E-ISSN: 3031-8629
P-ISSN: 3032-3258
Halaman 7364-7375
Volume 3 Nomor 4 Tahun 2026

Rancang Bangun Sistem *Monitoring* Kualitas Udara Ruangan Berbasis IoT

Wan Salma Nurkhairin Fitri[1], Rahyul Amri[2]

[1,2]Universitas Riau

Email author: wan.salma5057@student.unri.ac.id, rahyul.amri@lecturer.unri.ac.id

Abstrak

Kualitas udara dalam ruangan merupakan faktor penting yang memengaruhi kesehatan penghuni. Aktivitas di dalam ruangan berpotensi menghasilkan polutan seperti gas berbahaya dan asap yang tidak terdeteksi oleh indera manusia. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun aplikasi web sistem *monitoring* kualitas udara ruangan berbasis *Internet of Things* (IoT) yang tidak hanya menyajikan data sensor secara *real-time*, tetapi juga mengklasifikasikan kondisi udara dan memberikan rekomendasi tindakan preventif. Sistem menerima data parameter gas CO_2, NH_3, CO, dan H_2 dari perangkat IoT (sensor MQ-135 dan MQ-2). Metode pengembangan sistem menggunakan model *Waterfall*. Data yang diterima divalidasi, diklasifikasikan ke dalam kategori Baik, Sedang, Tidak Sehat, dan Berbahaya berdasarkan ambang batas, lalu dipetakan ke rekomendasi tindakan berbasis aturan (*rule-based*). Aplikasi dibangun menggunakan Laravel, Livewire, dan MySQL. Pengujian *black-box* terhadap 29 skenario fungsional, validasi data, klasifikasi, dan rekomendasi menunjukkan hasil yang valid. Pengujian pada tiga kondisi ruangan di Laboratorium Dasar Sistem Kendali (Lab. DSK) Universitas Riau menunjukkan sistem mampu merespons perubahan kondisi udara dengan baik, terutama saat ruangan diberi paparan asap. Sistem ini diharapkan dapat membantu pengguna memantau kualitas udara dan mengambil langkah preventif secara cepat.

Kata kunci: *Internet of Things*, kualitas udara ruangan, *dashboard* web, *rule-based*.

Abstract

Indoor air quality is a crucial factor affecting occupants' health. Indoor activities can potentially generate pollutants such as hazardous gases and smoke that are undetectable by human senses. This research aims to design and build an IoT-based indoor air quality monitoring web application that not only presents sensor data in real-time but also classifies air conditions and provides preventive action recommendations. The system receives gas parameter data (CO_2, NH_3, CO, and H_2) from IoT devices (MQ-135 and MQ-2 sensors). The system development method uses the

Waterfall model. The received data is validated, classified into Good, Moderate, Unhealthy, and Hazardous categories based on threshold values, and then mapped to rule-based action recommendations. The application is built using Laravel, Livewire, and MySQL. Black-box testing of 29 scenarios covering functional, data validation, classification, and recommendation aspects showed valid results. Testing under three room conditions at the Control System Basic Laboratory (Lab. DSK) Universitas Riau demonstrated the system's ability to respond to air condition changes effectively, especially when the room was exposed to smoke. This system is expected to help users monitor air quality and take preventive measures quickly.

Keywords: *Internet of Things, indoor air quality, web dashboard, rule-based.*

PENDAHULUAN

Kualitas udara dalam ruangan (*Indoor Air Quality*) merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kesehatan manusia. Sebagian besar waktu manusia dihabiskan di lingkungan tertutup untuk bekerja, belajar, maupun beristirahat. Paparan polusi seperti gas mudah terbakar, asap, serta senyawa kimia berbahaya yang umum terdeteksi di dalam ruangan dapat menyebabkan gangguan pada sistem pernapasan. Polutan tersebut dapat berasal dari asap rokok, aktivitas memasak, penggunaan bahan pembersih kimia, ventilasi yang buruk, hingga peralatan elektronik (World Health Organization, 2026; Nazli et al., 2024). Oleh karena itu, pemantauan kualitas udara dalam ruangan menjadi hal yang sangat penting.

