

Sistem Monitoring Kualitas Udara Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan Esp8266 Dan Firebase

Rachmad Aminullah¹

¹Teknik Informatika, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Nusantara PGRI Kediri
E-mail: *¹rachmadaminullah@gmail.com

Abstrak – Sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan ini bekerja dengan memanfaatkan sensor kualitas udara yang terhubung ke mikrokontroler ESP8266 sebagai pengendali utama. Sensor membaca parameter kualitas udara seperti PM2.5 dan karbon dioksida (CO₂) secara periodik, kemudian data hasil pembacaan tersebut diproses oleh ESP8266 dan dikirimkan melalui jaringan internet ke Firebase sebagai media penyimpanan data berbasis cloud. Firebase berfungsi menyimpan dan memperbarui data secara real-time sehingga informasi kualitas udara dapat diakses tanpa perlu pemuatan ulang halaman. Data yang tersimpan selanjutnya ditampilkan pada dashboard web dalam bentuk nilai numerik, grafik historis, serta ringkasan kondisi kualitas udara untuk memudahkan pengguna dalam memahami kondisi lingkungan indoor. Selain itu, sistem dilengkapi dengan fitur notifikasi otomatis yang akan aktif ketika nilai kualitas udara melewati ambang batas tertentu sebagai peringatan dini kepada pengguna. Dengan alur kerja tersebut, sistem mampu memberikan laporan kualitas udara indoor secara real-time, berkelanjutan, dan informatif.

Kata Kunci — dashboard web, kualitas udara indoor, monitoring lingkungan, internet of things

1. PENDAHULUAN

Kualitas udara merupakan salah satu faktor lingkungan yang memiliki pengaruh langsung terhadap kesehatan, kenyamanan, dan produktivitas manusia, khususnya pada lingkungan dalam ruangan (indoor). Berbagai kajian menunjukkan bahwa sebagian besar aktivitas manusia dilakukan di dalam ruangan, sehingga paparan terhadap polutan udara indoor menjadi lebih dominan dibandingkan udara luar. Polutan seperti partikulat halus (PM2.5), karbon dioksida (CO₂), serta gas berbahaya lainnya dapat terakumulasi akibat ventilasi yang tidak optimal dan aktivitas manusia sehari-hari, yang dalam jangka panjang berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan serius[1]. Permasalahan kualitas udara indoor sering kali tidak terdeteksi secara dini karena kondisi udara tidak dapat diamati secara langsung tanpa bantuan perangkat pemantauan. Metode pemantauan konvensional umumnya bersifat statis, membutuhkan biaya tinggi, serta tidak menyediakan informasi secara real-time kepada pengguna. Kondisi tersebut mendorong perlunya sistem pemantauan kualitas udara yang mampu bekerja secara berkelanjutan, fleksibel, dan mudah diakses oleh masyarakat[2].

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memberikan solusi yang relevan terhadap permasalahan tersebut. IoT memungkinkan perangkat fisik seperti sensor lingkungan untuk terhubung dengan jaringan internet sehingga mampu mengumpulkan dan mengirimkan data secara otomatis ke sistem pengolahan data berbasis cloud. Dengan pendekatan ini, data kualitas udara dapat dipantau secara real-time dan ditampilkan dalam bentuk visualisasi yang mudah dipahami melalui antarmuka berbasis web[3]. Arsitektur sistem IoT umumnya terdiri dari sensor sebagai pengumpul data, perangkat pemrosesan sebagai pengirim data, layanan cloud sebagai media penyimpanan dan pengolahan data, serta aplikasi pengguna sebagai sarana pemantauan kondisi lingkungan[4].

