

Sistem IoT untuk Pemantauan Kualitas Udara dalam Ruangan Berbasis Visualisasi Web *Real-Time* sebagai Pendukung Lingkungan Belajar yang Sehat

Afrad Ilhamul Hibatullah ^{a*}, Sujono ^b

^{a*,b} Program Studi Informatika, Universitas KH. A. Wahab Hasbullah, Kabupaten Jombang, Provinsi Jawa Timur, Indonesia.

ABSTRACT

Indoor air quality plays an important role in students' comfort and academic performance in learning environments. High carbon dioxide (CO₂) concentrations caused by inadequate ventilation can reduce learning concentration. This study aims to develop an Internet of Things (IoT)-based indoor air quality monitoring system using an ESP32 microcontroller and an MQ135 sensor, as well as to analyze the relationship between CO₂ concentration and students' academic performance. The research employed a Research and Development (R&D) approach, with CO₂ concentration data collected every minute from May to October in a classroom environment. The data were processed into monthly averages and compared with students' average academic scores. The results show that the highest average CO₂ concentration occurred in September at 997.78 ppm, accompanied by the lowest average student score of 74.37, while the lowest CO₂ concentration was recorded in July at 712.10 ppm, with an average score of 83.76. The findings indicate a tendency for increased CO₂ concentrations to be followed by a decrease in students' academic performance. The developed system is capable of displaying real-time indoor air quality data through a web-based dashboard and can support the creation of a healthier learning environment.

ABSTRAK

Kualitas udara dalam ruangan berpengaruh terhadap kenyamanan dan performa akademik mahasiswa di lingkungan pembelajaran. Konsentrasi karbon dioksida (CO₂) yang tinggi akibat ventilasi yang kurang optimal dapat menurunkan konsentrasi belajar. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem *Internet of Things* (IoT) berbasis ESP32 dan sensor MQ135 untuk memantau kualitas udara *indoor* secara *real-time* serta menganalisis hubungannya dengan performa akademik mahasiswa. Metode yang digunakan adalah *Research and Development* (R&D) dengan pengambilan data konsentrasi CO₂ setiap satu menit selama periode Mei hingga Oktober di ruang kelas. Data diolah menjadi rata-rata bulanan dan dibandingkan dengan nilai akademik mahasiswa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata konsentrasi CO₂ tertinggi terjadi pada bulan September sebesar 997,78 ppm dengan rata-rata nilai mahasiswa 74,37, sedangkan konsentrasi CO₂ terendah terjadi pada bulan Juli sebesar 712,10 ppm dengan rata-rata nilai 83,76. Pola data menunjukkan bahwa kenaikan konsentrasi CO₂ cenderung diikuti oleh penurunan nilai akademik mahasiswa. Sistem yang dikembangkan mampu menampilkan data kualitas udara secara *real-time* melalui *dashboard* berbasis web dan dapat digunakan sebagai alat pendukung dalam menciptakan lingkungan belajar yang lebih sehat.

ARTICLE HISTORY

Received 4 January 2026
Accepted 1 February 2026
Published 30 June 2026

KEYWORDS

Internet of Things; Indoor Air Quality; CO₂; ESP32.

KATA KUNCI

Internet of Things; Kualitas Udara Indoor; CO₂; ESP32; *Monitoring Real-Time*.

1. Pendahuluan

Manusia menghabiskan sekitar 90% waktunya untuk berada di dalam ruangan, termasuk dalam aktivitas pembelajaran di lingkungan pendidikan (Rahmawati & Khairina, 2020). Kualitas udara dalam ruangan (*indoor air quality/IAQ*) menjadi faktor krusial yang mempengaruhi kesehatan dan performa penghuninya, terutama dalam konteks lingkungan belajar. Sayangnya, sebanyak 12 juta pelajar di Amerika Serikat melaporkan bahwa ruang kelas mereka tidak memiliki ventilasi yang baik dan 8 juta pelajar menyatakan ruang kelas mereka memiliki kualitas udara dalam ruangan yang buruk (Rahmawati & Khairina, 2020). Kondisi ini tentu berdampak signifikan pada kesehatan fisik dan mental para pelajar yang pada akhirnya memengaruhi kinerja akademik mereka.

Polusi udara dalam ruangan dapat berasal dari berbagai sumber, baik dari dalam maupun luar gedung. Di lingkungan pendidikan seperti perpustakaan universitas, berbagai penelitian menunjukkan adanya kontaminan biologis seperti kapang patogen (*Aspergillus fumigatus*, *Scopulariopsis candida*, dan *Fusarium verticilloides*) yang dapat menyebabkan gangguan pernapasan pada pengguna ruangan (Fitria *et al.*, 2008). Selain itu, parameter fisik seperti suhu, intensitas cahaya, kelembaban, serta parameter kimia seperti konsentrasi karbon dioksida (CO₂) dan partikulat materi (PM_{2.5}) juga menjadi indikator penting kualitas udara dalam ruangan (Rahmawati & Khairina, 2020).

