

Implementasi dan Evaluasi Kinerja Sistem IoT *Multi-Sensor* Berbasis ESP32 untuk Pemantauan dan Peringatan Dini Lingkungan secara *Real-Time*

¹Arif Setia Sandi Ariyanto, ²Deny Nugroho Triwibowo,

³Imam Ahmad Ashari, ⁴Rito Cipta Sigitta Haryono

^{1,2,3}Universitas Harapan Bangsa Purwokerto, Indonesia

⁴Universitas Bhamada Slawi, Indonesia

¹arifsetia@uhb.ac.id, ²denynugroho@uhb.ac.id, ³imamahmadashari@uhb.ac.id, ⁴rintocipta@bhamada.ac.id

Article Info

Article history:

Received, 2026-01-06

Revised, 2026-01-22

Accepted, 2026-01-23

Kata Kunci:

IoT,
Mobile,
Multi-sensor

Keywords:

IoT,
Mobile,
Multi-sensor,

ABSTRAK

Pemantauan kondisi lingkungan secara *real-time* menjadi kebutuhan penting seiring meningkatnya aktivitas urban dan industri yang berdampak pada kualitas udara, tingkat kebisingan, serta stabilitas lingkungan fisik. Namun, sebagian besar sistem pemantauan yang tersedia masih relatif mahal, kurang portabel, dan terbatas pada fungsi monitoring pasif tanpa evaluasi kinerja yang jelas. Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan dan mengevaluasi kinerja sistem pemantauan lingkungan berbasis *Internet of Things* (IoT) *multi-sensor* yang terintegrasi dengan aplikasi *mobile* dan fitur peringatan dini secara *real-time*. Sistem dikembangkan menggunakan *mikrokontroler* ESP32 yang terhubung dengan sensor DHT22, MQ135, SW-420, dan KY-037 untuk memantau parameter suhu, kelembapan, kualitas udara, getaran, dan kebisingan lingkungan. Data sensor dikirimkan ke server melalui RESTful API, disimpan dalam basis data MySQL, dan divisualisasikan secara *real-time* melalui aplikasi *mobile* berbasis Flutter. Metode penelitian menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) yang meliputi analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi, integrasi, dan pengujian fungsional. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan data *multi-sensor* secara stabil dengan waktu respons yang rendah, menampilkan informasi lingkungan secara *real-time*, serta mengirimkan notifikasi peringatan dini secara konsisten ketika parameter lingkungan melewati nilai ambang batas yang ditetapkan. Penelitian ini berkontribusi dalam penyajian evaluasi kinerja sistem *IoT multi-sensor* yang aplikatif, mudah direplikasi, dan sesuai untuk pemantauan lingkungan pada skala kecil.

ABSTRACT

Real-time environmental monitoring has become increasingly important due to growing urban and industrial activities that affect air quality, noise levels, and physical environmental stability. However, many existing monitoring systems remain relatively expensive, lack portability, and are limited to passive monitoring functions without clear performance evaluation. This study aims to implement and evaluate the performance of an Internet of Things (IoT)-based multi-sensor environmental monitoring system integrated with a mobile application and real-time early warning features. The system is developed using an ESP32 microcontroller connected to DHT22, MQ135, SW-420, and KY-037 sensors to monitor temperature, humidity, air quality, vibration, and noise levels. Sensor data are transmitted to a server via a RESTful API, stored in a MySQL database, and visualized in real time through a Flutter-based mobile application. The research adopts a Research and Development (R&D) approach, encompassing requirement analysis, system design, implementation, integration, and functional testing. The experimental results indicate that the system can transmit multi-sensor data reliably with low response time, present environmental information in real time, and consistently deliver early warning notifications when environmental parameters exceed the defined threshold values. This study contributes by providing a practical and replicable performance evaluation of an IoT-based multi-sensor system suitable for small-scale environmental monitoring.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) license.



Penulis Korespondensi:

Arif Setia Sandi Ariyanto,
Fakultas Sains dan Teknologi,
Universitas Harapan Bangsa,
Email: arifsetia@uhb.ac.id

1. PENDAHULUAN

Perkembangan aktivitas urbanisasi dan industri dalam beberapa tahun terakhir telah meningkatkan tekanan terhadap kualitas lingkungan, khususnya terkait suhu dan kelembapan udara, pencemaran gas berbahaya, kebisingan, serta gangguan fisik berupa getaran [1]. Kondisi lingkungan yang tidak terpantau dengan baik berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia, kenyamanan aktivitas, dan keberlanjutan lingkungan di wilayah permukiman maupun fasilitas public [2]. Oleh karena itu, pemantauan kondisi lingkungan secara *real-time* menjadi kebutuhan penting [3], tidak hanya bagi instansi pemerintah, tetapi juga bagi institusi pendidikan, kawasan permukiman, dan lingkungan kerja berskala kecil.