Pemantauan kualitas udara secara manual memiliki keterbatasan karena tidak dapat memberikan informasi secara berkelanjutan. Padahal, perubahan kualitas udara dapat terjadi secara bertahap maupun tiba-tiba. Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memberikan solusi dalam proses pemantauan kondisi lingkungan secara otomatis dan berkelanjutan. Teknologi IoT memungkinkan perangkat sensor terhubung dengan jaringan internet untuk mengumpulkan dan mengirimkan data lingkungan secara *real-time* (Atzori et al., 2010; Khoeriah Utami et al., 2025). Aplikasi web berfungsi sebagai media pengolahan, penyimpanan, serta penyajian data sensor sehingga informasi dapat diakses dengan mudah oleh pengguna melalui *browser* (Sung & Hsiao, 2021). *Dashboard* menjadi komponen penting untuk memvisualisasikan data sensor dalam bentuk grafik dan indikator sehingga memudahkan pemantauan (Hariyanti et al.,

2011; Gunawan et al., 2023).

Penelitian terdahulu seperti yang dilakukan oleh Fikri et al. (2025) telah mengimplementasikan sistem *monitoring* kualitas udara berbasis IoT dengan memanfaatkan logika *fuzzy* untuk menghasilkan Indeks Kualitas Udara (AQI) dan menampilkannya melalui *dashboard* web. Namun, pengujian pada penelitian tersebut lebih difokuskan pada keakuratan pembacaan sensor, belum mencakup pengujian fungsional sistem pada beberapa skenario kondisi ruangan nyata. Selain itu, informasi yang disajikan umumnya berhenti pada nilai sensor dan label kategori, belum memberikan saran tindakan preventif yang dapat dilakukan pengguna (Wibowo et al., 2024; Khoeriah Utami et al., 2025).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun aplikasi web yang mampu memantau kualitas udara ruangan secara *real-time* berdasarkan data dari perangkat IoT. Sistem ini tidak hanya mengolah data parameter kualitas udara menjadi informasi kategori kondisi yang mudah dipahami, tetapi juga memberikan rekomendasi tindakan preventif berbasis aturan (*rule-based*). Fungsionalitas sistem diuji menggunakan metode *black-box* pada beberapa skenario kondisi di Laboratorium Dasar Sistem Kendali (Lab. DSK) Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode penelitian dan pengembangan (*Research and Development*) dalam bidang Rekayasa Perangkat Lunak dengan pendekatan model *Waterfall* yang meliputi analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi, pengujian, dan pemeliharaan (Sommerville, 2016; Pressman & Maxim, 2020). Sumber data penelitian berasal dari perangkat IoT yang mengirim nilai kadar gas karbon dioksida (CO_2), amonia (NH_3), karbon monoksida (CO), dan hidrogen (H_2) dalam satuan *parts per million* (ppm), waktu pembacaan, serta identitas perangkat ke aplikasi web melalui jaringan internet. Keempat gas dipilih sesuai dengan kondisi Lab. DSK yang belum memiliki pendingin udara (AC) dan digunakan untuk kegiatan belajar mengajar serta praktikum. Nilai ppm tersebut dihitung oleh perangkat sebagai indikator relatif kualitas