Berbagai penelitian telah membuktikan adanya hubungan signifikan antara kualitas udara dalam ruangan dengan performa akademik. Sebuah studi di Amerika Serikat menunjukkan bahwa absenteisme pelajar meningkat sebesar 10–20% seiring dengan peningkatan kadar CO₂ sebesar 1.000 ppm (Waworundeng & Lengkong, 2018). Penelitian lain di Swedia mengungkapkan bahwa peningkatan aliran udara ke dalam kelas sebesar 1,3–12,8 liter/detik dapat mengurangi kadar CO₂ di dalam kelas sebesar 25%, yang berdampak pada penurunan kasus gejala asma sebesar 8% (Waworundeng & Lengkong, 2018). Kadar CO₂ yang tinggi tidak hanya menurunkan konsentrasi belajar, tetapi juga berpengaruh langsung pada nilai akademik mahasiswa (Lavy *et al.*, 2014).

Tantangan utama dalam mengelola kualitas udara dalam ruang kelas adalah kurangnya sistem *monitoring* yang dapat memberikan data secara *real-time*. Sebagian besar bangunan pendidikan belum dilengkapi dengan sistem pemantauan yang memadai, sehingga seringkali masalah kualitas udara tidak terdeteksi hingga menimbulkan dampak kesehatan yang signifikan (Grassie *et al.*, 2025). Padahal, *monitoring* kualitas udara secara *real-time* sangat penting untuk mengambil tindakan preventif sebelum kondisi memburuk. Teknologi *Internet of Things* (IoT) menawarkan solusi potensial untuk mengatasi tantangan ini. Dengan memanfaatkan mikrokontroler dan sensor yang terhubung ke *platform* IoT, pengukuran parameter kualitas udara dapat dilakukan secara otomatis dan hasilnya dapat divisualisasikan secara *real-time* melalui antarmuka *web* (Grassie *et al.*, 2025). Sistem seperti ini tidak hanya memungkinkan pemantauan berkelanjutan, tetapi juga memudahkan manajemen pengambilan keputusan untuk meningkatkan kualitas lingkungan belajar.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem IoT untuk *monitoring* kualitas udara *indoor* dengan menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler dan sensor MQ135 yang mampu mendeteksi berbagai gas polutan termasuk kadar CO₂. Sistem yang dikembangkan akan dilengkapi dengan visualisasi data berbasis *web* yang menampilkan kondisi kualitas udara secara *real-time*. Lebih lanjut, penelitian ini juga akan menganalisis korelasi antara parameter kualitas udara (terutama kadar CO₂) dengan performa akademik mahasiswa untuk memberikan bukti empiris tentang pentingnya menjaga kualitas udara dalam ruangan pembelajaran. Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan kebijakan dalam menciptakan lingkungan belajar yang sehat dan mendukung optimalisasi proses pembelajaran di institusi pendidikan.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) yang berfokus pada perancangan, pengembangan, serta pengujian sistem *Internet of Things* (IoT) untuk *monitoring* kualitas udara dalam ruangan secara *real-time* berbasis *web*. Pendekatan ini dipilih karena penelitian tidak hanya bertujuan untuk menganalisis fenomena kualitas udara *indoor*, tetapi juga menghasilkan sebuah produk

berupa sistem *monitoring* yang dapat diimplementasikan secara langsung pada lingkungan pembelajaran. Tahapan penelitian meliputi perancangan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, pengujian sistem, serta pengambilan dan analisis data kualitas udara *indoor*.

2.1 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras utama meliputi mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan data dan sensor gas MQ135 sebagai pendeteksi kualitas udara, khususnya estimasi kadar CO₂ dan gas polutan lainnya. Perangkat pendukung yang digunakan antara lain *breadboard*, kabel *jumper*, serta komputer/laptop yang digunakan untuk pemrograman sistem dan pengelolaan data. Perangkat lunak yang digunakan meliputi Arduino IDE untuk pemrograman ESP32, *web server* berbasis PHP, *database* MySQL yang dikelola melalui phpMyAdmin, serta bahasa JavaScript untuk keperluan visualisasi data pada antarmuka *web*. Daftar alat dan bahan disajikan dalam bentuk tabel untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai komponen sistem yang digunakan.



Gambar 1. Komponen Utama Sistem Monitoring: Modul ESP32, Sensor MQ135, Breadboard, Kabel Jumper, dan Adaptor Daya.

