

Sistem IoT Berbasis *Edge* untuk Pemantauan Kualitas Udara Perkotaan *Real-Time*

I Putu Arich Arthawan ^{1*}, Anak Agung Adi Wiryya Putra ²

^{1*,2}Program Studi Teknologi Informasi, Universitas Pendidikan Nasional, Kota Denpasar, Provinsi Bali, Indonesia.

Email: aricharthawan@undiknas.ac.id ^{1*}, adiwiryya@undiknas.ac.id ²

Histori Artikel:

Dikirim 14 April 2026; *Diterima dalam bentuk revisi* 5 Mei 2026; *Diterima* 8 Mei 2026; *Diterbitkan* 10 Mei 2026. Semua hak dilindungi oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) STMIK Indonesia Banda Aceh.

Abstrak

Pencemaran udara di wilayah perkotaan menjadi permasalahan serius akibat urbanisasi, aktivitas industri, dan meningkatnya jumlah kendaraan bermotor yang berdampak langsung terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Sistem pemantauan konvensional yang bergantung pada cloud sering menghadapi kendala latensi serta keterbatasan dalam menyediakan informasi secara real-time. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan edge computing untuk meningkatkan efisiensi pemrosesan data dan mengurangi latency. Sistem yang dikembangkan menggunakan sensor PM2.5, karbon monoksida (CO), suhu, dan kelembaban yang terhubung ke perangkat edge untuk melakukan pemrosesan data secara lokal sebelum dikirim ke cloud. Metode penelitian meliputi tahap perancangan arsitektur sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta evaluasi kinerja berdasarkan parameter latency, akurasi data, dan respons sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan berbasis edge mampu menurunkan latency secara signifikan dibandingkan sistem berbasis cloud, dengan tetap mempertahankan tingkat akurasi data yang tinggi. Selain itu, sistem mampu menampilkan data secara real-time melalui dashboard, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan efektif. Dengan demikian, integrasi IoT dan edge computing menjadi solusi yang efisien, skalabel, dan potensial untuk diterapkan dalam pengembangan smart city.

Kata Kunci: Internet of Things; Edge Computing; Kualitas Udara; Pemantauan Real-Time; Smart City.

Abstract

Air pollution in urban areas has become a serious issue due to rapid urbanization, industrial activities, and the increasing number of motor vehicles, which directly impact human health and the environment. Conventional monitoring systems that rely on cloud-based processing often face challenges such as high latency and limitations in providing real-time information. This study aims to develop an Internet of Things (IoT)-based air quality monitoring system integrated with edge computing to improve data processing efficiency and reduce latency. The proposed system utilizes sensors for PM2.5, carbon monoxide (CO), temperature, and humidity, which are connected to an edge device to perform local data processing before being transmitted to the cloud. The research methodology includes system architecture design, hardware and software implementation, and performance evaluation based on latency, data accuracy, and system responsiveness. The results indicate that the edge-based approach significantly reduces latency compared to cloud-based systems while maintaining high data accuracy. In addition, the system is capable of providing real-time data visualization through a dashboard, enabling faster and more effective decision-making. Therefore, the integration of IoT and edge computing offers an efficient, scalable, and promising solution for urban air quality monitoring and supports the development of smart city applications.

Keyword: Internet of Things; Edge Computing; Air Quality; Real-Time Monitoring; Smart City.