Sistem pemantauan lingkungan konvensional umumnya mengandalkan perangkat dengan biaya relatif tinggi, instalasi yang kompleks, serta akses data yang terbatas pada pihak tertentu. Selain itu, banyak sistem yang hanya berfungsi sebagai alat monitoring pasif tanpa dukungan analisis lanjutan untuk membantu pengguna dalam memahami potensi risiko lingkungan. Keterbatasan ini menyebabkan informasi lingkungan yang dihasilkan kurang efektif sebagai dasar pengambilan keputusan secara cepat dan tepat [4].

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) membuka peluang untuk membangun sistem pemantauan lingkungan yang lebih fleksibel, portabel, dan terjangkau. Dengan memanfaatkan mikrokontroler berdaya rendah seperti ESP32 dan sensor lingkungan yang mudah diperoleh, data lingkungan dapat dikumpulkan secara kontinu dan dikirimkan melalui jaringan nirkabel ke server untuk diolah lebih lanjut. Integrasi IoT dengan aplikasi mobile memungkinkan informasi lingkungan disajikan secara *real-time* dalam bentuk visual yang mudah dipahami oleh pengguna umum [5].

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT, baik untuk pemantauan kualitas udara, suhu, maupun kelembapan. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada penggunaan satu atau dua jenis sensor, serta terbatas pada penyajian data secara deskriptif melalui antarmuka web atau aplikasi lokal [6]. Integrasi multi-sensor dalam satu sistem terpadu dan penerapan mekanisme peringatan dini berbasis analisis data masih relatif terbatas, terutama pada sistem yang ditujukan untuk penggunaan praktis di lingkungan berskala kecil.

Di sisi lain, penerapan analitik prediktif sederhana pada sistem IoT berpotensi memberikan nilai tambah yang signifikan [7]. Dengan memanfaatkan data historis dan aturan tertentu, sistem tidak hanya mampu menampilkan kondisi lingkungan saat ini, tetapi juga memberikan indikasi awal ketika parameter lingkungan mendekati atau melewati batas aman. Pendekatan ini mendukung konsep lingkungan cerdas yang bersifat adaptif dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan [8].

Berdasarkan tinjauan terhadap penelitian terdahulu, sebagian besar sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT masih berfokus pada penyajian data monitoring secara deskriptif dengan jumlah parameter lingkungan yang terbatas, serta minim pelaporan evaluasi kinerja sistem secara terukur. Beberapa penelitian telah mengimplementasikan sensor lingkungan dan integrasi aplikasi, namun umumnya belum membahas secara eksplisit aspek kestabilan pengiriman data, waktu respons sistem, serta efektivitas mekanisme peringatan dini dalam kondisi penggunaan nyata, khususnya pada lingkungan berskala kecil. Selain itu, pendekatan analitik yang digunakan pada banyak studi masih terbatas pada pemantauan pasif tanpa mekanisme deteksi awal kondisi lingkungan berisiko yang terintegrasi secara langsung dengan aplikasi mobile.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk (1) mengimplementasikan sistem pemantauan lingkungan berbasis *Internet of Things* (IoT) multi-sensor menggunakan ESP32 yang terintegrasi dengan aplikasi *mobile*, serta (2) mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan kestabilan pengiriman data, waktu respon sistem, dan keberhasilan fungsi peringatan dini berbasis ambang batas. Dengan perumusan tujuan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi berupa evaluasi kinerja sistem IoT multi-sensor yang aplikatif, mudah direplikasi, dan relevan untuk pemantauan lingkungan pada skala kecil.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) yang berfokus pada perancangan, pengembangan, dan pengujian sistem pemantauan lingkungan berbasis *Internet of Things* (IoT). Pendekatan ini dipilih karena tujuan utama penelitian adalah menghasilkan prototipe sistem yang fungsional dan dapat diuji