Karbon dioksida (CO₂) merupakan gas hasil metabolisme manusia yang menjadi indikator penting kualitas udara dalam ruangan. Dalam konteks lingkungan belajar, peningkatan kadar CO₂ menandakan sirkulasi udara yang tidak optimal akibat ventilasi yang buruk (Persily & de Jonge, 2017). Kadar CO₂ di udara ruangan umumnya berkisar antara 400–1.000 ppm; nilai di atas 1.000 ppm menunjukkan ventilasi yang tidak memadai dan dapat menurunkan konsentrasi serta kinerja kognitif (Satish *et al.*, 2012). Sensor MQ135 digunakan karena sensitif terhadap berbagai gas seperti amonia, benzena, dan terutama CO₂, sehingga efektif untuk mendeteksi perubahan kualitas udara *indoor* (Chaurasia & Jain, 2021). Dengan demikian, pengukuran konsentrasi CO₂ melalui sensor ini memberikan gambaran akurat tentang tingkat kebersihan udara dan efektivitas sistem ventilasi.

2.2 Lokasi dan Waktu Pengujian

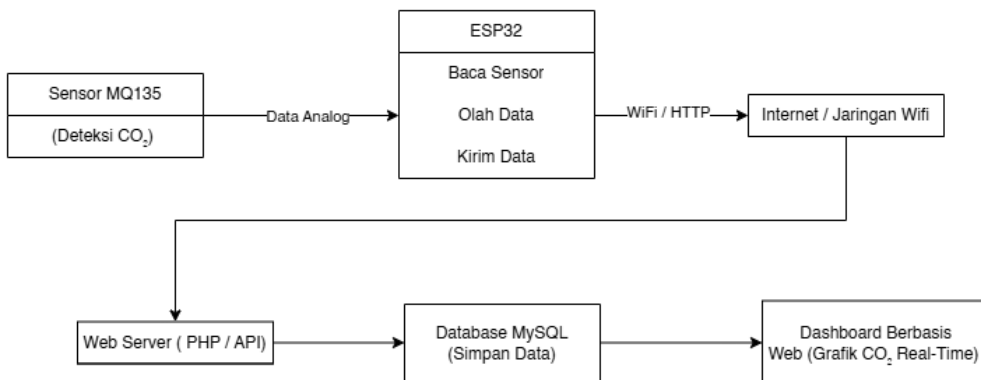
Penelitian ini dilaksanakan di salah satu ruang kelas kampus yang merepresentasikan lingkungan belajar *indoor*. Pemilihan lokasi ini bertujuan untuk memperoleh data kualitas udara yang sesuai dengan kondisi nyata aktivitas pembelajaran. Pengambilan data dilakukan selama periode Mei hingga Oktober, sehingga data yang diperoleh mencerminkan variasi kondisi kualitas udara *indoor* dalam rentang waktu pengamatan tersebut.



Gambar 2. Kondisi Ruang Kelas sebagai Lokasi Pengujian, dengan Sensor Gas Terpasang pada Dinding untuk Memantau Kualitas Udara di Dalam Ruangan.

2.3 Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem menggambarkan alur kerja sistem *monitoring* kualitas udara *indoor* berbasis IoT. Sistem terdiri dari sensor MQ135 sebagai *input* untuk mendeteksi konsentrasi gas polutan (CO₂), mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan, jaringan WiFi sebagai media komunikasi, serta *server web* sebagai pusat penyimpanan dan visualisasi data. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh ESP32 dan dikirimkan ke *server* melalui koneksi internet, kemudian disimpan ke dalam *database* dan ditampilkan secara *real-time* melalui *dashboard* berbasis *web* sehingga kondisi kualitas udara *indoor* dapat dipantau secara berkelanjutan.