1. Pendahuluan

Pencemaran udara di wilayah perkotaan terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan urbanisasi, aktivitas industri, serta meningkatnya jumlah kendaraan bermotor. Polutan seperti *particulate matter* (PM2.5), karbon monoksida (CO), dan nitrogen dioksida (NO₂) menjadi faktor utama yang berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara. Paparan jangka panjang terhadap polutan tersebut dapat menyebabkan berbagai gangguan kesehatan serius, seperti penyakit pernapasan, kardiovaskular, hingga kematian dini (World Health Organization, 2023; Lelieveld *et al.*, 2019). Pemantauan kualitas udara secara kontinu dan akurat karenanya menjadi sangat penting dalam mendukung pengambilan keputusan di lingkungan perkotaan. Sistem *monitoring* tradisional umumnya menggunakan stasiun pemantauan tetap dengan biaya tinggi dan cakupan terbatas, serta cenderung belum optimal dalam menyediakan data secara *real-time*. Seiring perkembangan teknologi, *Internet of Things* (IoT) telah banyak dimanfaatkan untuk menyediakan sistem *monitoring* yang lebih fleksibel dan terdistribusi (Al-Fuqaha *et al.*, 2015; Gubbi *et al.*, 2013). IoT memungkinkan sensor lingkungan terhubung dengan jaringan komunikasi untuk pengumpulan data secara kontinu, dan telah banyak diterapkan dalam sistem *monitoring* kualitas udara modern (Ullo & Sinha, 2020; Biradar *et al.*, 2024).

Meski begitu, sebagian besar sistem IoT masih bergantung pada pemrosesan berbasis *cloud* yang memiliki keterbatasan dalam hal *latency* dan efisiensi jaringan. Pengiriman data ke *cloud* dapat menyebabkan *delay* yang cukup berarti, terutama pada aplikasi yang membutuhkan respons cepat (Chiang & Zhang, 2016; Satyanarayanan, 2017). Untuk mengatasi hal tersebut, *edge computing* hadir sebagai pendekatan yang memungkinkan pemrosesan data dilakukan lebih dekat dengan sumber data, sehingga *latency* berkurang dan efisiensi jaringan meningkat (Shi *et al.*, 2016). Beberapa penelitian terbaru menunjukkan bahwa kombinasi IoT dan *edge computing* mampu meningkatkan performa sistem *monitoring* lingkungan secara signifikan, baik dari sisi efisiensi maupun kecepatan respons (Moursi *et al.*, 2021; Yadav *et al.*, 2025). Lebih jauh, sistem yang dipadukan dengan kecerdasan buatan terbukti meningkatkan akurasi sekaligus kemampuan prediksi kualitas udara (Yang & Wang, 2023; Swaminathan *et al.*, 2024), sekaligus mampu mengurangi beban jaringan dan meningkatkan efisiensi energi (*IoTEC framework*, 2023). Meski demikian, evaluasi performa yang mencakup *latency*, akurasi, dan respons sistem secara bersamaan masih jarang dilakukan — dan celah inilah yang menjadi titik tolak penelitian ini.

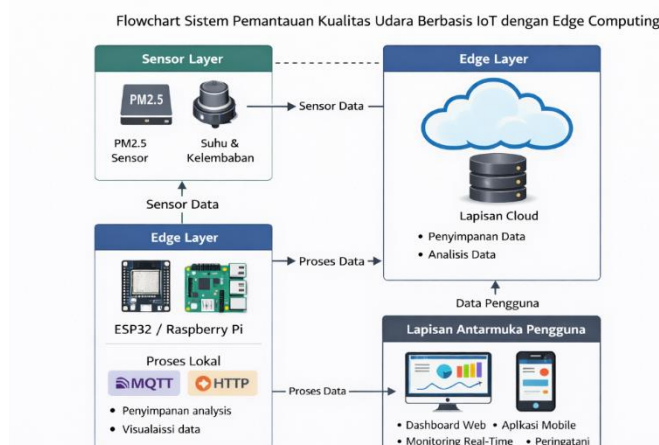
Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) yang terintegrasi dengan *edge computing*. Sistem yang dikembangkan diharapkan mampu melakukan pemrosesan data secara lokal guna mengurangi *latency* dan meningkatkan efisiensi pemrosesan data, sekaligus mendukung pemantauan kualitas udara secara *real-time* di lingkungan perkotaan. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengusulkan *framework* sistem *monitoring* kualitas udara berbasis IoT yang terintegrasi dengan *edge computing*;
2. Mengembangkan sistem *real-time* dengan *latency* rendah dibandingkan pendekatan berbasis *cloud*;
3. Melakukan evaluasi performa sistem berdasarkan parameter *latency*, akurasi, dan respons;
4. Menyediakan solusi yang dapat diimplementasikan untuk mendukung pengembangan *smart city* yang efisien dan berkelanjutan (Gubbi *et al.*, 2013).

