



Analisis Literatur Pemanfaatan IoT dalam Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan: Tren, Tantangan, dan Peluang

Fathir Salman¹, Suprpto²

¹Universitas Negeri Medan, Medan, Indonesia

e-mail: fathirsalman404@email.com, suprpto@unimed.ac.id

Abstrak

Kualitas udara dalam ruangan adalah aspek krusial yang mempengaruhi kesehatan dan produktivitas individu, terutama di tempat-tempat tertutup seperti kantor, sekolah, dan rumah. Masalah utama yang dihadapi adalah minimnya sistem pemantauan yang dapat berfungsi secara real-time dan tanggap terhadap perubahan kondisi udara. Artikel ini bertujuan meneliti penggunaan teknologi Internet of Things (IoT) dalam sistem pemantauan kualitas udara di dalam ruangan dengan pendekatan studi literatur. Metode yang digunakan adalah analisis literatur terhadap 15 sumber ilmiah dari tahun 2018 hingga 2024 yang membahas penerapan IoT, tipe sensor, platform komunikasi, serta kendala teknis yang dihadapi. Temuan penelitian mengindikasikan bahwa teknologi IoT memungkinkan pemantauan kualitas udara secara langsung, dapat diakses dengan mudah, dan terhubung dengan berbagai aplikasi pengguna. Sistem biasanya terdiri dari sensor untuk gas dan partikel, mikrokontroler, serta modul komunikasi seperti Wi-Fi atau LoRa. Walaupun efisien, permasalahan seperti ketepatan sensor, kompatibilitas alat, dan efisiensi energi tetap menjadi perhatian utama. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa IoT memiliki potensi yang signifikan dalam mendukung pengembangan sistem pengawasan udara di dalam ruangan yang cerdas dan responsif, tetapi masih memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan ketahanan dan kemampuan skala sistem.

Kata kunci: : Internet of Things, kualitas udara, monitoring, sensor, studi pustaka

Abstract

Indoor air quality is a crucial aspect that affects individual health and productivity, especially in enclosed environments such as offices, schools, and homes. The main issue faced is the lack of monitoring systems that operate in real-time and are responsive to changes in air conditions. This article aims to examine the use of Internet of Things (IoT) technology in indoor air quality monitoring systems through a literature study approach. The method used involves a literature analysis of 15 scientific sources from 2018 to 2024, discussing IoT implementation, sensor types, communication platforms, and technical challenges encountered. The findings indicate that IoT technology enables real-time air quality monitoring, provides easy access, and can be integrated with various user applications. These systems typically consist of gas and particle sensors, microcontrollers, and communication modules such as Wi-Fi or LoRa. Although efficient, issues such as sensor accuracy, device compatibility, and energy efficiency remain major concerns. The results of this study suggest that IoT holds significant potential

in supporting the development of intelligent and responsive indoor air monitoring systems, but further advancements are needed to enhance system resilience and scalability.

Keywords : *air quality, Internet of Things, monitoring, sensors, literature study*

1. PENDAHULUAN

Kualitas udara di dalam ruangan (IAQ) sangat penting untuk kesehatan manusia, terutama saat ini karena banyak aktivitas dilakukan di area tertutup seperti kantor, rumah, dan ruang belajar. Di dalam ruangan dengan sedikit ventilasi, sejumlah polutan, termasuk karbon dioksida (CO₂), partikel debu (PM_{2.5}/PM₁₀), dan senyawa organik volatil (VOC), sering terakumulasi. Ini meningkatkan risiko gangguan pernapasan, alergi, dan penurunan produktivitas. Akibatnya, permintaan akan sistem pemantauan kualitas udara yang efektif dan responsif meningkat..

Teknologi Internet of Things (IoT) telah menjadi solusi yang menjanjikan dalam banyak industri, termasuk pengawasan lingkungan, dalam beberapa tahun terakhir. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan Internet of Things (IoT) dalam pemantauan udara memungkinkan integrasi sensor pintar, pengumpulan data secara langsung, analisis berbasis cloud, dan pembelajaran mesin (Adams et al., 2022; Wijaya et al., 2021). Studi oleh Park et al. (2023) menunjukkan bahwa sistem yang didasarkan pada IoT dapat mempercepat respons terhadap perubahan parameter udara. Tetapi ketepatan sensor murah, penggabungan perangkat keras, dan masalah keamanan data adalah keterbatasan penelitian. Tipe sensor, protokol komunikasi, dan platform pemrosesan data hanyalah beberapa dari banyak metode teknis yang digunakan..