Gambar 3. Diagram Blok Sistem Monitoring Kualitas Udara Indoor Berbasis IoT

2.4 Perancangan Tabel dan Database

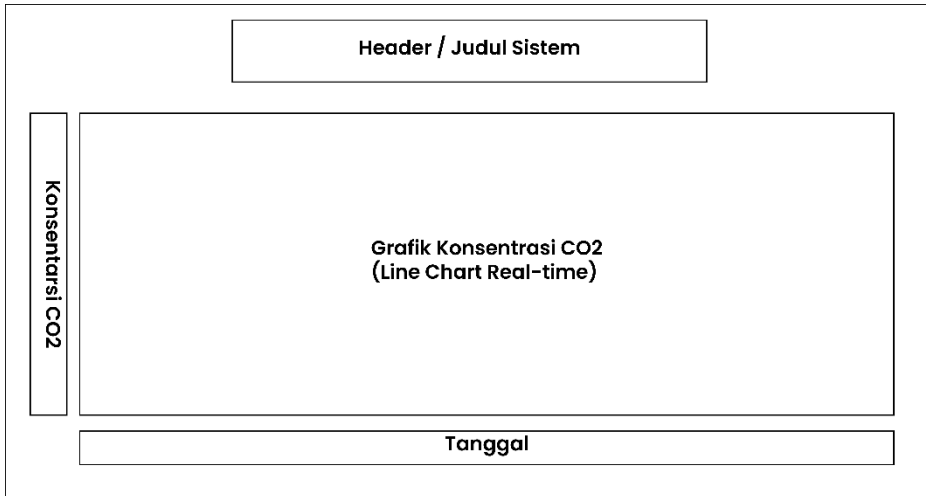
Perancangan *database* menggunakan MySQL untuk menyimpan data hasil pengukuran kualitas udara *indoor*. *Database* dirancang dengan tabel utama yang menyimpan nilai konsentrasi CO₂ dan waktu pengambilan data (*timestamp*). Struktur tabel dibuat sederhana dan efisien untuk mendukung penyimpanan data secara *real-time* dengan interval pengiriman setiap satu menit. Perancangan ini memudahkan proses pengolahan data, analisis tren, serta penyajian informasi dalam bentuk grafik.

Tabel 1. Skema tabel dan *database* penyimpanan data kualitas udara *indoor*

Nama Field	Tipe Data	Length / Values	Keterangan
id	INT (PK)	11	Primary key, auto increment
nilai_co2	FLOAT	5,2	Konsentrasi CO ₂ (ppm)
waktu_pengukuran	DATETIME	-	Timestamp pengambilan data

2.5 Perancangan UI (User Interface)

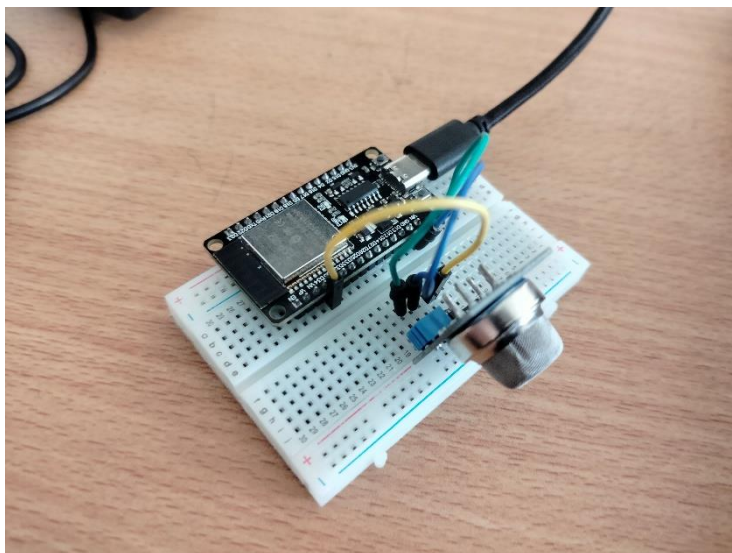
Perancangan antarmuka pengguna (UI) bertujuan untuk menampilkan data kualitas udara secara *real-time* dalam bentuk *dashboard* berbasis *web*. UI dikembangkan menggunakan HTML, CSS, dan JavaScript dengan tampilan sederhana dan mudah dipahami. *Dashboard* menampilkan grafik garis konsentrasi CO₂ yang diperbarui secara dinamis, sehingga pengguna dapat memantau perubahan kualitas udara *indoor* dari waktu ke waktu. Desain UI dibuat responsif agar dapat diakses melalui berbagai perangkat. Rancangan antarmuka pengguna terdiri dari *header* sebagai judul sistem, area utama grafik garis konsentrasi CO₂ secara *real-time*, sumbu konsentrasi CO₂ pada sisi vertikal, serta sumbu waktu pada sisi horizontal. Rancangan UI ini disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Rancangan Antarmuka Pengguna (UI) Dashboard Monitoring Kualitas Udara Indoor

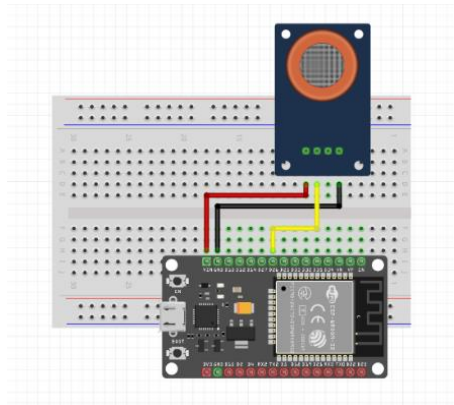
2.6 Perancangan Perangkat Keras

Sistem perangkat keras dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan sensor gas MQ135. Sensor MQ135 berfungsi untuk mendeteksi kualitas udara dengan mengukur konsentrasi gas polutan, termasuk estimasi kadar karbon dioksida (CO₂), dan dihubungkan langsung ke salah satu pin *Analog-to-Digital Converter* (ADC) pada ESP32 tanpa menggunakan modul tambahan.