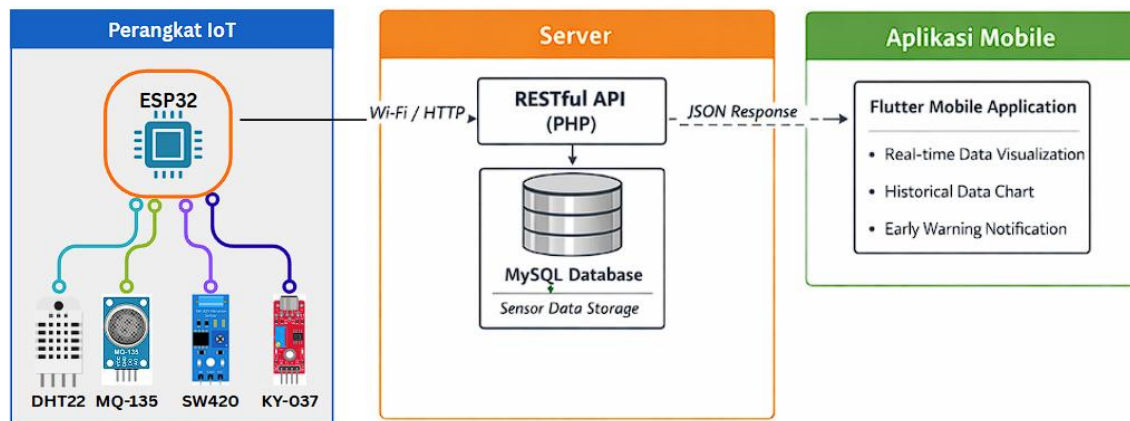
dalam konteks penggunaan nyata [11]. Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis mulai dari analisis kebutuhan hingga evaluasi sistem [12].

Analisis Kebutuhan

Tahap analisis kebutuhan dilakukan untuk mengidentifikasi parameter lingkungan yang relevan serta kebutuhan fungsional sistem. Parameter yang dipantau meliputi suhu dan kelembapan udara, kualitas udara, tingkat kebisingan, dan getaran lingkungan. Kebutuhan sistem mencakup kemampuan membaca data dari beberapa sensor secara simultan, mengirimkan data secara real-time ke server, menampilkan data melalui aplikasi mobile, serta memberikan peringatan dini ketika nilai parameter melewati ambang batas tertentu.

Perancangan Sistem

Perancangan sistem mencakup arsitektur perangkat keras dan perangkat lunak yang saling terintegrasi. Pada sisi perangkat keras, sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengolahan data [13]. ESP32 dipilih karena memiliki modul Wi-Fi terintegrasi dan konsumsi daya yang relatif rendah [14]. Empat jenis sensor digunakan, yaitu DHT22 untuk pengukuran suhu dan kelembapan, MQ135 untuk deteksi kualitas udara, SW-420 untuk deteksi getaran, dan KY-037 untuk pengukuran tingkat kebisingan. Seluruh sensor dihubungkan langsung ke ESP32 dan dikonfigurasi untuk melakukan pembacaan data secara periodik.



Gambar 1 Arsitektur Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis IoT

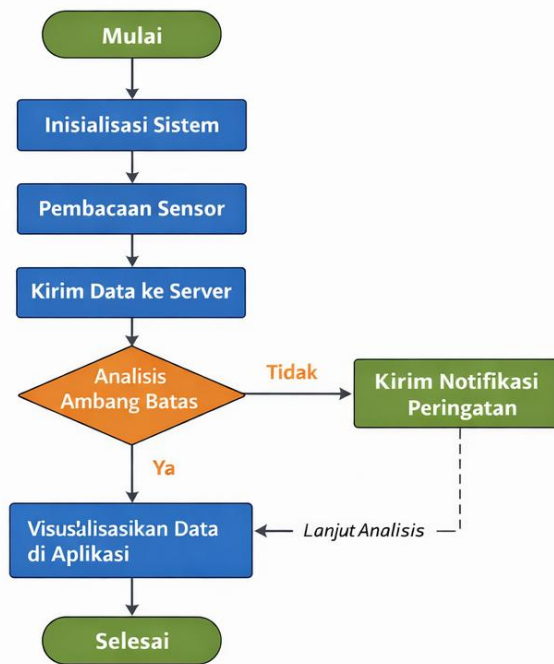
Pada sisi perangkat lunak, arsitektur sistem terdiri dari tiga komponen utama, yaitu backend server, aplikasi mobile, dan modul analitik. Backend server dibangun menggunakan basis data MySQL dan RESTful API berbasis PHP untuk menerima, menyimpan, dan menyediakan data sensor. Aplikasi mobile dikembangkan menggunakan framework Flutter untuk menampilkan data lingkungan secara real-time dalam bentuk indikator dan grafik. Arsitektur ini memungkinkan pemisahan yang jelas antara proses akuisisi data, pengolahan data, dan visualisasi.