Belum banyak penelitian yang secara langsung membandingkan berbagai metode, mengidentifikasi masalah umum, dan merangkum efektivitas berbagai metode pemantauan kualitas udara di dalam ruangan. Sebaliknya, banyak studi telah mengusulkan desain dan penerapan sistem pemantauan berbasis Internet of Things, tetapi sebagian besar lebih menekankan pada aspek teknis tertentu tanpa memberikan gambaran menyeluruh tentang perkembangan dalam bidang penelitian tersebut. Selain itu, kurangnya analisis tentang bagaimana data dari sistem IoT ini dapat digunakan untuk pengambilan keputusan berbasis bukti dalam konteks pengelolaan gedung dan kesehatan juga menjadi masalah..

Berdasarkan celah tersebut, pertanyaan utama penelitian adalah: "Bagaimana teknologi Internet of Things (IoT) dimanfaatkan untuk memantau kualitas udara dalam ruangan, serta apa saja keunggulan, tantangan, dan peluang pengembangannya di masa mendatang?" Tujuan dari artikel ini adalah untuk memberikan tinjauan literatur yang mendalam tentang penggunaan Internet of Things dalam pengawasan kualitas udara di dalam ruangan, mengidentifikasi manfaat dan kekurangan dari berbagai pendekatan saat ini, dan memberikan rekomendasi untuk pengembangan di masa mendatang. Fokus penelitian ini adalah pemetaan literatur terbaru yang menunjukkan hubungan antara teknologi Internet of Things (IoT) dan kesehatan lingkungan dalam ruangan, yang belum banyak dibahas secara menyeluruh dalam penelitian sebelumnya..

Analisis Literatur Pemanfaatan IoT dalam Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan: Tren, Tantangan, dan Peluang

2. METODE

Penelitian ini mengadopsi desain studi pustaka (library research) menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif. Desain ini dipilih karena relevan dengan tujuan penelitian, yaitu mengevaluasi dan menyintesis berbagai hasil penelitian sebelumnya yang membahas penggunaan teknologi Internet of Things (IoT) untuk memantau kualitas udara di ruang tertutup. Desain ini juga memberikan kesempatan kepada penulis untuk menyusun gambaran lengkap tentang tren, keunggulan, kekurangan, serta peluang pengembangan yang ada berdasarkan studi literatur.

Termasuk dalam populasi penelitian adalah semua artikel penelitian yang relevan yang diterbitkan di jurnal nasional maupun internasional dari 2018 hingga 2024. Dengan menggunakan teknik purposive sampling, sampel literatur dipilih secara selektif berdasarkan kriteria inklusi berikut: (1) berfokus pada penggunaan Internet of Things untuk memantau kualitas udara dalam ruangan (indoor), (2) mencakup data teknis tentang sistem pemantauan (sensor, jaringan, dan pengolahan), dan (3) ditulis dalam bahasa Inggris atau Indonesia. Analisis dihilangkan dari artikel yang hanya berbicara tentang kualitas udara di luar ruangan atau yang tidak berkaitan dengan Internet of Things..

Data dikumpulkan dari berbagai sumber online yang dapat diandalkan, seperti Garuda Ristekbrin, SpringerLink, Google Scholar, dan IEEE Xplore. Kata kunci seperti "Internet of Things + pemantauan udara", "sensor pintar kualitas udara", dan "IoT untuk pemantauan kualitas udara dalam ruangan" digunakan. Setelah disaring berdasarkan judul, abstrak, dan konten, artikel yang dikumpulkan dianalisis dengan format catatan yang teratur. Format ini mencakup informasi seperti tujuan penelitian, jenis sensor yang digunakan, parameter udara yang diawasi (seperti CO₂, PM_{2.5}, dan VOC), desain sistem, hasil yang dicapai, dan masalah teknis.

Analisis tematik digunakan untuk memeriksa data. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi pola dan tema yang serupa dalam berbagai artikel. Setiap literatur dikategorikan berdasarkan empat fokus utama: (1) jenis dan susunan sensor; (2) infrastruktur jaringan dan komunikasi data; (3) konteks atau lokasi aplikasi; dan (4) masalah dan saran pengembangan. Data yang diperoleh dapat dibandingkan, dianalisis, dan disusun menjadi cerita ilmiah yang menunjukkan kemajuan penelitian di bidang tersebut. Metode ini diterapkan secara sistematis.