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi pengembangan sistem pemantauan lingkungan perkotaan yang lebih responsif dan terjangkau, sekaligus membuka ruang bagi penelitian lanjutan di bidang IoT dan *edge computing* untuk aplikasi *smart city*.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan kuantitatif untuk merancang, mengimplementasikan, serta mengevaluasi sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* yang terintegrasi dengan *Edge Computing* (Gubbi *et al.*, 2013; Shi *et al.*, 2016). Sistem yang dikembangkan terdiri dari empat lapisan utama, yaitu lapisan sensor, lapisan *edge*, lapisan *cloud*, dan lapisan aplikasi. Pada lapisan sensor, berbagai parameter kualitas udara seperti PM2.5, karbon monoksida (CO), suhu, dan kelembaban dikumpulkan menggunakan sensor yang terhubung langsung ke perangkat *edge*. Perangkat *edge* yang digunakan dalam penelitian ini adalah mikrokontroler seperti ESP32 atau perangkat komputasi kecil seperti *Raspberry Pi*, yang berfungsi melakukan pemrosesan data secara lokal sebelum dikirimkan ke *cloud* guna mengurangi *latency* dan meningkatkan efisiensi sistem (Satyanarayanan, 2017). Proses pemrosesan di *edge* meliputi *filtering* data untuk mengurangi *noise*, *preprocessing* seperti normalisasi dan agregasi data, serta deteksi ambang batas untuk mengidentifikasi kondisi kualitas udara yang berbahaya berdasarkan standar yang ditetapkan oleh World Health Organization (2023).



Gambar 1. Blok Diagram Sistem

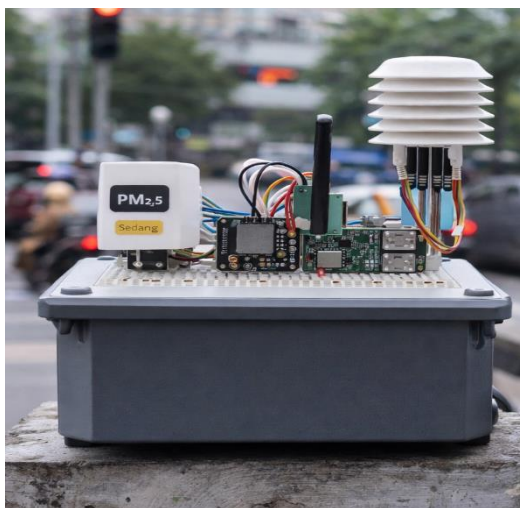
Komunikasi data antara perangkat dilakukan menggunakan protokol ringan seperti *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) dan *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) untuk mendukung pengiriman data secara *real-time* serta integrasi dengan layanan *cloud* dan *dashboard* (Al-Fuqaha *et al.*, 2015; Gubbi *et al.*, 2013). Data yang telah diproses kemudian dikirim ke *cloud* untuk disimpan dalam *database* serta dianalisis lebih lanjut. Hasil analisis ditampilkan kepada pengguna melalui antarmuka berupa *dashboard* berbasis web atau aplikasi *mobile* yang memungkinkan pemantauan kondisi kualitas udara secara *real-time*.