Implementasi Sistem

Tahap implementasi dilakukan berdasarkan rancangan sistem yang telah disusun. Perangkat IoT dirakit dengan mengintegrasikan ESP32 dan seluruh sensor lingkungan, kemudian diprogram untuk membaca data sensor dan mengirimkannya ke server melalui koneksi Wi-Fi menggunakan protokol HTTP. Data yang dikirimkan meliputi nilai sensor dan waktu pengukuran.

Backend server diimplementasikan untuk menangani proses penerimaan data, penyimpanan ke dalam basis data, serta penyediaan data bagi aplikasi mobile melalui API [15]. Aplikasi mobile Flutter dikembangkan untuk menampilkan data lingkungan secara real-time, menampilkan riwayat data, serta menerima notifikasi peringatan dini ketika kondisi lingkungan terdeteksi berisiko.

Sistem dilengkapi dengan modul analitik prediktif sederhana untuk mendukung fungsi peringatan dini. Pendekatan yang digunakan bersifat ringan, berupa aturan berbasis ambang batas dan klasifikasi sederhana berdasarkan data historis. Setiap parameter lingkungan dibandingkan dengan nilai batas aman yang telah ditentukan. Apabila nilai parameter melebihi ambang batas atau menunjukkan pola peningkatan yang signifikan, sistem akan menandai kondisi tersebut sebagai berisiko dan mengirimkan notifikasi peringatan kepada pengguna melalui aplikasi mobile.



Gambar 2 Diagram Alir Proses Pemantauan dan Peringatan Dini

Pendekatan ini dipilih karena sesuai untuk sistem IoT berskala kecil yang memerlukan proses komputasi ringan namun tetap memberikan informasi yang bermakna bagi pengguna.

Tabel 1 Spesifikasi Komponen Sistem

No Komponen	Jenis	Fungsi dalam Sistem
1 Mikrokontroler	ESP32	Mengolah data dari seluruh sensor dan mengirimkan data ke server melalui koneksi Wi-Fi
2 Sensor Suhu & Kelembapan	DHT22	Mengukur kondisi suhu dan kelembapan lingkungan
3 Sensor Kualitas Udara	MQ135	Mendeteksi kandungan gas berbahaya dan kualitas udara lingkungan
4 Sensor Getaran	SW-420	Mendeteksi getaran fisik pada lingkungan sekitar
5 Sensor Kebisingan	KY-037	Mengukur tingkat kebisingan lingkungan
6 <i>Server Backend</i>	PHP + RESTful API	Menerima, memproses, dan menyediakan data sensor
7 Basis Data	MySQL	Menyimpan data hasil pembacaan sensor secara terstruktur
8 Aplikasi <i>Mobile</i>	Flutter	Menampilkan data real-time, data historis, dan notifikasi peringatan dini

Pengujian dan Evaluasi Sistem

Tahap pengujian dilakukan untuk memastikan fungsionalitas dan keandalan sistem secara keseluruhan. Pengujian meliputi pengujian akurasi pembacaan sensor, kestabilan komunikasi data antara perangkat IoT dan server, serta respons aplikasi mobile dalam menampilkan data dan notifikasi. Evaluasi dilakukan melalui uji coba sistem pada skenario lingkungan terbatas untuk mengamati kinerja sistem dalam kondisi nyata. Hasil pengujian digunakan sebagai dasar evaluasi untuk menilai apakah sistem telah memenuhi kebutuhan yang ditetapkan serta untuk mengidentifikasi perbaikan yang diperlukan sebelum sistem dinyatakan siap digunakan sebagai prototipe pemantauan lingkungan.

Kriteria Evaluasi Kinerja dan Validasi Sistem

Evaluasi kinerja sistem dilakukan untuk menilai keberhasilan implementasi sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT secara fungsional dan operasional. Kriteria evaluasi yang digunakan dalam penelitian ini meliputi kestabilan pengiriman data sensor, waktu respons sistem, serta keberhasilan fungsi peringatan dini. Kestabilan pengiriman data dievaluasi berdasarkan kemampuan sistem dalam mengirimkan data multi-sensor secara kontinu ke server tanpa kehilangan data pada kondisi jaringan normal. Waktu respons sistem diukur sebagai selang waktu antara proses pembacaan data sensor pada perangkat IoT hingga data tersebut ditampilkan pada aplikasi mobile. Keberhasilan fungsi peringatan dini dievaluasi berdasarkan kemampuan sistem dalam

mengirimkan notifikasi kepada pengguna ketika nilai parameter lingkungan melewati ambang batas yang telah ditentukan.