Metode ini diharapkan dapat membantu penelitian memberikan gambaran mendalam tentang cara Internet of Things digunakan untuk memantau kualitas udara di dalam ruangan. Selain itu, ini akan menunjukkan jalan ke depan untuk pengembangan teknologi tersebut. Setiap langkah prosedur ditulis dengan jelas dan berurutan, sehingga peneliti lain yang mempelajari topik yang sama dapat mengulanginya.

Untuk memastikan validitas dan reliabilitas data, penulis menggunakan prinsip triangulasi sumber serta evaluasi kualitas artikel. Triangulasi dilakukan dengan membandingkan hasil yang mirip dari berbagai sumber untuk memastikan bahwa data itu andal dan konsisten. Setiap artikel yang diterima dievaluasi berdasarkan kualitas jurnal tempat penerbitannya dengan mempertimbangkan faktor dampak, tingkat kutipan, dan indeksasi (seperti Scopus, SINTA, dan DOAJ). Selain itu, penulis menggunakan panduan kritis dari Program Kemampuan Penilaian Kritis (CASP) untuk menilai struktur metodologis artikel untuk mencegah bias atau kekurangan metodologis.

Setelah mengelompokkan hasil berdasarkan tema bahasan dan memberikan ringkasan singkat tentang topik utama setiap artikel, sintesis informasi disusun secara sistematis dan naratif. Proses ini mencakup pengenalan kutipan-kutipan utama, pencatatan data angka jika

ada (seperti keakuratan sensor, waktu respons sistem), dan penjelasan teknis sistem Internet of Things yang digunakan. Dalam narasi ilmiah, struktur logis digunakan untuk menjelaskan hubungan sebab-akibat dan perkembangan temporal antara penelitian..

Seluruh proses diperiksa kembali dengan meminta dua rekan kerja untuk menilai dan memberikan saran tentang hasil analisis. Ini bertujuan untuk mempertahankan objektivitas dan menghindari interpretasi subjektif. Akibatnya, metodologi penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan kompilasi literatur yang akurat, menyeluruh, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah..

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

keputusan yang berbasis bukti. Di samping itu, sejumlah penelitian juga fokus pada penggabungan dengan aplTemuan dari kajian literatur ini mengindikasikan bahwa penggunaan teknologi Internet of Things (IoT) untuk memantau kualitas udara dalam ruangan telah mengalami kemajuan yang signifikan dalam lima tahun terakhir. Sebagian besar studi menggunakan sensor-sensor seperti DHT11/DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban, MQ-135 untuk mendeteksi gas, serta sensor PM2.5 untuk partikel-partikel udara. Sistem pemantauan biasanya dibuat dengan menggabungkan mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32, serta modul komunikasi seperti Wi-Fi atau LoRa untuk mengirim data ke platform berbasis cloud. Hasil ini menegaskan bahwa IoT memberikan manfaat dalam pemantauan langsung, kemudahan integrasi, dan kemampuan pemrosesan data otomatis untuk mendukung kikasi seluler dan sistem pemberitahuan otomatis sebagai upaya untuk mengatasi kualitas udara yang buruk..

Studi oleh Park et al. (2023) memperkuat hasil ini dengan menunjukkan bahwa sistem pemantauan udara yang didasarkan pada IoT mampu meningkatkan kesadaran pengguna mengenai lingkungan dalam ruangan secara signifikan, terutama di gedung perkantoran dan ruang kelas. Di sisi lain, penelitian yang dilakukan oleh Raharjo dan Rini (2021) di Indonesia menunjukkan bahwa meskipun banyak sistem telah dikembangkan, akurasi sensor berbiaya rendah yang digunakan tetap menjadi tantangan, terutama di lingkungan dengan variasi suhu atau kelembaban yang tinggi. Tidak seperti penelitian sebelumnya yang menitikberatkan pada desain sistem tertentu, studi ini memberikan kontribusi dengan menyajikan sintesis literatur yang komprehensif dan membandingkan berbagai metode yang telah diterapkan. Studi ini juga menawarkan pemetaan yang didasarkan pada kategori pemanfaatan, jenis zat pencemar yang dipantau, serta teknologi penghubung yang diterapkan.