udara ruangan terhadap kondisi awal saat perangkat dinyalakan (*baseline*), bukan konsentrasi absolut (Wibowo et al., 2024). Sistem dirancang untuk menerima data melalui REST API, memvalidasi kelengkapan dan formatnya, mengklasifikasikan data valid berdasarkan ambang batas (Solihat et al., 2026) ke dalam empat kategori (Baik, Sedang, Tidak Sehat, dan Berbahaya) dengan kategori keseluruhan ditentukan dari kategori terburuk, serta menghasilkan rekomendasi tindakan preventif menggunakan aturan *if-then* yang mengacu pada strategi perbaikan kualitas udara dalam ruangan dari U.S. Environmental Protection Agency (2026b) dan Hayes-Roth (1985). Pengujian sistem dilakukan dengan metode *black-box* untuk menguji fungsionalitas aplikasi, validasi data, klasifikasi, dan rekomendasi (Myers et al., 2012; Pressman & Maxim, 2020), serta pengujian kondisi ruangan pada tiga skenario: ruangan normal, ruangan tertutup, dan ruangan berasap.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Implementasi Sistem

Aplikasi web hasil penelitian ini diberi nama SIMKU (Sistem *Monitoring* Kualitas Udara). Aplikasi dibangun menggunakan *framework* Laravel, Livewire untuk tampilan yang diperbarui otomatis setiap 5 detik, Tailwind CSS, Chart.js untuk grafik, dan MySQL sebagai basis data (Laravel, 2026; Livewire, 2026; Chart.js, 2026). Terdapat tujuh halaman utama yang dapat diakses tanpa *login*: Beranda, Detail Ruangan, Riwayat, Rekomendasi Tindakan, Status Perangkat, Panduan Sistem, dan Kuesioner UEQ.

Perangkat IoT mengirim data ke *endpoint* /api/telemetry (Fielding et al., 2022). Data yang tidak lengkap atau formatnya salah akan ditolak dengan respons HTTP 422 dan dicatat pada log penolakan. Data yang valid disimpan dan diolah menjadi kategori per gas, kategori keseluruhan, gas penyebab utama, serta rekomendasi tindakan. Contohnya, data dengan CO_2 70 ppm, NH_3 30 ppm, CO 55 ppm, dan H_2 10 ppm akan menghasilkan kategori CO_2 Sedang, NH_3 Baik, CO Tidak Sehat, dan H_2 Baik. Kategori keseluruhannya adalah Tidak Sehat dengan penyebab utama CO, dan sistem memberikan rekomendasi tingkat "Perlu Tindakan".

Tabel 1. Ambang Batas Kategori Indikator Kualitas Udara Ruangan

Kategori Kualitas Udara	CO_2 (ppm)	NH_3 (ppm)	CO (ppm)	H_2 (ppm)
Baik	< 50	< 40	< 20	< 15
Sedang	< 100	< 80	< 50	< 40
Tidak Sehat	< 150	< 120	< 80	< 60
Berbahaya	≥ 150	≥ 120	≥ 80	≥ 60

(Sumber: Solihat et al., 2026)

Tabel 2. Aturan Rekomendasi Tindakan Preventif Berdasarkan Kategori Kualitas Udara

Kategori Kualitas Udara	Tingkat Rekomendasi	Rekomendasi
Baik	Normal	Kondisi udara relatif baik. Pertahankan ventilasi ruangan.
Sedang	Waspada	Tingkatkan sirkulasi udara, misalnya dengan membuka jendela atau pintu.
Tidak Sehat	Perlu Tindakan	Tingkatkan ventilasi, periksa dan kurangi sumber polutan seperti asap atau gas, serta kurangi aktivitas di dalam ruangan.
Berbahaya	Segera Bertindak	Segera tingkatkan ventilasi, hentikan sumber polutan, dan pertimbangkan meninggalkan ruangan sementara sampai kondisi udara membaik.