Gambar 5. Implementasi Fisik Sensor Gas MQ yang Terhubung dengan Modul ESP32 pada Breadboard sebagai Prototipe Sistem Monitoring Kualitas Udara.

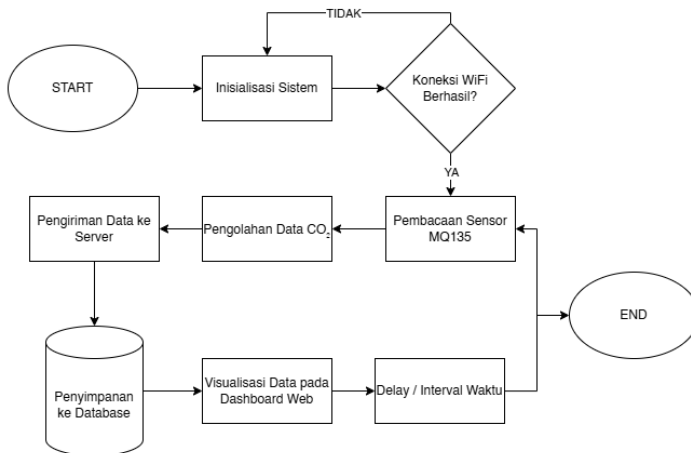
Gambar 5 menunjukkan tampilan fisik perangkat *monitoring* kualitas udara *indoor* yang telah dirangkai. ESP32 berperan sebagai pengendali utama yang melakukan pembacaan data sensor serta mengirimkan data hasil pengukuran ke *server* melalui jaringan WiFi secara *real-time*. Sensor dan mikrokontroler memperoleh suplai daya langsung dari ESP32, sehingga rangkaian yang digunakan bersifat sederhana dan efisien. Konfigurasi ini memungkinkan sistem bekerja secara stabil dalam melakukan pembacaan dan pengiriman data secara *real-time*. Lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 6. Rangkaian Sensor Gas MQ yang Terhubung dengan Modul ESP32

2.7 Perancangan Alur Sistem

Alur kerja sistem diawali dengan proses inialisasi ESP32, sensor MQ135, dan koneksi jaringan WiFi. Setelah inialisasi berhasil, sensor MQ135 melakukan pembacaan kualitas udara secara berkala, kemudian data hasil pembacaan diproses oleh ESP32 dan dikirimkan ke *server web* menggunakan koneksi internet. Data yang diterima oleh *server* disimpan ke dalam *database MySQL* untuk keperluan penyimpanan dan analisis lebih lanjut, lalu ditampilkan pada antarmuka *web* dalam bentuk grafik garis (*line chart*) sehingga pengguna dapat memantau perubahan kualitas udara *indoor* secara *real-time*. Alur sistem ini disajikan dalam bentuk *flowchart* untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai proses kerja sistem.



Gambar 7. Flowchart Sistem Monitoring Kualitas Udara Indoor Berbasis IoT

2.8 Perancangan Perangkat Lunak dan Visualisasi Data

Perangkat lunak sistem terdiri dari dua bagian utama, yaitu program pada ESP32 dan aplikasi *web*. Program pada ESP32 dikembangkan menggunakan Arduino IDE untuk membaca data sensor MQ135, mengolah nilai pembacaan, serta mengirimkan data ke *server* secara *real-time* melalui jaringan WiFi. Pada sisi *server*, aplikasi *web* dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman PHP dan JavaScript

tanpa menggunakan *framework* tambahan. Data yang diterima dari ESP32 disimpan ke dalam *database* MySQL, kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik garis yang menampilkan perubahan kualitas udara dari waktu ke waktu. Visualisasi ini bertujuan untuk memudahkan pengguna dalam memantau kondisi kualitas udara *indoor* secara berkelanjutan dan mendukung pengambilan keputusan terkait pengelolaan lingkungan belajar.