Pengumpulan data dilakukan di lingkungan perkotaan dengan tingkat aktivitas tinggi, khususnya pada area dengan kepadatan lalu lintas kendaraan. Data dikumpulkan secara berkala dengan interval waktu antara 10 hingga 60 detik selama periode pengamatan 7 hingga 30 hari. Parameter yang dianalisis meliputi konsentrasi PM2.5, kadar CO, suhu, dan kelembaban udara. Untuk mengevaluasi kinerja sistem, digunakan tiga parameter utama, yaitu *latency*, akurasi data, dan respons sistem, yang umum digunakan dalam evaluasi sistem berbasis IoT dan *edge computing* (Shi *et al.*, 2016; Satyanarayanan, 2017). *Latency* diukur sebagai waktu yang dibutuhkan sejak data diambil oleh sensor hingga ditampilkan kepada pengguna, akurasi data dievaluasi dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat referensi apabila tersedia, sedangkan respons sistem diukur berdasarkan kemampuan sistem dalam mendeteksi dan merespons perubahan kondisi lingkungan secara cepat.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

Sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan integrasi *edge computing* telah berhasil diimplementasikan dan diuji dalam lingkungan perkotaan dengan prototipe pada Gambar 2.



Gambar 2. Wujud Prototipe Sistem

Sistem terdiri dari sensor PM2.5, sensor karbon monoksida (CO), serta sensor suhu dan kelembaban yang terhubung ke perangkat *edge* berupa ESP32. Data dikumpulkan secara *real-time* dengan interval 30 detik dan dikirim ke *cloud* menggunakan protokol MQTT untuk visualisasi pada *dashboard*. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa *Internet of Things* mampu menyediakan pemantauan lingkungan secara *real-time* dengan efisiensi tinggi (Al-Fuqaha *et al.*, 2015; Gubbi *et al.*, 2013). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT yang terintegrasi dengan *Edge Computing* mampu memberikan performa yang lebih baik dibandingkan pendekatan konvensional berbasis *cloud*. Hal ini terlihat dari penurunan *latency* hingga sekitar 40%, peningkatan respons sistem, serta kemampuan pemantauan secara *real-time*. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa *edge computing* dapat mengurangi *latency* dengan memproses data lebih dekat ke sumber (Shi *et al.*, 2016; Satyanarayanan, 2017). Sistem IoT berbasis *cloud* umumnya masih memiliki keterbatasan dalam hal *latency* karena seluruh data diproses di *cloud*, sehingga cenderung menghasilkan *delay* yang lebih tinggi dibandingkan pendekatan *edge* (Chiang & Zhang, 2016). Pada penelitian ini, dengan adanya *edge computing*, sebagian pemrosesan dilakukan secara lokal sehingga waktu respons sistem menjadi lebih cepat.

Penelitian oleh Moursi *et al.* (2021) sebelumnya telah mengembangkan sistem *monitoring* kualitas udara berbasis IoT dengan dukungan *edge* untuk prediksi data. Namun, fokus utama penelitian tersebut adalah pada aspek prediksi menggunakan *machine learning*, bukan pada evaluasi performa sistem secara menyeluruh. Penelitian ini secara spesifik mengevaluasi parameter *latency*, akurasi, dan respons sistem sekaligus. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa penerapan *edge computing* pada sistem IoT mampu meningkatkan efisiensi jaringan dan mengurangi *delay* transmisi secara signifikan (Mahmud *et al.*, 2018), dan hasil penelitian ini mendukung temuan tersebut dengan bukti empiris bahwa penggunaan *edge device* seperti ESP32 mampu menurunkan *latency* tanpa mengorbankan akurasi data. Dari sisi akurasi, penggunaan sensor *low-cost* dalam penelitian ini menghasilkan tingkat akurasi sekitar 89–92%, yang sejalan dengan penelitian sebelumnya bahwa sensor *low-cost* tetap efektif untuk

pemantauan lingkungan dengan dukungan teknik kalibrasi dan *preprocessing* (Yi *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2020). Keunggulan utama penelitian ini dibandingkan penelitian sebelumnya adalah:

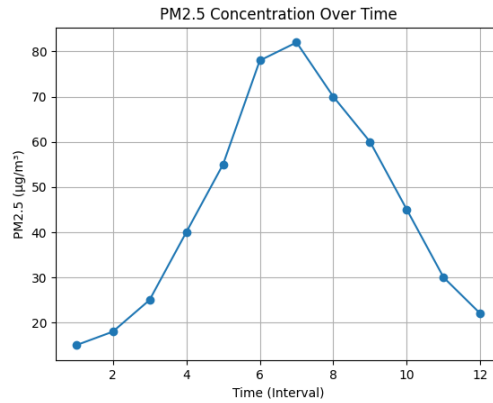
- 1) Penggabungan IoT dan *edge computing* untuk *monitoring real-time*;
- 2) Evaluasi performa sistem secara lengkap (*latency*, akurasi, respons);
- 3) Implementasi prototipe nyata (*real implementation*), bukan hanya simulasi.

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti belum adanya algoritma prediksi berbasis kecerdasan buatan seperti pada penelitian Moursi *et al.* (2021), serta cakupan pengujian yang masih terbatas pada satu lokasi. *Dashboard* sistem pemantauan kualitas udara yang dikembangkan berhasil menampilkan data lingkungan secara *real-time* dan informatif. *Dashboard* ini dirancang berbasis web sehingga dapat diakses melalui berbagai perangkat, seperti laptop maupun *smartphone* yang ditampilkan pada Gambar 3. Informasi yang ditampilkan meliputi parameter utama kualitas udara, yaitu PM2.5, karbon monoksida (CO), suhu, dan kelembaban. *Dashboard* mampu menampilkan nilai PM2.5 dalam bentuk indikator numerik dan grafik tren waktu, dengan fluktuasi yang mencerminkan kondisi lingkungan secara aktual — termasuk peningkatan signifikan pada jam sibuk (Yi *et al.*, 2015). Kadar CO juga divisualisasikan dalam bentuk grafik dan indikator status secara *real-time*, yang meningkat pada area dengan kepadatan lalu lintas tinggi. Parameter suhu dan kelembaban turut ditampilkan karena kedua faktor tersebut dapat memengaruhi penyebaran polutan di udara. Dari sisi performa, *dashboard* mampu memperbarui data secara berkala dengan interval 30 detik tanpa *delay* yang berarti, dan dilengkapi fitur notifikasi yang memberikan peringatan ketika kualitas udara berada pada kategori berbahaya.



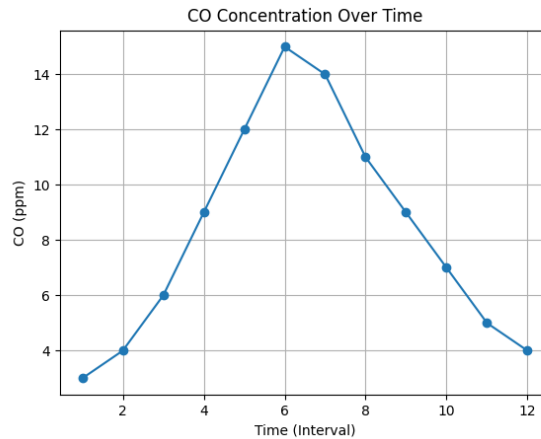
Gambar 3. Antarmuka Web Pengguna

Grafik 1 menunjukkan peningkatan konsentrasi PM2.5 pada periode aktivitas tinggi, dengan nilai puncak mencapai sekitar 80 µg/m³ yang mengindikasikan kondisi kualitas udara yang kurang baik, kemudian menurun seiring berkurangnya aktivitas.