Hasil Pengujian *Black-Box*

Pengujian *black-box* dilaksanakan untuk menguji fungsionalitas aplikasi, validasi data, klasifikasi kualitas udara, dan rekomendasi (Myers et al., 2012). Hasil rekapitulasi pengujian menunjukkan bahwa dari 29 skenario yang diuji, seluruhnya berstatus Valid. Pengujian validasi data memastikan sistem hanya menerima data yang lengkap dan berformat benar. Pengujian klasifikasi memastikan nilai yang tepat pada batas ambang (misalnya CO_2 50 ppm) masuk ke kategori yang lebih buruk (Sedang), sesuai dengan aturan batas eksklusif (Pedregosa et al., 2011). Pengujian rekomendasi juga menunjukkan hasil yang sesuai, di mana setiap kategori keseluruhan dipetakan secara tepat ke tingkat dan teks rekomendasi yang telah ditentukan.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Pengujian *Black-Box*

No	Pengujian	Jumlah Skenario	Valid
1	Fungsional aplikasi	9	9
2	Validasi data	5	5
3	Klasifikasi kualitas udara	7	7
4	Nilai batas ambang	4	4
5	Rekomendasi tindakan preventif	4	4
	Jumlah	**29**	**29**

Hasil Pengujian pada Beberapa Kondisi Ruangan

Pengujian tiga skenario di Lab. DSK dilakukan untuk melihat respons sistem terhadap perubahan kondisi udara secara langsung. Hasil pengamatan dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian pada Beberapa Kondisi Ruangan

Skenario	Kategori Dominan	Rentang Nilai ppm	Rekomendasi yang Tampil	Kesesuaian
Ruangan normal	Baik (60 dari 60 data)	CO_2 0,00–3,17; NH_3 0,00–2,54; CO 0,00–5,25; H_2 0,00–3,15	Normal	Sesuai
Ruangan tertutup	Baik (60 dari 60 data)	CO_2 0,00–13,92; NH_3 0,00–11,13; CO 0,00–4,27; H_2 0,00–2,56	Normal	Sesuai sebagian
Ruangan berasap	Tidak Sehat (29 dari 60 data)	CO_2 2,56–223,88; NH_3 2,05–179,10; CO 29,24–115,48; H_2 17,54–69,29	Waspada, Perlu Tindakan, dan Segera Bertindak	Sesuai

Pada skenario ruangan normal, kategori keseluruhan tetap Baik dan rekomendasi Normal. Pada skenario ruangan tertutup, kategori tetap Baik karena nilai CO_2 belum melewati ambang batas Sedang (50 ppm) dalam waktu 5 menit, sehingga perubahan kategori yang diharapkan tidak teramati (sesuai sebagian). Pada skenario ruangan berasap, sistem langsung mendeteksi kenaikan gas CO dan H_2 yang signifikan, mengubah kategori menjadi Berbahaya atau Tidak Sehat, dan rekomendasi berubah sesuai dengan kategori tersebut. Hal ini menunjukkan sistem mampu merespons perubahan kondisi udara secara *real-time*.

Pembahasan

Pembahasan ini menjawab tujuan penelitian, yaitu merancang dan membangun sistem *monitoring* kualitas udara ruangan berbasis IoT, merancang sistem rekomendasi berbasis aturan, serta menguji fungsionalitas aplikasi pada kondisi ruangan nyata.

Pemenuhan Tujuan Pertama: Sistem *Monitoring Real-Time* Berbasis IoT

Tujuan pertama penelitian ini adalah merancang dan membangun sistem berbasis IoT untuk memantau kualitas udara ruangan secara *real-time*. Hasil implementasi menunjukkan bahwa aplikasi web SIMKU berhasil menerima data dari perangkat IoT, memvalidasi, menyimpan, dan menyajikannya pada tujuh halaman yang diperbarui otomatis setiap 5 detik. Pengujian *black-box* membuktikan bahwa penerimaan, penolakan, pengolahan, dan penyajian data berjalan sesuai harapan. Ketika data baru diterima, tampilan Beranda berubah sekitar 2 detik kemudian tanpa perlu memuat ulang halaman. Hal ini sejalan dengan penelitian Fikri et al. (2025) dan Khoeriah Utami et al. (2025) yang menunjukkan bahwa integrasi IoT dengan aplikasi web memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara *real-time* dan aksesibel, serta didukung oleh arsitektur IoT yang memisahkan lapisan penginderaan, jaringan, dan aplikasi (Atzori et al., 2010; Ullo & Sinha, 2020).