Validasi sensor dalam penelitian ini dilakukan secara fungsional, dengan mengamati respons sensor terhadap perubahan kondisi lingkungan yang terkontrol selama proses pengujian. Pendekatan ini digunakan untuk memastikan bahwa setiap sensor mampu mendeteksi perubahan parameter lingkungan dan mengirimkan data secara konsisten ke sistem *backend*. Penelitian ini tidak melakukan kalibrasi sensor terhadap alat ukur standar laboratorium, sehingga hasil pengukuran difokuskan pada evaluasi performa sistem secara keseluruhan, bukan pada akurasi absolut masing-masing sensor. Pendekatan tersebut dinilai sesuai dengan tujuan penelitian yang menitikberatkan pada pengembangan dan evaluasi kinerja sistem IoT multi-sensor untuk pemantauan lingkungan skala kecil.

3. HASIL DAN ANALISIS

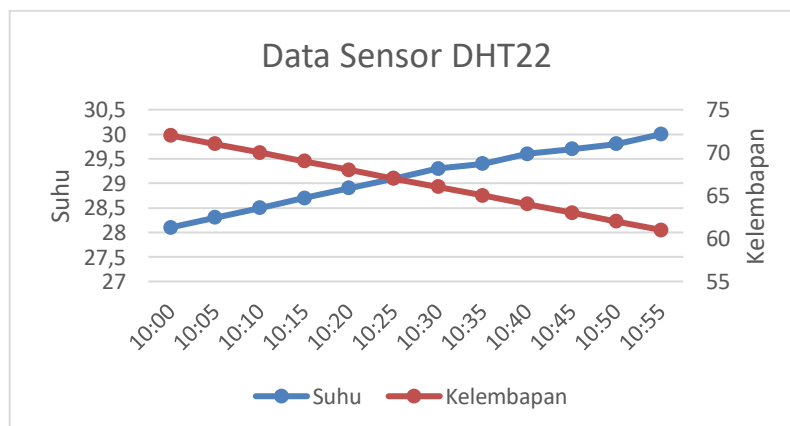
Hasil Implementasi Sistem

Sistem pemantauan lingkungan berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dikembangkan telah berhasil diimplementasikan sesuai dengan rancangan arsitektur dan diagram alir proses. Perangkat IoT berbasis ESP32 mampu terhubung dengan seluruh sensor, yaitu DHT22, MQ135, SW-420, dan KY-037, serta melakukan pembacaan data lingkungan secara periodik. Data hasil pembacaan sensor kemudian dikirimkan ke server backend melalui koneksi Wi-Fi menggunakan mekanisme RESTful API. Pada sisi server, data yang diterima berhasil disimpan ke dalam basis data MySQL tanpa kehilangan data selama proses pengujian. Selanjutnya, data tersebut dapat diakses oleh aplikasi mobile berbasis Flutter dan ditampilkan dalam bentuk informasi lingkungan secara *real-time*. Aplikasi *mobile* juga mampu menampilkan data historis dalam rentang waktu tertentu sehingga pengguna dapat memantau perubahan kondisi lingkungan secara berkelanjutan.

Implementasi fitur peringatan dini menunjukkan bahwa sistem dapat memberikan notifikasi kepada pengguna ketika nilai parameter lingkungan melewati ambang batas yang telah ditentukan. Notifikasi dikirimkan melalui aplikasi *mobile* sebagai respons terhadap kondisi lingkungan yang berpotensi berisiko, seperti peningkatan tingkat kebisingan, kualitas udara yang menurun, atau terjadinya getaran.

Pengujian sistem dilakukan dengan pendekatan pengujian fungsional untuk memastikan setiap komponen sistem bekerja sesuai dengan fungsinya. Pengujian mencakup pembacaan sensor, pengiriman data ke server, penyimpanan data ke basis data, visualisasi data pada aplikasi mobile, serta pengiriman notifikasi peringatan dini. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh sensor dapat membaca parameter lingkungan dengan stabil dan mengirimkan data secara konsisten ke server. Tidak ditemukan kegagalan pengiriman data selama sistem beroperasi dalam kondisi jaringan yang normal. Aplikasi mobile mampu menampilkan data secara *real-time* dengan jeda waktu yang relatif kecil, sehingga informasi yang diterima pengguna masih bersifat aktual.