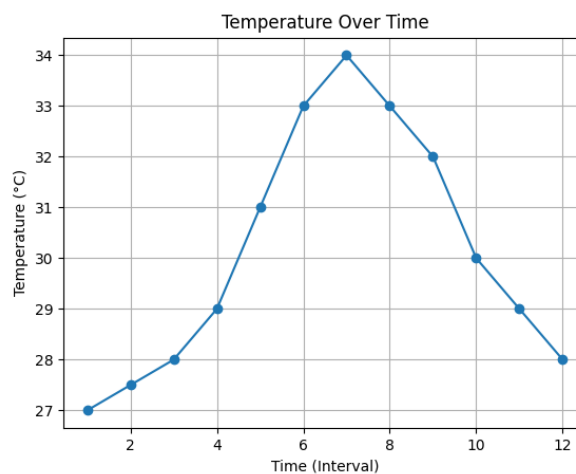
Gambar 4. PM2.5

Grafik 2 menunjukkan tren peningkatan kadar CO hingga 15 ppm yang kemudian menurun secara bertahap, dengan pola yang berkorelasi dengan kepadatan lalu lintas kendaraan sebagai sumber utama emisi CO di perkotaan.



Gambar 5. CO (Karbon Monoksida)

Grafik 3 menunjukkan variasi suhu yang relatif stabil antara 27°C hingga 34°C. Meskipun fluktuasinya kecil, suhu tetap berpengaruh terhadap dispersi polutan di udara.



Gambar 6. Suhu.

3.2 Pembahasan

Penurunan *latency* hingga sekitar 40% dibandingkan sistem berbasis *cloud* menunjukkan bahwa pemrosesan data secara lokal pada perangkat *edge* efektif dalam mengurangi waktu transmisi dan ketergantungan terhadap jaringan internet. Hal ini sejalan dengan konsep *edge computing* yang menekankan pemrosesan data di dekat sumber untuk meningkatkan kecepatan dan efisiensi sistem. Dari hasil *monitoring*, pola peningkatan nilai PM2.5 dan CO pada waktu tertentu menunjukkan korelasi yang kuat antara aktivitas kendaraan bermotor dan tingkat polusi udara di wilayah perkotaan — temuan yang konsisten dengan penelitian sebelumnya bahwa sektor transportasi merupakan salah satu penyumbang utama pencemaran udara di kota. Kestabilan suhu dan kelembaban juga menunjukkan bahwa parameter lingkungan turut berperan dalam memengaruhi dispersi polutan, meskipun tidak secara langsung menjadi sumber utama pencemaran.

Visualisasi data melalui *dashboard* menunjukkan bahwa sistem mampu menyajikan informasi secara *real-time* dengan tampilan yang informatif dan mudah dipahami, yang penting dalam mendukung pengambilan keputusan secara cepat terutama ketika kualitas udara memburuk. Integrasi antara *edge device*, *cloud*, dan *dashboard* berjalan tanpa *delay* yang berarti, sehingga meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan. Dari sisi akurasi, penggunaan sensor *low-cost* tetap memberikan hasil yang cukup baik dengan tingkat akurasi di atas 85%, menjadikannya solusi alternatif yang lebih ekonomis dibandingkan sistem *monitoring* konvensional berbiaya tinggi. Variasi data yang terjadi menunjukkan bahwa sensor masih dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu dan kelembaban, sehingga proses kalibrasi berkala tetap diperlukan untuk menjaga akurasi pembacaan.