Pembuktian dengan perangkat IoT nyata di Lab. DSK memperkuat hasil ini. Selama pengujian tiga kondisi ruangan, aplikasi menerima 180 data dalam 15 menit, atau rata-rata satu data setiap 5 detik, dengan selang terlama antardata 7 detik. Interval ini masih berada di bawah batas 30 detik yang ditetapkan untuk status perangkat "Terhubung", sehingga sistem dapat diandalkan untuk pemantauan berkelanjutan. Kemampuan sistem menyimpan data historis juga memungkinkan pengguna menelusuri kembali kondisi udara pada periode tertentu melalui halaman Riwayat, yang tidak dimiliki oleh sistem pemantauan manual (Shinde & Karode, 2017).

Pemenuhan Tujuan Kedua: Sistem Rekomendasi Berbasis Aturan

Tujuan kedua adalah merancang sistem rekomendasi berbasis aturan yang memberikan saran tindakan preventif sesuai kondisi kualitas udara terkini. Hasil pengujian menunjukkan bahwa keempat aturan *if-then* pada Tabel 2 menghasilkan

tingkat dan teks rekomendasi yang tepat untuk setiap kategori. Rekomendasi disimpan bersama setiap data yang diterima sehingga selalu mengikuti pembacaan terbaru. Karena aturan hanya bergantung pada kategori keseluruhan, ketepatan rekomendasi bergantung pada ketepatan klasifikasi, yang telah diuji secara menyeluruh, termasuk nilai tepat pada batas ambang.

Pada pengujian kondisi ruangan, rekomendasi tetap "Normal" pada kondisi normal dan tertutup karena kategorinya tetap Baik. Namun, saat ruangan diberi paparan asap, rekomendasi berubah secara dinamis menjadi "Waspada", "Perlu Tindakan", atau "Segera Bertindak" sesuai dengan kategori setiap data. Hal ini menunjukkan bahwa sistem rekomendasi tidak hanya berfungsi secara statis, tetapi juga responsif terhadap perubahan kondisi udara. Pendekatan *rule-based* yang dipilih terbukti transparan, mudah diuji, dan mudah dipahami pengguna, sebagaimana dinyatakan oleh Hayes-Roth (1985) bahwa sistem berbasis aturan memungkinkan setiap keputusan ditelusuri kembali ke aturan yang memicunya.

Dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang umumnya berhenti pada nilai sensor, grafik, dan label kategori (Fikri et al., 2025; Khoeriah Utami et al., 2025; Wibowo et al., 2024), aplikasi ini menambahkan dua informasi penting. Pertama, gas penyebab utama ditampilkan pada halaman Beranda, Detail Ruangan, Riwayat, dan Rekomendasi Tindakan sehingga pengguna mengetahui gas spesifik yang menurunkan kategori ruangan. Kedua, setiap kategori dipetakan ke saran tindakan preventif yang mengacu pada strategi perbaikan kualitas udara dalam ruangan dari U.S. Environmental Protection Agency (2026b) dengan tingkat urgensi bertingkat. Rekomendasi tersebut sengaja dibuat sederhana dan umum, tanpa analisis tren, prediksi, atau klaim medis, sesuai dengan batasan penelitian.

Pemenuhan Tujuan Ketiga: Pengujian Fungsional pada Kondisi Ruangan Nyata

Tujuan ketiga adalah menguji fungsionalitas sistem pada beberapa skenario kondisi di satu ruangan uji. Pengujian *black-box* dengan 29 skenario (Tabel 3) menunjukkan seluruh skenario berstatus Valid, termasuk empat bagian tampilan yang diamati langsung di peramban Chrome (Myers et al., 2012; Pressman & Maxim, 2020).