Fitur peringatan dini juga berfungsi dengan baik, di mana notifikasi berhasil dikirimkan ketika nilai sensor melewati ambang batas yang telah ditentukan. Hal ini menunjukkan bahwa logika analitik sederhana berbasis aturan yang diterapkan pada sistem dapat mendukung fungsi deteksi awal kondisi lingkungan berisiko.



Gambar 3 Data Sensor DHT22

Berdasarkan Gambar 3, terlihat bahwa sistem mampu merekam perubahan suhu dan kelembapan lingkungan secara kontinu. Nilai suhu menunjukkan kecenderungan meningkat secara bertahap, sementara nilai kelembapan mengalami penurunan seiring waktu. Pola ini menunjukkan bahwa proses akuisisi, pengiriman, dan visualisasi data sensor berjalan dengan baik dan stabil selama pengujian berlangsung.

Sensor MQ135, SW-420, dan KY-037 juga diuji secara fungsional untuk memastikan kemampuan pembacaan dan pengiriman data, sebagaimana dirangkum pada Tabel 2. Gambar 4 menunjukkan tampilan notifikasi peringatan dini yang diterima pengguna melalui aplikasi mobile ketika tingkat kebisingan lingkungan melebihi ambang batas aman. Notifikasi ini berisi informasi waktu kejadian dan nilai parameter yang terdeteksi.

Tabel 2 Hasil Pengujian Fungsional

No	Skenario Pengujian	Komponen	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengujian	Keterangan
1	Pembacaan suhu dan kelembapan	DHT22	Data suhu dan kelembapan terbaca dan dikirim ke server	Berhasil	Data stabil dan sesuai perubahan lingkungan
2	Pembacaan kualitas udara	MQ135	Nilai kualitas udara terbaca dan tersimpan di basis data	Berhasil	Respon sensor berjalan normal
3	Deteksi getaran	SW-420	Getaran terdeteksi dan tercatat oleh sistem	Berhasil	Sistem merespons perubahan getaran
4	Pengukuran tingkat kebisingan	KY-037	Nilai kebisingan terbaca dan dikirim ke server	Berhasil	Pembacaan berjalan kontinu
5	Pengiriman data ke server	ESP32 > RESTful API	Data sensor terkirim tanpa kehilangan data	Berhasil	Koneksi stabil pada jaringan normal
6	Penyimpanan data	Basis data MySQL	Data tersimpan dengan benar	Berhasil	Tidak ditemukan error penyimpanan
7	Visualisasi data real-time	Aplikasi Flutter	Data tampil secara real-time	Berhasil	Delay relatif kecil
8	Notifikasi peringatan dini	Sistem notifikasi	Notifikasi terkirim saat ambang batas terlampaui	Berhasil	Notifikasi diterima pengguna

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian, sistem yang dikembangkan mampu menjalankan fungsi pemantauan lingkungan secara *real-time* dengan integrasi antara perangkat IoT, server backend, dan aplikasi mobile. Penggunaan ESP32 sebagai mikrokontroler memberikan fleksibilitas dalam integrasi multi-sensor serta kemudahan konektivitas nirkabel, sehingga sistem dapat diterapkan pada lingkungan skala kecil dengan biaya yang relatif terjangkau. Integrasi aplikasi mobile berbasis Flutter memungkinkan pengguna untuk mengakses informasi lingkungan kapan saja dan di mana saja. Selain itu, keberadaan fitur peringatan dini memberikan nilai tambah dibandingkan sistem pemantauan konvensional yang hanya bersifat pasif, karena pengguna dapat memperoleh informasi secara proaktif ketika terjadi kondisi lingkungan yang tidak normal.



Gambar 4 Fitur Peringatan Dini pada Aplikasi Mobile

Meskipun demikian, sistem ini masih memiliki keterbatasan. Analitik prediktif yang digunakan masih bersifat sederhana dan berbasis aturan, sehingga belum mampu melakukan prediksi jangka panjang secara akurat. Selain itu, performa sistem sangat bergantung pada kualitas koneksi jaringan, yang dapat memengaruhi kecepatan pengiriman dan visualisasi data.

Nilai ambang batas yang digunakan pada sistem ditetapkan berdasarkan referensi umum dan kebutuhan pengujian sistem sebagai indikator awal kondisi lingkungan berisiko.

