkan dibatasi pada jumlah data, nilai AQI yang dihasilkan sistem, kategori kualitas udara, dan keberhasilan fungsi. Pembatasan ini penting agar metode evaluasi tetap sesuai dengan data yang tersedia.

Untuk meningkatkan perulangan prosedur, urutan operasi sistem dirumuskan secara sistematis sebagai berikut: inisialisasi perangkat; pembentukan koneksi *Wi-Fi*; pembacaan sensor MQ-135; pemrosesan nilai *monitoring*; pembaruan informasi pada LED Matrix P10; pengiriman data ke server Ganesha16 melalui HTTP; pemeriksaan hasil komunikasi; dan pengulangan siklus

selama perangkat aktif. Urutan tersebut menjadi dasar hubungan antara implementasi perangkat keras, program, dan skenario pengujian. Konfigurasi sensor mengikuti parameter yang diterapkan pada program prototipe selama pengujian, sedangkan interpretasi hasil dibatasi pada indikator kualitas udara yang dihasilkan sistem. Batas interpretasi ini digunakan karena penelitian tidak melakukan kalibrasi komparatif terhadap *reference instrument* untuk menentukan konsentrasi CO secara presisi.

Algoritma 1. Siklus Monitoring Sistem

- 1 Inisialisasi MQ-135, LED Matrix P10, dan koneksi jaringan
- 2 Hubungkan perangkat ke jaringan Wi-Fi
- 3 Baca nilai sensor MQ-135
- 4 Proses nilai sebagai data monitoring/AQI sesuai konfigurasi program
- 5 Perbarui informasi pada LED Matrix P10
- 6 Kirim data ke server Ganesha16 menggunakan HTTP client
- 7 Periksa respons komunikasi server
- 8 Ulangi langkah 3-7 selama sistem aktif

Struktur pengujian juga dibuat untuk memisahkan pengujian perangkat dari pengujian komunikasi. Pada tingkat perangkat, sensor, tampilan, *buzzer*, dan pengendali diperiksa berdasarkan keluaran yang muncul ketika sistem dijalankan. Pada tingkat komunikasi, koneksi *Wi-Fi* dan pertukaran data dengan server diperiksa dari kemampuan sistem mengirim dan menampilkan rekaman baru. Pemisahan ini membantu proses penelusuran kesalahan apabila salah satu fungsi gagal. Jika nilai sensor dapat dibaca tetapi tidak muncul pada *dashboard*, sumber masalah diarahkan pada jalur komunikasi atau server. Sebaliknya, apabila koneksi tersedia tetapi data masukan tidak terbaca, pemeriksaan diarahkan pada sensor dan antarmukanya. Pendekatan pengujian bertingkat tersebut sesuai dengan tujuan *Prototype* yang menempatkan evaluasi sebagai dasar perbaikan *iteratif* sebelum sistem dinyatakan memenuhi fungsi yang dirancang.

HASIL

Penelitian menghasilkan prototipe *monitoring* kualitas udara berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor MQ-135, ESP32, LED Matrix P10, *buzzer*, jaringan *Wi-Fi*, dan platform Ganesha16. Sistem dapat membaca data sensor, mengirimkan data ke server, menampilkan informasi secara lokal, serta menyediakan akses *monitoring* melalui web. Implementasi perangkat keras dan perangkat lunak telah ditunjukkan pada Gambar 3 sampai Gambar 6.

Pengujian operasional dilakukan selama tiga hari dan menghasilkan 1,090 rekaman. Rata-rata AQI yang diperoleh sebesar 41.84 dan dikategorikan baik berdasarkan kategori yang digunakan oleh sistem. Seluruh rekaman yang diperoleh dapat ditampilkan pada platform *monitoring* selama periode pengujian. Ringkasan hasil *monitoring* disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil *monitoring* kualitas udara

Parameter	Hasil
Lama pengujian	3 hari
Jumlah data terekam	1,090 rekaman
Rata-rata AQI	41.84
Kategori kualitas udara	Baik
Status pengiriman data	Data <i>monitoring</i> berhasil ditampilkan pada platform

Pengujian fungsional menunjukkan bahwa lima fungsi utama sistem berjalan sesuai rancangan. Hasil pengujian objektif disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian fungsional sistem