Dalam konteks kualitas udara indoor, parameter yang sering digunakan sebagai indikator utama meliputi PM2.5, PM10, CO₂, suhu, dan kelembaban. PM2.5 merupakan partikulat berukuran sangat kecil yang mampu menembus sistem pernapasan bawah dan berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan. Sementara itu, konsentrasi CO₂ sering digunakan sebagai indikator tingkat ventilasi ruangan, di mana peningkatan kadar CO₂ menunjukkan sirkulasi udara yang kurang optimal dan dapat menurunkan kenyamanan serta konsentrasi manusia[5]. Oleh karena itu, pemantauan parameter-parameter tersebut menjadi penting dalam upaya menjaga kualitas udara indoor yang sehat. Seiring dengan perkembangan teknologi sensor, penggunaan sensor berbiaya rendah (low-cost sensors) menjadi alternatif yang banyak diterapkan dalam sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT. Sensor jenis ini memungkinkan pengembangan sistem pemantauan yang lebih ekonomis tanpa harus menggunakan instrumen laboratorium yang mahal. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sensor low-cost tetap mampu memberikan data yang representatif untuk keperluan monitoring real-time apabila diintegrasikan dengan sistem IoT dan dilakukan pengolahan data yang sesuai[6].

Selain penyajian data, sistem monitoring kualitas udara modern juga dilengkapi dengan mekanisme notifikasi otomatis sebagai peringatan dini ketika kualitas udara berada pada kondisi tidak sehat. Fitur notifikasi ini berperan penting dalam meningkatkan respons pengguna terhadap perubahan kondisi lingkungan secara cepat dan tepat, sehingga sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan, tetapi juga sebagai sistem pendukung pencegahan risiko kesehatan[7]. Dengan demikian, penerapan sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things* menjadi solusi yang relevan dan aplikatif untuk pemantauan lingkungan indoor secara berkelanjutan[8].

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam pengembangan sistem ini mengacu pada pendekatan perancangan sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things*. Tahapan penelitian meliputi perancangan arsitektur sistem, pemilihan sensor kualitas udara, integrasi perangkat IoT, serta perancangan sistem penyimpanan dan penyajian data melalui antarmuka pengguna berbasis web.

2.1 Perangkat Keras

Perangkat keras yang digunakan dalam pengembangan sistem monitoring kualitas udara ini meliputi sensor kualitas udara, modul mikrokontroler ESP8266, serta perangkat pendukung lainnya. Sensor digunakan untuk membaca parameter kualitas udara secara periodik, sedangkan ESP8266 berfungsi sebagai pengendali utama yang memproses dan mengirimkan data sensor ke sistem penyimpanan berbasis cloud melalui jaringan internet.

2.2 Perangkat Lunak

Dari sisi perangkat lunak, sistem dikembangkan menggunakan platform berbasis web sebagai antarmuka pengguna. Firebase digunakan sebagai media penyimpanan data berbasis cloud yang mendukung pembaruan data secara real-time. Selain itu, perangkat lunak pada sisi mikrokontroler berfungsi untuk mengatur proses pembacaan sensor, pengolahan data, serta pengiriman data ke sistem cloud. Kombinasi perangkat keras dan perangkat lunak tersebut memungkinkan sistem monitoring kualitas udara bekerja secara terintegrasi dan mendukung kebutuhan pemantauan kondisi lingkungan indoor secara real-time.

2.3 Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem dirancang dengan mengintegrasikan sensor kualitas udara, perangkat IoT, sistem penyimpanan data berbasis cloud, serta antarmuka pengguna dalam satu kesatuan sistem. Sensor berfungsi untuk membaca parameter kualitas udara, kemudian data hasil pembacaan diproses oleh perangkat IoT dan dikirimkan melalui jaringan internet menuju platform cloud. Data yang diterima pada platform cloud disimpan dalam basis data real-time dan selanjutnya dapat diakses oleh sistem antarmuka pengguna untuk ditampilkan secara langsung kepada pengguna.