Tabel 3 Nilai Ambang Batas Parameter Lingkungan untuk Peringatan Dini

No	Parameter Lingkungan	Sensor	Nilai Ambang Batas	Satuan	Kondisi Risiko
1	Suhu	DHT22	≥ 30	°C	Suhu lingkungan tinggi
2	Kelembapan	DHT22	≤ 60	%	Udara terlalu kering
3	Kualitas udara	MQ135	≥ 300	ppm	Indikasi pencemaran udara
4	Kebisingan	KY-037	≥ 70	dB	Tingkat kebisingan tinggi
5	Getaran	SW-420	Terdeteksi	–	Aktivitas getaran abnormal

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT yang dikembangkan telah berfungsi sesuai dengan tujuan penelitian dan dapat menjadi solusi pemantauan lingkungan yang aplikatif, mudah direplikasi, serta berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut dengan metode analitik yang lebih kompleks.

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian fungsional, sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT yang dikembangkan mampu mengintegrasikan beberapa parameter lingkungan dalam satu platform terpadu dan menampilkan informasi secara real-time melalui aplikasi mobile. Kinerja sistem menunjukkan kestabilan dalam proses akuisisi dan pengiriman data multi-sensor, yang mengindikasikan bahwa arsitektur berbasis ESP32 dan RESTful API yang digunakan cukup andal untuk pemantauan lingkungan pada skala kecil. Keberhasilan sistem dalam mengirimkan notifikasi peringatan dini ketika parameter lingkungan melewati nilai ambang batas juga menunjukkan bahwa pendekatan berbasis ambang batas dapat berfungsi secara efektif sebagai mekanisme deteksi awal kondisi lingkungan berisiko.

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang umumnya hanya memfokuskan pada pemantauan satu atau dua parameter lingkungan atau terbatas pada visualisasi data secara pasif, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini menawarkan integrasi multi-sensor yang lebih komprehensif serta evaluasi kinerja sistem secara eksplisit. Beberapa studi sebelumnya menekankan aspek implementasi perangkat keras atau antarmuka aplikasi, namun belum banyak yang melaporkan kinerja sistem dari sisi kestabilan pengiriman data dan waktu respons dalam konteks penggunaan nyata. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan berupa evaluasi kinerja sistem IoT multi-sensor yang dapat dijadikan acuan bagi pengembangan sistem serupa.

Dari sisi implikasi praktis, sistem ini berpotensi digunakan sebagai solusi pemantauan lingkungan pada lingkungan pendidikan, permukiman, dan fasilitas kerja berskala kecil yang memerlukan sistem pemantauan yang terjangkau dan mudah diimplementasikan. Integrasi aplikasi *mobile* memungkinkan pengguna memperoleh informasi lingkungan secara langsung dan menerima peringatan dini tanpa memerlukan infrastruktur yang kompleks. Meskipun demikian, sistem yang dikembangkan masih memiliki keterbatasan, khususnya pada pendekatan analitik yang digunakan yang masih bersifat sederhana dan berbasis ambang batas, serta ketergantungan terhadap kualitas koneksi jaringan. Keterbatasan ini membuka peluang pengembangan lebih lanjut, seperti penerapan metode analitik yang lebih adaptif dan evaluasi performa sistem pada skala lingkungan yang lebih luas.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan dan mengevaluasi kinerja sistem pemantauan lingkungan berbasis *Internet of Things (IoT) multi-sensor* menggunakan ESP32 yang terintegrasi dengan aplikasi *mobile* dan fitur peringatan dini secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan akuisisi dan pengiriman data *multi-sensor* secara stabil, menampilkan informasi lingkungan secara *real-time*, serta mengirimkan notifikasi peringatan dini secara konsisten ketika parameter lingkungan melewati nilai ambang batas yang ditetapkan. Kontribusi penelitian ini terletak pada penyajian evaluasi kinerja sistem IoT *multi-sensor* yang aplikatif dan mudah direplikasi untuk pemantauan lingkungan berskala kecil. Meskipun demikian, sistem yang dikembangkan masih memiliki keterbatasan, khususnya pada pendekatan analitik yang masih berbasis ambang batas dan ketergantungan terhadap kualitas koneksi jaringan. Ke depan, penelitian dapat dikembangkan dengan penerapan metode analitik yang lebih adaptif serta pengujian sistem pada skala lingkungan yang lebih luas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Harapan Bangsa atas dukungan dan pendanaan yang diberikan melalui skema Hibah Penelitian Internal, sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dan diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] B. Kahouli, K. Miled, and Z. Aloui, "Do energy consumption, urbanization, and industrialization play a role in environmental degradation in the case of Saudi Arabia?," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 40, no. January, p. 100814, 2022, doi: 10.1016/j.esr.2022.100814.