Kajian literatur ini menghasilkan temuan yang memiliki konsekuensi teoritis dan praktis yang signifikan. Dengan kata lain, penelitian ini dapat berfungsi sebagai referensi awal bagi pengembang sistem atau pengelola bangunan untuk menentukan konfigurasi teknologi pemantauan udara berbasis Internet of Things yang paling cocok untuk kebutuhan. Penelitian ini menunjukkan bahwa ada peluang untuk inovasi dalam hal efisiensi energi, keakuratan sensor, dan kecerdasan sistem. Inovasi seperti penggunaan AI untuk memprediksi kualitas udara adalah salah satu contohnya. Temuan penelitian juga menegaskan betapa pentingnya membangun sistem pengawasan yang tidak hanya bergantung pada presentasi data tetapi juga memiliki fitur respons adaptif dan mitigasi otomatis.

Studi ini memiliki batas. Pertama, sumber literatur yang digunakan terbatas pada publikasi dari tahun 2018 hingga 2024 yang tersedia secara online. Oleh karena itu, literatur yang relevan mungkin tidak disertakan. Kedua, karena penelitian ini adalah studi pustaka, tidak ada validasi eksperimen langsung untuk mengevaluasi efektivitas sistem yang dibahas. Selain itu, terlepas dari fakta bahwa klasifikasi dan analisis tematik telah dilakukan, ada kemungkinan bahwa penulis telah salah menafsirkan temuan penelitian sebelumnya.

Analisis Literatur Pemanfaatan IoT dalam Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan: Tren, Tantangan, dan Peluang

Penelitian lebih lanjut disarankan untuk mengevaluasi seberapa efektif sistem pemantauan IoT dengan menggunakan metode gabungan tinjauan pustaka dan eksperimen – penelitian hibrida. Selain itu, penelitian tentang penggunaan sensor yang tepat dan hemat daya sangat penting untuk sistem portabel. Penggunaan AI untuk analisis data kualitas udara dan sistem peringatan prediktif juga merupakan bidang yang menjanjikan untuk penelitian lebih lanjut. Konteks lokal seperti penerapan di sekolah, rumah sakit, atau pemukiman padat di negara-negara berkembang dapat menjadi subjek penelitian berikutnya.

Untuk memastikan bahwa teknologi yang digunakan memenuhi kebutuhan lingkungan dan karakteristik pengguna, sangat penting untuk membuat keputusan berbasis bukti saat membuat sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things. Banyak penelitian sebelum penelitian ini menekankan betapa pentingnya memilih sensor yang tepat untuk parameter tertentu yang ingin diawasi. Contohnya, jika tujuan sistem adalah untuk mengidentifikasi peningkatan konsentrasi karbon dioksida (CO₂) di ruang kelas, pengidentifikasi seperti MH-Z19 atau CCS811 ternyata lebih tepat daripada pengidentifikasi gas yang umum seperti MQ-135. Sama halnya, sensor khusus seperti elektrokimia atau optik menjadi lebih penting dalam lingkungan industri atau laboratorium, meskipun implementasinya lebih mahal.

Dari sudut pandang arsitektur sistem, tren terbaru menunjukkan pergeseran dari sistem mandiri ke platform yang berfokus pada komputasi cloud dan edge. Ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Kumar et al. (2022) yang menunjukkan bahwa integrasi sensor lokal dan pengolahan data awal (edge computing) dapat mengurangi latensi dan meningkatkan penggunaan bandwidth. Selain itu, sistem ini lebih responsif terhadap kondisi jaringan yang tidak konsisten, terutama di tempat-tempat dengan sarana komunikasi yang kurang.

Ada pendekatan inovatif untuk antarmuka pengguna dan sistem peringatan selain komponen teknis. Dalam salah satu penelitian, dashboard interaktif menggunakan aplikasi telepon untuk mengirimkan notifikasi dan menampilkan data secara real-time. Hal ini membuat pengguna lebih terlibat dan memungkinkan respons cepat terhadap paparan udara yang berbahaya. Studi Hassan et al. (2023) menemukan bahwa intervensi yang menggunakan notifikasi dapat mengurangi paparan polutan rumah tangga hingga 30% dalam waktu dua minggu.

Interoperabilitas perangkat dan konsumsi energi tetap menjadi masalah utama. Banyak sistem prototipe menggunakan mikrokontroler ESP8266 atau ESP32 karena kemudahan integrasi Wi-Fi. Namun, penggunaan jangka panjang memiliki batasan pada efisiensi energi perangkat. Platform komunikasi seperti LoRa dapat menjadi alternatif yang bagus untuk situasi seperti ini karena tidak membutuhkan banyak energi dan memiliki cakupan sinyal yang luas. Namun, LoRa memiliki batasan pada kecepatan transfer data dan kapasitas payload, jadi hanya boleh digunakan sesuai dengan kebutuhan sistem (Ali et al., 2021).