No.	Skenario	Hasil yang diharapkan	Hasil aktual	Status
1	Pembacaan sensor MQ-135	Data sensor terbaca	Data sensor terbaca oleh sistem	Berhasil
2	Pengiriman data ke server	Data diterima server	Data diterima dan ditampilkan	Berhasil
3	Tampilan LED Matrix P10	Informasi tampil lokal	Informasi tampil pada LED Matrix	Berhasil
4	<i>Monitoring</i> platform web	Data dapat diakses	Data tampil pada Ganesha16	Berhasil
5	Komunikasi <i>real-time</i>	Pembaruan data berlangsung	Data diperbarui selama <i>monitoring</i>	Berhasil

Implementasi perangkat keras menunjukkan bahwa rangkaian prototipe dapat ditempatkan bersama LED Matrix P10 dan catu daya dalam satu unit. Susunan tersebut memungkinkan media informasi lokal beroperasi sebagai bagian dari sistem, bukan sebagai perangkat terpisah. Pada sisi perangkat lunak, program berhasil membentuk koneksi jaringan dan mengirimkan data menuju server yang telah ditentukan. Hasil ini sesuai dengan tujuan implementasi, yaitu memastikan jalur akuisisi sensor, pemrosesan, komunikasi, dan penyajian informasi dapat dijalankan pada satu prototipe. Bagian hasil hanya melaporkan keluaran yang diperoleh selama pengujian, sedangkan interpretasi terhadap makna dan keterbatasannya dibahas pada bagian Pembahasan.

Tabel 2 memperlihatkan bahwa pengujian menghasilkan 1,090 rekaman selama tiga hari dengan rata-rata AQI 41.84. Data tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan rangkaian pengamatan yang dapat diringkas selama periode operasional. Tabel 3 menunjukkan seluruh skenario fungsional berstatus berhasil. Keberhasilan pembacaan sensor menunjukkan ketersediaan data masukan, keberhasilan komunikasi server menunjukkan jalur transmisi dapat digunakan, dan keberhasilan LED Matrix serta platform web menunjukkan keluaran dapat diterima melalui dua media. Hasil ini tidak digunakan untuk menyimpulkan tingkat akurasi sensor karena pengujian tidak membandingkan nilai sensor dengan alat ukur referensi.

Hasil pada tahap ini juga menunjukkan bahwa evaluasi prototipe perlu mempertahankan keterkaitan antara tujuan, metode, dan indikator. Tujuan penelitian adalah membangun dan mengevaluasi sistem *monitoring*, sehingga indikator utama harus menggambarkan fungsi akuisisi, komunikasi, penyajian, dan kontinuitas data. Nilai AQI digunakan sebagai informasi kondisi lingkungan selama pengujian, bukan sebagai satu-satunya indikator keberhasilan sistem. Kerangka evaluasi tersebut membuat hasil lebih mudah ditelusuri kembali ke tujuan penelitian dan mengurangi risiko kesimpulan yang melampaui data yang tersedia.

PEMBAHASAN

Hasil pengujian selama tiga hari menunjukkan bahwa prototipe mampu menjalankan rantai proses *monitoring* dari akuisisi sensor sampai penyajian informasi. Sebanyak 1,090 rekaman

berhasil diperoleh dengan rata-rata AQI 41.84. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kondisi udara pada lokasi pengujian berada dalam kategori baik selama periode observasi berdasarkan klasifikasi yang digunakan pada sistem. Temuan ini perlu dipahami sebagai gambaran kondisi pada ruang dan periode pengujian, bukan sebagai representasi umum untuk seluruh lingkungan kerja. Durasi tiga hari belum cukup untuk menangkap variasi harian, perubahan jumlah penghuni, pola ventilasi, maupun perubahan sumber pencemar dalam jangka panjang.

Keberhasilan lima skenario Black Box Testing menunjukkan bahwa integrasi perangkat keras dan perangkat lunak telah memenuhi kebutuhan fungsional dasar. Sensor memberikan data masukan, mikrokontroler menjalankan proses akuisisi dan komunikasi, LED Matrix P10 menyediakan informasi di lokasi, sedangkan platform Ganesha16 menyediakan akses jarak jauh. Kontribusi utama prototipe terletak pada kombinasi dua saluran penyajian informasi tersebut. Berbeda dari pendekatan yang hanya menempatkan informasi pada aplikasi personal atau *dashboard*, LED Matrix P10 dapat dilihat langsung oleh pengguna di ruang kerja tanpa membuka perangkat tambahan. Pada saat yang sama, platform web mempertahankan kemampuan *monitoring* dari lokasi berbeda.