- [2] B. M. Kyule and X. Wang, "Quantifying the link between industrialization, urbanization, and economic growth over Kenya," *Front. Archit. Res.*, vol. 13, no. 4, pp. 799–808, 2024, doi: 10.1016/j.foar.2024.03.009.
- [3] T. P. da Costa *et al.*, "A Systematic Review of Real-Time Monitoring Technologies and Its Potential Application to Reduce Food Loss and Waste: Key Elements of Food Supply Chains and IoT Technologies," *Sustain.*, vol. 15, no. 1, 2023, doi: 10.3390/su15010614.
- [4] H. Shahab, M. Naeem, M. Iqbal, M. Aqeel, and S. S. Ullah, "IoT-driven smart agricultural technology for real-time soil and crop optimization," *Smart Agric. Technol.*, vol. 10, no. February, p. 100847, 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.100847.
- [5] N. Chavhan *et al.*, "APAH: An autonomous IoT driven real-time monitoring system for Industrial wastewater," *Digit. Chem. Eng.*, vol. 14, no. January, p. 100217, 2025, doi: 10.1016/j.dche.2025.100217.
- [6] C. F. Hadi, R. M. Yasi, and A. Prasetyo, "Model Decision Tree Forecasting Berbasis DHT22 pada Smart Hydroponic Microgreen," *J. Telecommun. Electron. Control Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 29–38, 2024, doi: 10.20895/jtece.v6i1.1218.
- [7] Y. Erdani, A. L. Rabono, H. Rudiansyah, A. Budiarto, and B. Ahad, "PEMANTAUAN KONDISI MOTOR MENGGUNAKAN," vol. 17, pp. 309–319, 2025, doi: 10.55679/DJITM.V16I2.
- [8] M. Nawaz and M. I. K. Babar, "IoT and AI for smart agriculture in resource-constrained environments: challenges, opportunities and solutions," *Discov. Internet Things*, vol. 5, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s43926-025-00119-3.
- [9] H. Kabir, M. L. Tham, and Y. C. Chang, "Internet of robotic things for mobile robots: Concepts, technologies, challenges, applications, and future directions," *Digit. Commun. Networks*, vol. 9, no. 6, pp. 1265–1290, 2023, doi: 10.1016/j.dcan.2023.05.006.
- [10] R. D. Rusnawati and T. S. Hariyati, "Implementasi Internet OF THINGS PADA LAYANAN KESEHATAN (LITERATURE REVIEW)," *J. Innov. Reseach Knowl.*, vol. 3471, no. 8, pp. 569–574, 2022.
- [11] R. B. Indaryanti, B. Murtiyasa, and B. Soemardjoko, "Model Penelitian dan Pengembangan 4D: Tinjauan Tren, Tantangan, dan Peluang," *J. Kaji. Ilm.*, vol. 25, no. 1, pp. 91–98, 2025, [Online]. Available: <https://ejurnal.ubharajaya.ac.id/index.php/JKI/article/view/3430>
- [12] A. P. Harkha and H. Hidayat, "Design of Microcontroller Trainer Based on Internet of Things (IoT)," *J. Pendidik. Multidisiplin*, vol. 2, pp. 161–174, 2025, [Online]. Available: <https://journal.hasbaedukasi.co.id/index.php/at-taklimHalaman:161-174>
- [13] I. S. Mangkunegara, A. S. S. Ariyanto, and D. N. Triwibowo, "Implementasi Arduino Iot Cloud: Potensiometer Sebagai Pengatur Intensitas Cahaya LED," *JSAI (Journal Sci. Appl. Informatics)*, vol. 7, no. 1, pp. 65–72, 2024, doi: 10.36085/jsai.v7i1.6083.
- [14] A. S. S. Ariyanto, I. S. Mangkunegara, D. N. Triwibowo, and Y. Feriyanto, "Perancangan Aplikasi Mobile Berbasis Flutter untuk Pemantauan Data Sensor IoT Solusi bagi Manajemen Suhu dan Kelembapan," *JSAI J. Sci. Appl. Informatics*, vol. 8, no. 1, pp. 204–2011, 2025.
- [15] F. Surya, E. Santi, F. Sriyunianti, and R. Heriyanto, "Desain Aplikasi Database Sistem Informasi Akuntansi Sekolah pada Yayasan Ainur Rahmah," *Akunt. dan Manaj.*, vol. 18, no. 1, pp. 73–80, 2023, doi: 10.30630/jam.v18i1.215.