2.4 Alur Sistem



Gambar 1. Diagram Alur Sistem Monitoring Kualitas Udara Berbasis IoT

Pada Gambar 1 menggambarkan tahapan kerja sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) secara keseluruhan. Proses dimulai ketika sensor membaca parameter kualitas udara berupa PM2.5, CO₂, suhu, dan kelembaban di dalam ruangan. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh mikrokontroler ESP8266 sebelum dikirimkan ke Firebase Realtime Database melalui jaringan internet. Data yang tersimpan selanjutnya ditampilkan pada dashboard web secara real-time. Sistem juga melakukan analisis dengan membandingkan nilai sensor terhadap ambang batas kualitas udara berdasarkan standar WHO. Apabila nilai parameter melebihi ambang batas yang ditentukan, sistem akan mengirimkan notifikasi peringatan kepada pengguna melalui Telegram. Proses ini berlangsung secara berulang dan kontinu selama sistem aktif.

Penyajian data dilakukan melalui dashboard web yang berfungsi sebagai antarmuka pengguna. Dashboard ini dirancang untuk menampilkan informasi kualitas udara secara real-time dalam bentuk nilai numerik, grafik historis, serta ringkasan kondisi udara. Pendekatan ini selaras dengan berbagai model sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT yang telah dikembangkan dalam penelitian sebelumnya [4].

Selain penyajian data, sistem juga dirancang untuk mendukung fitur notifikasi otomatis yang akan aktif ketika nilai parameter kualitas udara melewati ambang batas tertentu. Notifikasi ini disampaikan kepada pengguna sebagai peringatan dini terhadap kondisi udara yang tidak sehat, sehingga pengguna dapat mengambil tindakan preventif secara lebih cepat dan tepat [6].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things* berhasil menampilkan data kualitas udara secara real-time dan berkelanjutan melalui dashboard web. Integrasi

antara sensor, perangkat IoT, sistem cloud, dan antarmuka pengguna memungkinkan data lingkungan diperoleh, disimpan, dan disajikan secara langsung kepada pengguna tanpa memerlukan proses pemuatan ulang halaman. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme pengiriman dan penyajian data berjalan dengan baik sesuai dengan perancangan sistem.



Gambar 2. Tampilan dashboard monitoring kualitas udara

Pada Gambar 2 memperlihatkan tampilan dashboard monitoring kualitas udara yang menyajikan ringkasan kondisi udara secara keseluruhan, nilai numerik parameter PM2.5, CO₂, suhu, dan kelembaban, serta grafik historis untuk memantau perubahan data dalam rentang waktu tertentu. Penyajian informasi dalam bentuk nilai numerik dan grafik memudahkan pengguna dalam memahami kondisi kualitas udara secara komprehensif, baik kondisi terkini maupun pola perubahan kualitas udara dari waktu ke waktu.

Dashboard juga menampilkan status perangkat dan waktu pembaruan data terakhir yang berfungsi sebagai indikator bahwa sistem monitoring berada dalam kondisi aktif dan terhubung secara real-time. Keberadaan ringkasan kualitas udara dengan kategori tertentu membantu pengguna non-teknis dalam melakukan interpretasi kondisi lingkungan tanpa harus memahami detail teknis data sensor.

Penggunaan sensor low-cost dalam sistem ini menunjukkan kinerja yang memadai untuk keperluan monitoring lingkungan indoor. Meskipun sensor memiliki keterbatasan dibandingkan alat ukur profesional, data yang ditampilkan melalui dashboard menunjukkan konsistensi pembacaan dan mampu memberikan gambaran kondisi udara yang representatif. Selain itu, integrasi fitur notifikasi otomatis memperkuat fungsi sistem sebagai alat peringatan dini ketika kualitas udara berada pada kondisi tidak sehat, sehingga pengguna dapat mengambil tindakan preventif secara lebih cepat.

Secara keseluruhan, implementasi antarmuka pengguna berbasis web meningkatkan efektivitas sistem monitoring kualitas udara dalam menyajikan informasi lingkungan secara real-time, mudah dipahami, dan dapat diakses oleh pengguna dari berbagai perangkat.