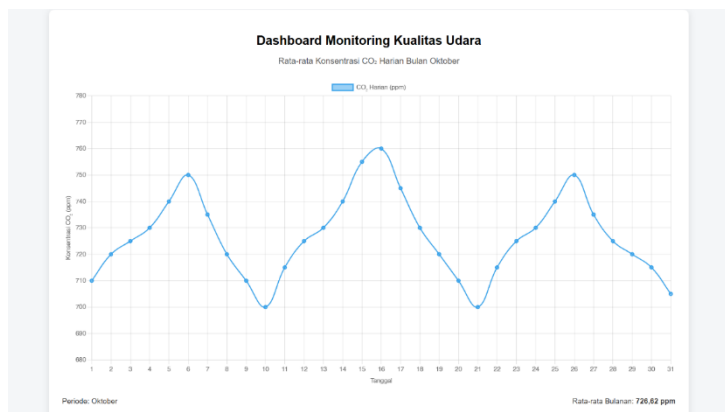
3. Hasil

Kinerja sistem *Internet of Things* (IoT) yang telah dikembangkan diuraikan melalui data kualitas udara *indoor* yang diperoleh selama periode pengamatan. Hasil yang disajikan mencakup pengukuran konsentrasi karbon dioksida (CO₂) di ruang kelas, tampilan *dashboard* berbasis *web* sebagai media visualisasi data secara *real-time*, serta hubungannya dengan performa akademik mahasiswa. Pengukuran kualitas udara *indoor* dilakukan dengan memantau konsentrasi karbon dioksida (CO₂) menggunakan sensor MQ135 yang terintegrasi dengan sistem IoT berbasis ESP32. Data dikumpulkan secara *real-time* dengan interval pengambilan setiap satu menit dan disimpan ke dalam *database server*. Untuk keperluan analisis dan penyajian hasil, data pengukuran diolah menjadi nilai rata-rata bulanan selama periode Mei hingga Oktober. Selain data kualitas udara, penelitian ini juga menggunakan data nilai rata-rata mahasiswa yang diperoleh dari tes ulangan sederhana yang dilaksanakan setiap bulan sebagai indikator performa akademik, yang diselaraskan dengan periode pengambilan data kualitas udara. Tabel berikut menyajikan gabungan data rata-rata konsentrasi CO₂ dan rata-rata nilai mahasiswa per bulan.

Tabel 2. Rata-rata Konsentrasi CO₂ dan Rata-rata Nilai Mahasiswa per Bulan

Bulan	Rata-rata CO ₂ (ppm)	Rata-rata Nilai Mahasiswa
Mei	743,93	82,12
Juni	821,43	78,65
Juli	712,10	83,76
Agustus	868,27	76,44
September	997,78	74,37
Oktober	726,61	83,34

Pola data menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi CO₂ umumnya diikuti oleh penurunan rata-rata nilai mahasiswa, sedangkan penurunan konsentrasi CO₂ cenderung diikuti oleh peningkatan nilai mahasiswa. Kondisi ini terlihat jelas pada bulan Agustus dan September, di mana nilai rata-rata CO₂ berada pada tingkat yang relatif tinggi dan diikuti oleh penurunan nilai akademik mahasiswa. Sebaliknya, pada bulan Juli dan Oktober, konsentrasi CO₂ yang lebih rendah beriringan dengan peningkatan rata-rata nilai mahasiswa.



Gambar 8. Tampilan Dashboard Monitoring Kualitas Udara yang Menampilkan Grafik Rata-Rata Konsentrasi CO₂ Harian pada Bulan Oktober

Sistem *monitoring* yang dikembangkan dilengkapi dengan *dashboard* berbasis *web* yang berfungsi untuk menampilkan hasil pemantauan kualitas udara secara *real-time*. *Dashboard* ini hanya dapat diakses melalui domain pribadi dan dirancang untuk menampilkan grafik garis (*line chart*) yang merepresentasikan nilai rata-rata konsentrasi CO₂ harian. Tampilan *dashboard* menunjukkan perubahan konsentrasi CO₂ dari hari ke hari secara visual dan berkelanjutan, sehingga memudahkan pengguna dalam mengidentifikasi pola fluktuasi kualitas udara *indoor*, seperti peningkatan konsentrasi CO₂ pada jam atau hari dengan aktivitas pembelajaran yang lebih tinggi. Keberadaan *dashboard* ini memungkinkan pemantauan kualitas udara dilakukan secara berkelanjutan tanpa memerlukan pengukuran manual, dan informasi yang ditampilkan dapat menjadi dasar dalam pengambilan keputusan terkait pengelolaan ventilasi dan kenyamanan ruang kelas.