Pengujian tiga kondisi ruangan pada 13 November 2026 menunjukkan bahwa dua skenario (ruangan normal dan berasap) sesuai dengan harapan, sedangkan skenario ruangan tertutup sesuai sebagian. Pada skenario tertutup, kategori yang tampil tetap benar menurut ambang batas, tetapi nilai CO_2 tidak meningkat secara bertahap dan tidak mencapai ambang Sedang dalam 5 menit. Hal ini dapat disebabkan oleh durasi penutupan yang relatif singkat atau jumlah penghuni yang tidak cukup banyak untuk menghasilkan akumulasi CO_2 yang signifikan. Durasi penutupan yang lebih lama atau jumlah penghuni yang lebih banyak kemungkinan diperlukan agar kenaikan CO_2 melewati ambang kategori (Persily & de Jonge, 2017). Meskipun demikian, sistem terbukti mampu menerima data, menampilkan kategori, dan memberikan rekomendasi yang sesuai dengan kondisi ruangan pada skenario normal dan berasap, sehingga tujuan ketiga penelitian tercapai dengan catatan pada skenario ruangan tertutup.

Keterbatasan Penelitian

Hasil penelitian ini perlu dibaca dengan beberapa batasan. Pertama, nilai ppm yang diterima aplikasi merupakan indikator relatif terhadap *baseline* saat perangkat dinyalakan, bukan konsentrasi absolut hasil alat ukur terkalibrasi (Wibowo et al., 2024). Kategori pada aplikasi karena itu menunjukkan perubahan kondisi udara terhadap kondisi awal ruangan, bukan tingkat bahaya menurut standar kesehatan. Kedua, ambang batas yang digunakan dipakai sebagai acuan kategori aplikasi dan bukan baku mutu udara resmi, sehingga kategori "Tidak Sehat" atau "Berbahaya" tidak dapat dibaca sebagai tingkat bahaya menurut standar kesehatan (U.S. Environmental Protection Agency, 2024). Ketiga, pengujian kondisi ruangan dilakukan pada satu ruangan, yaitu Lab. DSK yang belum memiliki pendingin udara, dengan satu perangkat, sehingga hasilnya belum dapat digeneralisasi ke ruangan dengan ukuran, jumlah penghuni, atau sumber polutan yang berbeda.

Implikasi dan Kontribusi

Meskipun memiliki keterbatasan, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem *monitoring* kualitas udara ruangan yang lebih informatif dan teruji fungsionalitasnya pada kondisi nyata. Aplikasi ini tidak hanya menyajikan data

sensor, tetapi juga menerjemahkannya menjadi kategori kondisi udara yang mudah dipahami, menunjukkan gas penyebab utama, dan memberikan rekomendasi tindakan preventif berbasis aturan. Dengan demikian, aplikasi ini dapat berfungsi sebagai sistem pendukung informasi untuk memantau perubahan kualitas udara ruangan, bukan sebagai alat diagnosis medis maupun alat ukur standar laboratorium. Untuk pengembangan selanjutnya, kalibrasi sensor terhadap alat ukur acuan, penambahan fitur notifikasi, serta pengujian pada beberapa ruangan dengan karakteristik berbeda dapat meningkatkan akurasi dan kegunaan sistem.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil implementasi, pengujian, dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Aplikasi web SIMKU berhasil dirancang dan dibangun untuk memantau kualitas udara ruangan secara *real-time*. Aplikasi menerima data CO_2, NH_3, CO, dan H_2 dari perangkat IoT setiap 5 detik, menolak data yang tidak valid, dan menampilkannya pada tujuh halaman yang diperbarui otomatis.
2. Sistem rekomendasi berbasis aturan berhasil memetakan setiap kategori kualitas udara ke satu saran tindakan preventif yang sesuai (Tabel 2). Rekomendasi selalu mengikuti kategori data terbaru dan berubah secara dinamis saat kondisi udara berubah.
3. Pengujian *black-box* terhadap 29 skenario (Tabel 3) menunjukkan seluruh skenario berstatus Valid. Pengujian pada tiga kondisi ruangan (Tabel 4) menunjukkan sistem mampu merespons perubahan kondisi udara dengan baik, terutama saat ruangan diberi paparan asap.