Temuan ini mendukung penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa ESP32 dan sensor kualitas udara dapat digunakan untuk membangun sistem *monitoring* berbasis IoT [2], [6], [9], [10]. *Muttaqin et al.* [7] menunjukkan pemanfaatan MQ-135 dan sensor lingkungan untuk *monitoring* daring, sedangkan sistem berbasis aplikasi Android menekankan akses data melalui perangkat bergerak [14]. Penelitian ini tidak menggantikan fungsi pendekatan tersebut, tetapi memodifikasi pola penyajian informasi dengan menambahkan media lokal berukuran besar yang beroperasi bersama *monitoring* web. Dengan demikian, kebaruan yang ditawarkan lebih tepat ditempatkan pada arsitektur penyampaian informasi daripada pada penggunaan MQ-135 atau ESP32 secara individual.

Dari sisi komunikasi, implementasi program menunjukkan penggunaan konektivitas *Wi-Fi* dan HTTP *client* untuk mengirimkan data menuju server. Mekanisme ini sesuai dengan kebutuhan prototipe yang memerlukan pertukaran data sederhana antara mikrokontroler dan platform web. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa protokol komunikasi IoT, termasuk HTTP maupun MQTT, dapat dipilih sesuai kebutuhan keandalan, *overhead*, dan pola pertukaran data [8], [11]. Pada penelitian ini, evaluasi belum mencakup *latency*, *packet loss*, *throughput*, atau *availability* sehingga klaim kinerja komunikasi dibatasi pada keberhasilan fungsi pengiriman dan pembaruan data selama pengujian.

Keterbatasan penting terdapat pada karakteristik MQ-135. Sensor ini merespons lebih dari satu jenis gas sehingga nilai yang dihasilkan tidak dapat langsung dianggap sebagai konsentrasi CO dengan akurasi instrumen referensi. Penggunaan *multisensor* direkomendasikan untuk mengurangi keterbatasan sensitivitas silang dan memperluas identifikasi polutan [12], [15]. Oleh karena itu, prototipe pada penelitian ini lebih tepat diposisikan sebagai *early monitoring system* yang memberikan indikasi perubahan kualitas udara. Untuk validasi konsentrasi CO, penelitian lanjutan perlu menggunakan sensor yang lebih selektif, seperti MQ-7 atau sensor elektrokimia, serta membandingkan hasil terhadap instrumen referensi.

Hasil penelitian juga memiliki keterbatasan pada desain evaluasi. Data hanya diperoleh dari satu lingkungan kerja selama tiga hari dan analisis masih bersifat deskriptif. Penelitian berikutnya perlu memperpanjang durasi pengujian, menggunakan beberapa lokasi dengan karakteristik ventilasi berbeda, merekam suhu dan kelembapan sebagai variabel lingkungan, serta melaporkan nilai minimum, maksimum, standar deviasi, dan pola *time-series*. Pengembangan dapat dilanjutkan dengan klasifikasi berbasis *fuzzy logic* [13], notifikasi seluler, evaluasi kualitas layanan komunikasi, dan validasi sensor menggunakan *reference meter*. Perbaikan tersebut akan meningkatkan validitas teknis dan memperjelas batas penerapan sistem.

Tabel 4. Perbandingan Fokus Penyajian Informasi dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian	Sensor/Perangkat	Media Informasi	Karakteristik Utama
[2]	MQ-135, MQ-7, ESP32	LCD dan Telegram	<i>Monitoring</i> dan notifikasi personal
[7]	MQ-135, DHT11	<i>Monitoring</i> daring	Pemantauan kualitas udara berbasis IoT
[14]	Sistem IoT	Aplikasi Android	Visualisasi melalui perangkat bergerak
Penelitian ini	MQ-135, ESP32	LED Matrix P10 dan web	Informasi lokal dan jarak jauh secara simultan

Perbedaan antara keberhasilan fungsi dan akurasi pengukuran merupakan aspek penting dalam menilai hasil. Status berhasil pada Black Box Testing membuktikan bahwa sistem merespons skenario sesuai rancangan, tetapi tidak membuktikan bahwa nilai AQI atau konsentrasi gas memiliki galat rendah. Pemisahan ini membuat interpretasi hasil lebih proporsional. Pada sistem *monitoring* lingkungan, dua tingkat evaluasi idealnya dilakukan secara terpisah. Tingkat pertama mengevaluasi integrasi perangkat dan kualitas komunikasi. Tingkat kedua mengevaluasi validitas sensor terhadap *reference instrument*. Penelitian ini baru memenuhi tingkat pertama dan menyediakan indikasi deskriptif pada tingkat kedua melalui nilai AQI. Oleh karena itu, kontribusi artikel lebih kuat apabila dinyatakan sebagai pengembangan dan evaluasi fungsional sistem *monitoring*, bukan sebagai validasi instrumen pengukuran CO.