3.1 Skenario Pengujian Sistem

Pengujian sistem monitoring kualitas udara dilakukan pada lingkungan indoor dengan kondisi aktivitas normal. Sistem dioperasikan secara berkelanjutan untuk mengamati kemampuan sensor dan perangkat IoT dalam membaca serta mengirimkan data kualitas udara ke sistem cloud. Parameter yang diamati meliputi PM2.5, CO₂, suhu, dan kelembaban. Selama proses pengujian, sistem diobservasi untuk memastikan bahwa data yang ditampilkan pada dashboard web sesuai dengan data yang dikirimkan oleh perangkat IoT. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh komponen sistem bekerja secara terintegrasi dan mampu mendukung proses monitoring kualitas udara secara real-time dan berkelanjutan.

3.2 Evaluasi Kinerja Sistem

Evaluasi kinerja sistem dilakukan untuk menilai kemampuan sistem dalam menyajikan data kualitas udara secara real-time dan konsisten. Berdasarkan hasil pengujian selama proses implementasi, sistem mampu menampilkan data sensor pada dashboard web dengan jeda waktu yang relatif singkat sejak data dikirimkan dari perangkat IoT ke sistem cloud. Kondisi ini menunjukkan bahwa mekanisme komunikasi data antara sensor, perangkat IoT, dan sistem penyimpanan berbasis cloud berjalan dengan baik. Pembaruan data yang bersifat real-time memungkinkan pengguna memantau perubahan kondisi kualitas udara secara langsung tanpa harus

melakukan pemuatan ulang halaman. Kecepatan penyajian informasi ini sangat penting dalam sistem monitoring lingkungan, karena keterlambatan data dapat mengurangi efektivitas pemantauan dan respons pengguna terhadap perubahan kondisi kualitas udara.

3.3 Respons Sistem terhadap Perubahan Kondisi Lingkungan

Sistem monitoring kualitas udara menunjukkan kemampuan untuk merespons perubahan kondisi lingkungan indoor secara dinamis. Ketika terjadi perubahan nilai parameter kualitas udara, sistem secara otomatis memperbarui data yang ditampilkan pada dashboard web sesuai dengan data terbaru yang diterima dari perangkat IoT. Respons sistem terhadap perubahan kondisi ini memastikan bahwa informasi yang diterima pengguna selalu mencerminkan kondisi lingkungan terkini. Dengan mekanisme pembaruan data secara real-time, pengguna dapat mengamati fluktuasi kualitas udara serta memahami pola perubahan kondisi lingkungan selama periode pengamatan.

3.4 Keandalan dan Stabilitas Sistem

Dari sisi keandalan, sistem monitoring kualitas udara menunjukkan kemampuan untuk beroperasi secara berkelanjutan dalam periode pengujian tanpa mengalami gangguan yang signifikan. Dashboard web mampu menampilkan data kualitas udara secara konsisten selama koneksi jaringan internet berada dalam kondisi stabil. Informasi status perangkat dan waktu pembaruan data terakhir juga berperan dalam membantu pengguna memastikan bahwa sistem berada dalam kondisi aktif dan berfungsi dengan baik. Namun demikian, stabilitas sistem masih dipengaruhi oleh kualitas jaringan internet yang digunakan. Gangguan koneksi dapat menyebabkan keterlambatan pembaruan data pada dashboard web. Oleh karena itu, kestabilan jaringan menjadi salah satu faktor penting yang perlu diperhatikan dalam penerapan sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT pada lingkungan nyata.

3.5 Implikasi Penggunaan Sistem

Implementasi sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT memberikan implikasi positif bagi pengguna dalam memahami kondisi lingkungan indoor secara lebih objektif dan terukur. Informasi kualitas udara yang disajikan secara real-time membantu pengguna mengetahui kondisi udara tanpa harus mengandalkan persepsi subjektif semata. Dengan adanya informasi yang mudah dipahami serta notifikasi otomatis, pengguna dapat melakukan tindakan sederhana seperti meningkatkan ventilasi ruangan atau mengurangi aktivitas yang berpotensi menurunkan kualitas udara. Oleh karena itu, sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat teknologi, tetapi juga sebagai sarana pendukung peningkatan kesadaran dan perilaku hidup sehat di lingkungan indoor.