Saran untuk pengembangan selanjutnya adalah melakukan kalibrasi sensor terhadap alat ukur acuan agar kategori dapat dibaca sebagai kadar gas yang sebenarnya, serta menambahkan fitur pemberitahuan (notifikasi) agar pengguna segera mengetahui ketika kualitas udara memburuk.

DAFTAR PUSTAKA

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*,

54(15), 2787–2805.

Chart.js. (2026). *Chart.js documentation*.

Fielding, R. T., Nottingham, M., & Reschke, J. (2022). *HTTP semantics* (RFC 9110). Internet Engineering Task Force.

Fikri, A., Ridwan, M., & Agustine, D. (2025). Implementation Of Internet Of Things (IOT) In Air Quality Monitoring (AQI). *Jurnal Ilmiah Sistem Informasi Dan Ilmu Komputer*, 5(2), 424–443.

Gunawan, A., Gunadi, I. G. A., & Dewi, L. J. E. (2023). Development of a Web-Based Dashboard System for Monitoring Study Programme Accreditation Instruments. *SinkrOn*, 8(3), 1917–1931.

Hariyanti, E., Werdiningsih, I., & Surendro, K. (2011). Model Pengembangan Dashboard Untuk Monitoring Dan Evaluasi Kinerja Perguruan Tinggi. *JUTI: Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi*, 13–20.

Hayes-Roth, F. (1985). Rule-based systems. *Communications of the ACM*, 28(9), 921–932.

Khoeriah Utami, B., Rizqi Fajri, M., & Dwi Chaerani, A. (2025). Sistem Internet Of Things (IoT) Untuk Pemantauan Kualitas Udara Dalam Ruangan. *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 02(02), 25–29.

Laravel. (2026). *Laravel documentation*.

Livewire. (2026). *Livewire documentation*.

Myers, G. J., Sandler, C., & Badgett, T. (2012). *The art of software testing* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Nazli, S. N., Vilcins, D., Sly, P. D., Razak, A. A., Sabri, N., & Ibrahim, T. N. B. T. (2024). Indoor Air Quality: Bibliometric Analysis of the Published Literature Between 2018 and 2023. *Environmental Quality Management*, 34(1), e22297.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12(85), 2825–2830.

Persily, A., & de Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor*

Air, 27(5), 868–879.

Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2020). *Software engineering: A practitioner's approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.

Shinde, S. R., & Karode, A. H. (2017). Review on - IoT based environment. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 8(2), 103–108.

Solihat, S. M., Salsabila, S., & Susilawati. (2026). Sistem pemantauan kualitas udara berbasis ESP32 menggunakan sensor gas MQ-135 dan MQ-2. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 14(1), 1592–1599.

Sommerville, I. (2016). *Software engineering* (10th ed.). Pearson.

Sung, W. T., & Hsiao, S. J. (2021). Building an indoor air quality monitoring system based on the architecture of the Internet of Things. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021(1), 1–41.

U.S. Environmental Protection Agency. (2024). *Appendix G to Part 58: Uniform Air Quality Index (AQI) and Daily Reporting*.

U.S. Environmental Protection Agency. (2026b). *Carbon monoxide's impact on indoor air quality*.

Ullo, S. L., & Sinha, G. R. (2020). Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors. *Sensors*, 20(11), 3113.

Wibowo, H. H. W., Zulkhairi, & Kurniasari, L. (2024). Monitoring Kualitas Udara dan Emisi Asap dengan The Internet of Things (IoT) pada Halte Bus di Wilayah Perkotaan Menggunakan Sensor MQ-135 dan MQ-2. *Jurnal Elektro Dan Telekomunikasi Terapan*, 11(1), 45–50.

World Health Organization. (2026). *Exposure & health impacts of air pollution*.