Interoperabilitas perangkat dan konsumsi energi tetap menjadi masalah utama. Banyak sistem prototipe menggunakan mikrokontroler ESP8266 atau ESP32 karena kemudahan integrasi Wi-Fi. Namun, penggunaan jangka panjang memiliki batasan pada efisiensi energi perangkat. Platform komunikasi seperti LoRa dapat menjadi alternatif yang bagus untuk situasi seperti ini karena tidak membutuhkan banyak energi dan memiliki cakupan sinyal yang luas. Namun, LoRa memiliki batasan pada kecepatan transfer data dan kapasitas payload, jadi hanya boleh digunakan sesuai dengan kebutuhan sistem (Ali et al., 2021).

Secara keseluruhan, temuan kajian ini menunjukkan betapa pentingnya membangun sistem pengawasan kualitas udara dalam ruangan yang berbasis IoT, yang dapat menyajikan data secara langsung dan membantu orang membuat keputusan yang lebih baik, memperkirakan kondisi mendatang, dan secara otomatis memberikan peringatan dini. Sistem

seperti ini dapat menjadi bagian dari ekosistem bangunan pintar yang lebih besar dengan memanfaatkan desain modular dan sistem terbuka. Namun, agar penggunaan IoT dalam pengawasan kualitas udara dapat berkelanjutan, aman, dan inklusif, semua upaya ini harus diimbangi dengan standardisasi teknis dan kebijakan pendukung dari segi regulasi.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Studi ini meninjau literatur yang relevan tentang studi yang membahas penggunaan teknologi Internet of Things (IoT) untuk memantau kualitas udara di ruang tertutup. Hasilnya menunjukkan bahwa teknologi IoT memungkinkan pemantauan yang efisien, berlangsung secara langsung (dalam waktu nyata), dan dapat diakses dari jarak jauh. Hal ini sangat membantu, terutama untuk mengelola kualitas lingkungan di perkantoran, sekolah, dan tempat tinggal. Jenis sensor dan perangkat komunikasi yang beragam telah banyak digunakan dan dikonfigurasi untuk memenuhi kebutuhan spesifik tiap aplikasi dan lingkungan di mana mereka digunakan..

Secara ilmiah, penelitian ini membantu dengan menyusun sintesis tematik yang menggambarkan metode penelitian, teknologi yang digunakan, dan masalah yang umum. Diidentifikasi beberapa kendala, termasuk akurasi sensor berbiaya rendah, masalah interoperabilitas antar perangkat, dan kebutuhan sistem pengolahan data yang lebih canggih. Studi ini juga menekankan kekurangan penelitian sebelumnya, terutama yang berkaitan dengan pembuatan sistem pemantauan yang otomatis dan hemat energi untuk memprediksi kualitas udara.

Meski begitu, studi ini memiliki batasan yang harus diperhatikan. Penelitian ini hanya memanfaatkan data sekunder dari artikel yang dapat diakses secara online dan dalam jangka waktu tertentu (2018–2024), sehingga tidak mencakup semua perkembangan global yang mungkin terjadi di luar periode atau sumber yang digunakan. Di samping itu, tidak ada validasi eksperimen langsung terhadap sistem yang diteliti, sehingga efektivitas nyata sistem tetap bergantung pada hasil laporan dari setiap studi.

Terlepas dari beberapa keterbatasannya, penelitian ini memiliki manfaat yang signifikan, terutama dalam membangun fondasi konseptual untuk pengembangan teknologi di masa depan. Dengan melihat temuan dan masalah yang dihadapi, penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan awal bagi pengembang, peneliti, dan pembuat kebijakan. Tujuannya adalah untuk mendorong perbaikan kualitas udara di ruang tertutup secara berkelanjutan melalui pengembangan solusi berbasis Internet of Things yang dapat disesuaikan dan efisien serta relevan dengan berbagai konteks lingkungan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis sangat berterima kasih kepada dosen pembimbing atas bimbingan dan saran mereka selama proses penulisan artikel ini. Selain itu, ucapan terima kasih ditujukan kepada semua orang yang telah membantu dalam pencarian dan analisis literatur yang relevan, baik secara langsung maupun tidak langsung. Selain itu, penghargaan juga diberikan kepada para peneliti sebelumnya, yang melalui penelitian mereka telah memberikan fondasi penting untuk penyusunan tinjauan pustaka dalam studi ini.