4. Pembahasan

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi CO₂ di ruang kelas selama periode Mei hingga Oktober berada dalam rentang 712,10 ppm hingga 997,78 ppm. Apabila dibandingkan dengan standar baku mutu kualitas udara dalam ruangan, nilai tertinggi yang tercatat pada bulan September (997,78 ppm) mendekati ambang batas yang ditetapkan oleh WHO dan EPA, yaitu tidak melebihi 1.000 ppm di lingkungan ruang kelas (Rostami *et al.*, 2025). Sementara itu, ASHRAE Standard 62.1 mengasosiasikan kadar CO₂ lebih dari 700 ppm di atas konsentrasi udara luar—yang umumnya setara dengan sekitar 1.000 ppm—sebagai indikasi ventilasi yang tidak memadai (Toyinbo, 2023). Dengan demikian, kondisi udara pada bulan September dapat dikategorikan berada di zona kritis yang berpotensi mengganggu kenyamanan dan produktivitas penghuni ruangan.

Pola fluktuasi konsentrasi CO₂ yang ditemukan dalam penelitian ini sejalan dengan temuan berbagai studi sebelumnya yang menegaskan adanya hubungan antara kualitas udara *indoor* dan performa akademik. Toyinbo (2023) melaporkan bahwa setiap peningkatan 100 ppm kadar CO₂ di ruang kelas dapat berdampak negatif terhadap kehadiran dan kinerja siswa. Lebih lanjut, Kabirikopaei *et al.* (2021) menemukan bahwa kadar CO₂ yang tinggi akibat ventilasi yang tidak memadai secara langsung memengaruhi kemampuan belajar mahasiswa, dengan hubungan linier antara laju ventilasi dan nilai ujian yang telah dibuktikan secara observasional. Hal ini konsisten dengan data penelitian ini, di mana bulan September mencatat konsentrasi CO₂ tertinggi (997,78 ppm) sekaligus rata-rata nilai mahasiswa terendah (74,37), sedangkan bulan Juli dengan konsentrasi CO₂ terendah (712,10 ppm) mencatat rata-rata nilai tertinggi (83,76).

Temuan ini juga diperkuat oleh hasil kajian Fan *et al.* (2023) yang menyimpulkan bahwa paparan jangka pendek terhadap kadar CO₂ tinggi di dalam ruangan dapat berdampak negatif terhadap kinerja kognitif manusia, dengan batas konsentrasi yang disarankan kurang dari 1.000 ppm untuk lingkungan yang membutuhkan kemampuan kognitif tinggi. Guo *et al.* (2023) turut membuktikan bahwa paparan CO₂ pada konsentrasi 2.500 ppm selama satu jam menyebabkan penurunan signifikan pada kemampuan penalaran, memori jangka pendek, dan konsentrasi mahasiswa dibandingkan dengan paparan pada 500 ppm. Meskipun konsentrasi CO₂ dalam penelitian ini tidak mencapai level tersebut, kecenderungan penurunan performa pada bulan-bulan dengan kadar CO₂ lebih tinggi tetap menunjukkan pola yang konsisten dengan literatur yang ada.

Dari sisi efektivitas sistem, perangkat *monitoring* berbasis IoT yang dikembangkan dalam penelitian ini terbukti mampu merekam dan menampilkan data kualitas udara secara *real-time* melalui *dashboard* berbasis *web*. Kemampuan pemantauan berkelanjutan ini menjadi keunggulan utama dibandingkan pengukuran manual yang bersifat sesaat dan tidak dapat menangkap dinamika perubahan kualitas udara sepanjang hari. Arya *et al.* (2024) menegaskan bahwa kadar CO₂ yang meningkat di ruang kelas merupakan sinyal adanya permasalahan ventilasi yang berkorelasi langsung dengan penurunan performa akademik, sehingga sistem pemantauan yang berkelanjutan sangat diperlukan sebagai langkah deteksi dini. Informasi yang dihasilkan oleh sistem ini dapat dimanfaatkan oleh pengelola gedung untuk mengambil tindakan korektif, seperti membuka ventilasi tambahan atau mengatur jadwal penggunaan ruangan, guna menjaga konsentrasi CO₂ tetap berada di bawah ambang batas yang direkomendasikan. Dengan demikian, implementasi sistem IoT untuk *monitoring* kualitas udara *indoor* memiliki potensi besar dalam mendukung terciptanya lingkungan

belajar yang lebih sehat dan kondusif bagi peningkatan performa akademik mahasiswa.

5. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem *monitoring* kualitas udara *indoor* berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan ESP32 dan sensor MQ135 berhasil diimplementasikan dan berfungsi dengan baik. Sistem ini mampu melakukan pengukuran konsentrasi karbon dioksida (CO₂) secara *real-time* dan menyajikan data melalui *dashboard* berbasis *web*, sehingga memudahkan pemantauan kondisi kualitas udara di ruang kelas. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi CO₂ di ruang kelas mengalami fluktuasi selama periode pengamatan. Pola data memperlihatkan kecenderungan bahwa peningkatan kadar CO₂ diikuti oleh penurunan rata-rata nilai akademik mahasiswa, sedangkan penurunan kadar CO₂ cenderung beriringan dengan peningkatan performa akademik. Temuan ini mengindikasikan bahwa kualitas udara *indoor* memiliki peran penting dalam mendukung kenyamanan dan konsentrasi belajar mahasiswa.