3.6 Pembahasan Ambang Batas dan Notifikasi Otomatis

Penentuan ambang batas kualitas udara dalam sistem monitoring ini berperan penting dalam mendukung fungsi notifikasi otomatis. Ambang batas digunakan sebagai acuan untuk membedakan kondisi udara normal dan tidak sehat, sehingga sistem dapat memberikan peringatan dini kepada pengguna. Ketika nilai parameter kualitas udara melewati ambang batas yang telah ditetapkan, sistem secara otomatis mengirimkan notifikasi kepada pengguna. Mekanisme ini memungkinkan pengguna untuk segera mengambil tindakan preventif sebelum kondisi udara berdampak negatif terhadap kesehatan. Dengan demikian, fitur notifikasi tidak hanya berfungsi sebagai pelengkap sistem, tetapi menjadi bagian penting dalam mendukung pencegahan risiko kesehatan.

3.7 Keterbatasan Pengujian Sistem

Meskipun hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem monitoring kualitas udara dapat berfungsi dengan baik, pengujian yang dilakukan masih memiliki beberapa keterbatasan. Pengujian dilakukan pada lingkungan indoor dengan skala terbatas, sehingga variasi kondisi lingkungan yang diamati belum sepenuhnya mencerminkan seluruh kemungkinan kondisi nyata. Selain itu, pengujian belum membandingkan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur standar laboratorium. Oleh karena itu, hasil pengujian dalam penelitian ini lebih difokuskan pada kemampuan sistem dalam melakukan monitoring secara real-time dan konsisten, bukan pada tingkat akurasi absolut pengukuran.

3.8 Perbandingan dengan Penelitian Terkait

Jika dibandingkan dengan beberapa penelitian terkait mengenai sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki kesamaan dalam penggunaan sensor lingkungan, sistem penyimpanan data berbasis cloud, dan antarmuka pengguna berbasis web. Pendekatan yang digunakan juga sejalan dengan penelitian sebelumnya dalam hal penyajian data secara real-time. Perbedaan utama terletak pada fokus penerapan sistem pada lingkungan indoor dengan penekanan pada kemudahan interpretasi data bagi pengguna non-teknis. Dengan pendekatan tersebut, sistem ini diharapkan dapat digunakan secara lebih luas pada lingkungan indoor yang membutuhkan pemantauan kualitas udara secara berkelanjutan dengan tingkat kompleksitas yang relatif rendah.

4. SIMPULAN

Dengan mempertimbangkan hasil evaluasi yang dilakukan, beberapa hal dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang dikembangkan mampu berfungsi sesuai dengan tujuan penelitian dengan mengintegrasikan sensor kualitas udara, perangkat IoT, sistem penyimpanan data berbasis cloud, dan antarmuka pengguna berbasis web dalam satu kesatuan sistem yang bekerja secara real-time.
2. Sistem yang dibangun mampu menampilkan informasi kualitas udara indoor secara berkelanjutan melalui dashboard web, meliputi nilai numerik parameter PM2.5, karbon dioksida (CO₂), suhu, dan kelembaban, serta visualisasi grafik historis yang memudahkan pengguna dalam memahami kondisi udara terkini dan pola perubahannya.
3. Hasil evaluasi kinerja menunjukkan bahwa sistem dapat menyajikan data dengan jeda waktu yang relatif singkat sejak data dikirimkan dari perangkat IoT ke sistem cloud, sehingga mekanisme pembaruan data secara real-time berjalan dengan baik tanpa memerlukan pemuatan ulang halaman.
4. Dari sisi keandalan, sistem monitoring kualitas udara mampu beroperasi secara berkelanjutan selama periode pengujian dengan kondisi jaringan internet yang stabil. Informasi status perangkat dan waktu pembaruan data terakhir membantu pengguna memastikan bahwa sistem berada dalam kondisi aktif dan berfungsi dengan baik.
5. Penggunaan sensor berbiaya rendah (low-cost sensors) menunjukkan kinerja yang memadai untuk keperluan monitoring lingkungan indoor. Meskipun memiliki keterbatasan dibandingkan alat ukur laboratorium, sensor mampu menghasilkan data yang konsisten dan representatif untuk pemantauan kualitas udara secara real-time.
6. Keberadaan fitur notifikasi otomatis memberikan nilai tambah terhadap sistem, di mana pengguna memperoleh peringatan dini ketika kualitas udara melewati ambang batas yang ditentukan, sehingga memungkinkan tindakan preventif dilakukan secara lebih cepat dan tepat.
7. Secara keseluruhan, sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT yang dikembangkan dinilai efektif, aplikatif, dan relevan sebagai solusi pemantauan kualitas udara indoor yang terjangkau, fleksibel, serta mendukung peningkatan kesadaran pengguna terhadap risiko kesehatan akibat paparan polutan udara dalam jangka panjang.

5. SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan serta keterbatasan yang masih terdapat dalam pengembangan dan pengujian sistem, beberapa saran dapat diberikan untuk pengembangan dan penelitian selanjutnya. Saran-saran ini diharapkan dapat meningkatkan kinerja, akurasi, serta manfaat sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) agar dapat diterapkan secara lebih optimal pada berbagai lingkungan indoor sebagai berikut:

1. Penambahan Parameter Sensor Kualitas Udara - Pengembangan sistem monitoring kualitas udara dapat dilakukan dengan menambahkan parameter sensor lain yang merepresentasikan polutan udara berbahaya, seperti karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), serta volatile organic compounds (VOC). Penambahan parameter ini akan memperluas cakupan pemantauan kualitas udara sehingga sistem tidak hanya terbatas pada partikulat dan gas tertentu, tetapi mampu memberikan gambaran kondisi udara indoor yang lebih komprehensif. Dengan pemantauan multi-parameter, sistem dapat digunakan pada berbagai jenis lingkungan indoor dengan karakteristik polutan yang berbeda, seperti ruang laboratorium, dapur, area parkir tertutup, maupun ruang publik dengan kepadatan aktivitas tinggi.
2. Kalibrasi Sensor untuk Peningkatan Akurasi Data - Peningkatan akurasi sistem dapat dilakukan melalui proses kalibrasi sensor secara berkala dengan membandingkan hasil pembacaan sensor berbiaya rendah (low-cost sensors) terhadap alat ukur standar atau instrumen laboratorium yang telah terkalibrasi. Kalibrasi ini penting untuk meningkatkan keandalan dan validitas data, khususnya apabila sistem digunakan dalam jangka waktu yang panjang atau pada lingkungan dengan kondisi udara yang dinamis. Selain itu, proses kalibrasi juga dapat membantu mengurangi kesalahan pembacaan sensor akibat pengaruh suhu, kelembaban, penuaan sensor, serta gangguan lingkungan lainnya, sehingga kualitas data yang dihasilkan tetap konsisten dan dapat dipertanggungjawabkan.
3. Pengembangan Fitur Analisis Data pada Antarmuka Web - Pengembangan lebih lanjut pada sisi antarmuka pengguna berbasis web dapat dilakukan dengan menambahkan fitur analisis data yang lebih mendalam. Fitur seperti rekapitulasi data harian, mingguan, dan bulanan, analisis tren jangka panjang, serta perbandingan data antar periode waktu dapat membantu pengguna dalam melakukan evaluasi kondisi kualitas udara secara lebih sistematis. Selain itu, penyediaan fitur ekspor data ke dalam format tertentu, seperti CSV atau PDF, akan mendukung kebutuhan dokumentasi, pelaporan, serta penelitian lanjutan yang memanfaatkan data hasil monitoring sebagai sumber analisis.
4. Pengembangan Sistem Notifikasi yang Lebih Fleksibel - Fitur notifikasi otomatis yang telah diimplementasikan dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan berbagai media notifikasi lain, seperti aplikasi pesan instan, surat elektronik (email), atau notifikasi berbasis aplikasi mobile. Pengembangan

ini akan meningkatkan fleksibilitas sistem dalam menyampaikan informasi kepada pengguna sesuai dengan preferensi dan kebutuhan masing-masing. Selain itu, sistem dapat dilengkapi dengan pengaturan ambang batas kualitas udara yang dapat dikustomisasi oleh pengguna, sehingga notifikasi yang diterima menjadi lebih relevan dengan kondisi lingkungan dan tingkat sensitivitas pengguna terhadap kualitas udara.