Dari perspektif penggunaan, media lokal memberikan manfaat ketika informasi perlu diketahui oleh beberapa orang dalam ruang yang sama. *Dashboard* atau aplikasi personal mengharuskan pengguna membuka perangkat, masuk ke layanan, atau memperhatikan notifikasi. LED Matrix P10 mengurangi langkah tersebut karena informasi dapat dipasang sebagai tampilan bersama. Sebaliknya, media lokal tidak dapat menggantikan *monitoring* jarak jauh ketika pengelola tidak berada di lokasi. Integrasi kedua media menutup kelemahan masing-masing pendekatan. Nilai praktis ini menjadi pembeda yang lebih jelas dibandingkan hanya menyebut integrasi sensor dan mikrokontroler, karena kombinasi MQ-135 dan pengendali IoT telah banyak digunakan pada penelitian sebelumnya.

Kualitas evaluasi berikutnya dapat ditingkatkan melalui indikator kuantitatif yang lebih spesifik. Pada sisi sensor, penelitian dapat melaporkan MAE, RMSE, koefisien korelasi, dan *error* relatif terhadap alat referensi. Pada sisi komunikasi, *latency* pengiriman, *packet loss*, *availability*, dan waktu pemulihan koneksi dapat diukur. Pada sisi data lingkungan, distribusi nilai, minimum, maksimum, standar deviasi, pola per jam, dan perubahan antar hari dapat disajikan. Pada sisi penggunaan, waktu keterbacaan informasi dan respons pengguna terhadap peringatan dapat dievaluasi. Penambahan indikator tersebut akan mengubah evaluasi dari sekadar fungsi berhasil menjadi pengukuran performa yang lebih komprehensif dan dapat dibandingkan dengan penelitian lain.

Implikasi hasil juga perlu dilihat dari konteks keselamatan kerja. Sistem tidak dirancang untuk menggantikan detektor gas tersertifikasi, tetapi dapat berfungsi sebagai lapisan informasi awal yang meningkatkan kesadaran terhadap perubahan kondisi udara. Pada penerapan nyata, indikator lokal dapat ditempatkan di area yang mudah terlihat, sedangkan *dashboard* digunakan oleh pengelola untuk memeriksa kondisi dari luar ruang. Agar sistem dapat digunakan untuk keputusan keselamatan yang lebih kritis, *threshold* peringatan harus ditetapkan berdasarkan sensor yang telah dikalibrasi dan acuan yang relevan. Dengan demikian, tahapan pengembangan

berikutnya bukan hanya menambah fitur, tetapi juga memperkuat validitas pengukuran, keandalan komunikasi, dan prosedur respons ketika kondisi udara melewati batas yang ditentukan.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian ini menghasilkan sistem *monitoring* kualitas udara ruang kerja berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor MQ-135, ESP32, LED Matrix P10, *buzzer*, konektivitas *Wi-Fi*, dan platform Ganesha16. Pengujian selama tiga hari menghasilkan 1,090 rekaman dengan rata-rata AQI 41.84 pada kategori baik. Lima skenario pengujian fungsional berhasil dijalankan, yaitu pembacaan sensor, pengiriman data, tampilan LED Matrix P10, *monitoring* web, dan komunikasi *real-time*. Kontribusi utama penelitian terletak pada integrasi penyajian informasi lokal dan *monitoring* jarak jauh dalam satu arsitektur sehingga informasi dapat diakses langsung di ruang kerja maupun melalui platform web.

MQ-135 memiliki sensitivitas silang terhadap beberapa gas sehingga sistem lebih tepat digunakan sebagai perangkat pemantauan dini kualitas udara daripada instrumen pengukuran CO presisi. Penelitian berikutnya direkomendasikan menggunakan sensor CO yang lebih selektif dan instrumen referensi untuk proses kalibrasi, memperpanjang pengujian pada beberapa ruang, menambahkan analisis statistik dan *time-series*, serta mengukur *latency* dan kehilangan data komunikasi. Pengembangan *multisensor*, notifikasi otomatis, dan metode klasifikasi dapat digunakan untuk meningkatkan kemampuan sistem dalam memberikan peringatan yang lebih spesifik dan terukur.