Sebagai saran, pengembangan sistem ke depannya dapat dilakukan dengan menambahkan sensor lingkungan lain, seperti suhu dan kelembaban, untuk memperoleh gambaran kondisi ruang kelas yang lebih komprehensif. Selain itu, disarankan untuk melakukan kalibrasi sensor secara berkala guna meningkatkan akurasi pengukuran. Penelitian selanjutnya juga dapat melibatkan lebih banyak ruang kelas, periode pengamatan yang lebih panjang, serta analisis statistik yang lebih mendalam untuk memperkuat kajian mengenai hubungan antara kualitas udara *indoor* dan performa akademik mahasiswa.

Referensi

- Arya, V. K., Rasheed, E. O., Samarasinghe, D. A. S., & Wilkinson, S. (2024). Comparative analysis of indoor air quality and thermal comfort standards in school buildings across New Zealand with other OECD countries. *Buildings*, 14(6), 1556. <https://doi.org/10.3390/buildings14061556>
- Bain-Reguis, N., & Smith, A. (2024). An international review of building standards and guidelines on thermal comfort and ventilation for school buildings. *Transdisciplinary Workplace*, 402.
- Chaurasia, S., & Jain, P. (2021). Performance analysis of MQ series gas sensors for indoor air quality monitoring using IoT. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 10(5), 2235–2242. <https://doi.org/10.15662/IJAREEIE.2021.1005012>
- Fan, Y., Cao, X., Zhang, J., Lai, D., & Pang, L. (2023). Short-term exposure to indoor carbon dioxide and cognitive task performance: A systematic review and meta-analysis. *Building and Environment*, 237, 110331. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110331>
- Fitria, L., Wulandari, R. A., Hermawati, E., & Susanna, D. (2008). Kualitas udara dalam ruang perpustakaan universitas "X" ditinjau dari kualitas biologi, fisik, dan kimiawi. *Makara Kesehatan*, 12(2), 76–82.
- Grassie, D., Milczewska, K., Renneboog, S., Scuderi, F., & Dimitroulopoulou, S. (2025). Impact of indoor air quality, including thermal conditions, in educational buildings on health, wellbeing, and performance: A scoping review. *Environments*, 12, 1–40.
- Guo, M., Yu, W., Sun, Y., Wang, L., Zhou, H., & Zhang, Y. (2023). Effects of increasing indoor negative air ions on cognitive performance and health of high pure CO₂ level-exposed college students. *Indoor Air*, 2023(1), 8298339. <https://doi.org/10.1155/2023/8298339>

- Kabirikopaei, A., Lau, J., Nord, J., & Bovaird, J. (2021). Identifying the K-12 classrooms' indoor air quality factors that affect student academic performance. *Science of the Total Environment*, 786, 147498. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147498>
- Lavy, V., Ebenstein, A., & Roth, S. (2014). *The impact of short-term exposure to ambient air pollution on cognitive performance and human capital formation* (NBER Working Paper No. xxxx). National Bureau of Economic Research.
- Persily, A., & de Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27(5), 868–879. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>
- Rahmawati, D. S., & Khairina, R. L. (2020). Pengaruh kualitas udara dalam ruangan bagi performa akademik pelajar: Sebuah tinjauan literatur. *Jurnal [Nama Jurnal]*, 5(1), 34–39.
- Rodliyah, S., & Suyanto, S. (2021). Pendeteksi kebocoran gas berbasis IoT. *Exact Papers in Compilation (EPiC)*, 3(4), 433–438. <https://doi.org/10.32764/epic.v3i4.522>
- Rostami, K., Bahmanipour, S., Sayadi, H., & Souri, S. (2025). Assessment of classroom air quality using the carbon dioxide index. *Journal of Occupational Hygiene Engineering*, 11(4). <https://doi.org/10.32592/joohe.11.4.334>
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental Health Perspectives*, 120(12), 1671–1677. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>
- Toyinbo, O. (2023). Indoor environmental quality, pupils' health, and academic performance—a literature review. *Buildings*, 13(9), 2172. <https://doi.org/10.3390/buildings13092172>
- Waworundeng, D., & Lengkong, O. (2018). Sistem monitoring dan notifikasi kualitas udara dalam ruangan dengan platform IoT. *Cogito Smart Journal*, 4(1), 94–103.