5. Penerapan Sistem pada Skala dan Lingkungan yang Lebih Luas - Penelitian selanjutnya dapat mengkaji penerapan sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT pada skala yang lebih luas dan beragam. Implementasi sistem pada lingkungan pendidikan, perkantoran, fasilitas kesehatan, fasilitas umum, maupun ruang publik lainnya akan memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai performa, keandalan, dan adaptabilitas sistem dalam kondisi nyata. Pengujian pada berbagai skenario lingkungan dengan tingkat aktivitas dan kepadatan yang berbeda juga dapat membantu mengidentifikasi tantangan teknis, kebutuhan penyesuaian sistem, serta peluang pengembangan di masa mendatang.
6. Integrasi dengan Teknologi dan Sistem Pendukung Lainnya - Pengembangan sistem monitoring kualitas udara dapat diarahkan pada integrasi dengan teknologi lain, seperti aplikasi mobile, sistem pendukung pengambilan keputusan berbasis analisis data, atau platform smart building. Integrasi ini memungkinkan sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring, tetapi juga sebagai bagian dari ekosistem manajemen lingkungan indoor yang lebih cerdas. Dengan dukungan analisis data dan rekomendasi otomatis, sistem dapat membantu pengguna atau pengelola bangunan dalam mengambil keputusan berbasis data untuk menjaga kualitas udara indoor secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Saini, M. Dutta, and G. Marques, "Indoor air quality monitoring systems based on internet of things: A systematic review," Jul. 02, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ijerph17144942.
- [2] O. Alsamrai, M. D. Redel-Macias, and M. P. Dorado, "Real-Time Intelligent Monitoring of Outdoor Air Quality in an Urban Environment Using IoT and Machine Learning Algorithms," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 16, Aug. 2025, doi: 10.3390/app15169088.
- [3] Z. Wang, Z. Chen, I. Shahid, Z. Asif, and F. Haghighat, "Indoor Air Quality Assessment Through IoT Sensor Technology: A Montreal–Qatar Case Study," *Atmosphere (Basel)*, vol. 16, no. 5, May 2025, doi: 10.3390/atmos16050574.
- [4] Revifal Anugerah and Tata Sutabri, "Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Menggunakan IoT dengan Metode Prototype," *Modem : Jurnal Informatika dan Sains Teknologi.*, vol. 3, no. 1, pp. 01–05, Dec. 2024, doi: 10.62951/modem.v3i1.304.
- [5] A. Enal Wahyudi, S. Kurniyan Sari, F. Aziz, and J. Jeffry, "Implementation of an Internet of Things (IoT)-Based Air Quality Monitoring System for Enhancing Indoor Environments," *Journal of System and Computer Engineering (JSCE)*, vol. 6, no. 1, pp. 124–130, Jan. 2025, doi: 10.61628/jsce.v6i1.1466.
- [6] D. N. Azizah, S. Heranurweni, and L. O. M. Idris, "Internet of Things Based Air Quality Monitoring System with Automatic Notification," *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, vol. 5, no. 3, pp. 776–787, Jun. 2025, doi: 10.57152/malcom.v5i3.1945.
- [7] A. Fikri and M. Ridwan, "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, doi: 10.55606/juisik.v5i2.1326.
- [8] Ss. Priya and V. CharanM, "526 International Journal for Modern Trends in Science and Technology qrAs per UGC guidelines an electronic bar code is provided to seure your paper," *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, vol. 10, no. 02, pp. 526–530, doi: 10.46501/IJMTST1002072.