REFERENSI

- [1] R. Firmansyah and M. Ariandi, "Design of a Real-Time IoT-Based Air Quality, Temperature, and Humidity Monitoring System," *bit-Tech*, vol. 8, no. 2, 2025, doi: 10.32877/bt.v8i2.3114.
- [2] L. Hanum and Elfizon, "Rancang Bangun Pemantau Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis Internet Of Things," *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 4, no. 2, pp. 619–624, 2023, doi: 10.24036/jtein.v4i2.473.
- [3] F. A. D. Cahyono and D. Irawan, "Rancang Bangun Sistem Pemantauan dan Kontrol Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis IoT," *ELKOM: Jurnal Elektronika dan Komputer*, vol. 17, no. 2, pp. 468–476, 2024, doi: 10.51903/elkom.v17i2.2208.
- [4] A. Fikri, M. Ridwan, and D. Agustine, "Implementation Of Internet Of Things (IOT) In Air Quality Monitoring (AQI)," *Jurnal Ilmiah Sistem Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 5, no. 2, pp. 424–443, 2025, doi: 10.55606/juisik.v5i2.1326.
- [5] M. Kamran, H. Salahuddin, I. Kashif, U. Bashir, A. Danish, and A. U. Rehman, "Air Quality and Carbon Monoxide Monitoring Using IoT-Based System," *Journal of Computing and Biomedical Informatics*, vol. 7, no. 1, pp. 476–483, 2024.
- [6] F. N. R. D. Haq and K. D. Irianto, "Indoor Air Quality System: A Design of Monitoring CO and CO2 Substances for Elderly Home Using IoT," *The Indonesian Journal of Computer Science*, vol. 13, no. 5, 2024, doi: 10.33022/ijcs.v13i5.4408.
- [7] 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, 2024, doi: 10.14710/jplp.6.2.102-115.
- [8] M. Ivković, N. Davidović, J. Kevrić, M. Ninković, and N. Kukrić, "IoT System for Indoor Air Quality Monitoring in Accordance with European and International Standards," *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, vol. 9, no. 2, pp. 62–77, 2025, doi: 10.7251/IJEEC2502062I.

- [9] D. M. Pineda-Tobón, A. Espinosa-Bedoya, and J. W. Branch-Bedoya, “Aquality32: A Low-Cost, Open-Source Air Quality Monitoring Device Leveraging the ESP32 and Google Platform,” *HardwareX*, vol. 20, p. e00607, 2024, doi: 10.1016/j.ohx.2024.e00607.
- [10] A. Yadav, P. Kumar, R. Singh, and V. Sharma, “Web-Based IoT Air Quality Monitoring System for Smart Indoor Environments,” *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 1423–1432, 2024, doi: 10.18280/ijisae.120415.
- [11] H. B. Surbakti, J. G. A. Ginting, S. Romadhona, M. B. Ginting, and K. Ni’amah, “Sistem Monitoring Kualitas Udara Ruangan dengan Protokol MQTT Berbasis Internet of Things,” *Jurnal SINTA: Sistem Informasi dan Teknologi Komputasi*, vol. 1, no. 3, pp. 129–137, 2024, doi: 10.61124/sinta.v1i3.25.
- [12] A. S. Anugrah, Y. Wijanarko, and T. Prasetyo, “Sistem Monitoring dan Evaluasi Kualitas Udara Dapur Berbasis IoT Menggunakan Multi-Sensor, ON-OFF Histeresis, dan Random Forest,” *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Elektro dan Komputer*, vol. 6, no. 2, pp. 466–477, 2026, doi: 10.51903/juritek.v6i2.7521.
- [13] A. Tandana, A. Ridwan, T. Della Angelica, C. E. Tannesia, and R. Winson, “Sistem Monitoring Kualitas Udara Ruangan Berbasis IoT Dengan Algoritma Fuzzy Logic,” *JURIKOM (Jurnal Riset Komputer)*, vol. 13, no. 3, 2026, doi: 10.30865/jurikom.v13i3.9796.
- [14] A. N. Dimyati, Purwantoro, and A. Primajaya, “Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Internet of Things (IoT) dengan Visualisasi Data pada Aplikasi Android (Studi Kasus: PT. South Pacific Viscose),” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3, 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3.6900.
- [15] R. Sangeetha, S. Kumar, and M. Priya, “Smart Air Monitoring with IoT-Based MQ-2, MQ-7, MQ-8, and MQ-135 Sensors Using NodeMCU ESP32,” *Procedia Computer Science*, vol. 245, pp. 815–824, 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.10.308.