Analisis Literatur Pemanfaatan IoT dalam Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan: Tren, Tantangan, dan Peluang

DAFTAR RUJUKAN

- Ali, M., Rehman, M. H., Rauf, A., Khan, I., & Rehman, A. (2021). *LoRa-enabled IoT-based air quality monitoring system with energy-efficient data transmission*. *Sensors*, 21(18), 6108. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/s21186108>
- Arafat, M. Y., & Hossain, M. S. (2021). *Internet of Things-based smart indoor air quality monitoring system*. *International Journal of Smart Home*, 15(3), 25–34. Retrieved from <https://doi.org/10.21742/ijsh.2021.15.3.03>
- Aziz, M. A., & Kusuma, A. D. (2020). *Sistem monitoring kualitas udara menggunakan Internet of Things (IoT) berbasis NodeMCU dan sensor gas*. *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 8(1), 56–61. Retrieved from <https://doi.org/10.14710/jtsiskom.8.1.56-61>
- Chattoraj, S. (2021). *Design of IoT-based air quality monitoring system*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 715. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09478-5>
- Dewi, P. A., & Hidayat, R. (2020). *Implementasi Internet of Things untuk monitoring kualitas udara dalam ruangan*. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika*, 6(2), 150–157. Retrieved from <https://doi.org/10.26555/jiteki.v6i2.17736>
- Ghosh, A., & Chatterjee, S. (2022). *Smart air quality monitoring using IoT and predictive analysis*. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129860. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129860>
- Handoko, D. (2021). *Perancangan sistem pemantauan kualitas udara menggunakan ESP8266 dan Blynk*. *Jurnal Teknologi dan Sistem Informasi*, 7(1), 10–17.
- Hassan, S. M., Khan, A., Ullah, S., & Ali, S. (2023). *Impact of real-time air quality alerts on indoor pollution reduction: A mobile application-based intervention study*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(3), 278. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11099-3>
- Jain, R., & Sharma, A. (2019). *Indoor air quality assessment using low-cost IoT sensors*. *Procedia Computer Science*, 152, 567–574. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.05.006>
- Kumar, R., Singh, M., & Tripathi, R. (2022). *Edge computing in IoT-based indoor air quality monitoring systems: A survey and case study*. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 13(2), 929–945. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s12652-021-02968-8>
- Kurniawan, A., & Prasetyo, A. D. (2020). *Rancang bangun sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT menggunakan ESP32 dan sensor MQ*. *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), A37–A41. Retrieved from <https://doi.org/10.12962/j23373539.v9i2.63128>
- Li, Z., Wang, F., & Zhang, Y. (2019). *Development of an IoT-based indoor air quality monitoring platform*. *Sensors*, 19(1), 97. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/s19010097>

- Maulana, A. D., & Widodo, D. S. (2022). *Sistem deteksi polusi udara dalam ruangan berbasis IoT*. Jurnal Teknik Elektro dan Komputer, 11(1), 45–53.
- Mendez, D., Pérez, M., & Soto, I. (2020). *Real-time monitoring system for indoor air quality based on IoT*. IEEE Access, 8, 178487–178498. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3027461>
- Nugroho, R. S., & Iskandar, Y. (2021). *Monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) untuk smart building*. Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi, 9(2), 87–94.
- Park, J., Lee, J., & Kim, H. (2023). *Comparative study on IoT-enabled air quality monitoring in educational facilities*. Environmental Research and Public Health, 20(4), 1147. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/ijerph20041147>
- Raharjo, B., & Rini, N. (2021). *Review dan analisis teknologi sensor kualitas udara dalam sistem IoT*. Jurnal Rekayasa Sistem Industri, 10(3), 185–192.
- Santoso, A. A., & Andriani, Y. (2021). *IoT-based real-time air pollution detection system with data visualization*. Jurnal Teknik Elektro dan Komputer, 10(2), 60–68.
- Tan, Y., & Lee, K. (2023). *Machine learning-based prediction of indoor air quality using environmental sensor data*. Environmental Science and Pollution Research, 30(5), 6789–6802. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22556-2>
- Zhou, Y., Chen, H., & Wang, T. (2020). *Performance evaluation of low-cost CO₂ sensors for indoor air quality monitoring*. Building and Environment, 169, 106554. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106554>