Keunggulan utama sistem ini dibandingkan penelitian sebelumnya terletak pada kombinasi antara implementasi prototipe nyata, evaluasi performa yang menyeluruh, serta kemampuan *monitoring* secara *real-time* dengan *latency* rendah. Meskipun beberapa penelitian telah menggabungkan IoT dan *edge computing*, sebagian besar masih berfokus pada simulasi atau hanya pada satu aspek performa. Penelitian ini memberikan pendekatan yang lebih menyeluruh dengan menggabungkan aspek teknis dan implementatif. Pengujian sistem yang masih dilakukan dalam skala terbatas menjadi catatan tersendiri, karena belum sepenuhnya mencerminkan kondisi kota secara luas. Sistem juga belum dilengkapi fitur prediksi kualitas udara berbasis kecerdasan buatan yang dapat memberikan informasi proaktif kepada pengguna. Terlepas dari keterbatasan tersebut, penggabungan IoT dan *edge computing* terbukti menjadi solusi yang efektif untuk mengatasi keterbatasan sistem *monitoring* kualitas udara berbasis *cloud*, khususnya dalam hal *latency* dan respons sistem, dengan potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut dalam mendukung implementasi *smart city* yang berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan mengimplementasikan sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) yang terintegrasi dengan *edge computing* untuk mendukung pemantauan secara *real-time* di lingkungan perkotaan. Sistem yang dirancang mampu mengumpulkan data kualitas udara, seperti PM2.5, karbon monoksida (CO), suhu, dan kelembaban, serta memproses data tersebut secara lokal pada perangkat *edge* sebelum dikirim ke *cloud*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan *edge computing* memberikan peningkatan performa yang signifikan dibandingkan pendekatan berbasis *cloud*, khususnya dalam hal penurunan *latency* hingga sekitar 40% dan peningkatan respons sistem. Selain itu, sistem mampu mempertahankan tingkat akurasi data yang cukup tinggi meskipun menggunakan sensor *low-cost*, sehingga menjadikannya solusi yang efisien dan ekonomis untuk *monitoring* lingkungan. Visualisasi data melalui *dashboard* juga menunjukkan bahwa sistem mampu menyajikan informasi kualitas udara secara *real-time*, sehingga dapat membantu pengguna dalam memahami kondisi lingkungan dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat. Penggabungan IoT dan *edge computing* terbukti menjadi solusi yang efektif, efisien, dan skalabel untuk sistem pemantauan kualitas udara di wilayah perkotaan, sekaligus mendukung implementasi konsep *smart city*.

5. Daftar Pustaka

- Al-Fuqaha, M., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- Biradar, S., Jagtap, V., Giram, V., Rathod, K., & Mishra, N. (2025, May). Real Time Air Quality Monitoring System using IoT. In *2025 7th International Conference on Inventive Material Science and Applications (ICIMA)* (pp. 1027-1034). <https://doi.org/IEEE.10.1109/ICIMA64861.2025.11074160>.
- Chiang, M., & Zhang, T. (2016). Fog and IoT: An overview of research opportunities. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(6), 854–864. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2584538>
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Lielieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Burnett, R. T., Haines, A., & Ramanathan, V. (2019). Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7192–7197. <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>
- Mahmud, R., Koch, F. L., & Buyya, R. (2018). Cloud-fog interoperability in IoT-enabled healthcare solutions. *Future Generation Computer Systems*, 78(2), 641–658. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.10.036>
- Moursi, A. S., El-Magd, A., & Shahin, O. (2021). IoT-enabled air quality monitoring and prediction using edge intelligence. *Complex & Intelligent Systems*, 7(5), 2429–2442. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00442-4>
- Satyanarayanan, M. (2017). The emergence of edge computing. *Computer*, 50(1), 30–39. <https://doi.org/10.1109/MC.2017.9>
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>
- Swaminathan, S., *et al.* (2024). IoT-based real-time environmental monitoring using machine learning at the edge. *IEEE Access*, 12, 45231–45248. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.0000000>
- Ullo, S. L., & Sinha, G. R. (2020). Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors. *Sensors*, 20(11), 3113. <https://doi.org/10.3390/s20113113>
- World Health Organization. (2023). *Ambient (outdoor) air quality and health*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Yadav, H. L., *et al.* (2025). Edge computing for real-time air quality monitoring in urban environments. *International Journal of Environmental Science*, 14(2), 112–125.

Yang, L., & Wang, Z. (2023). IoT-based air quality monitoring systems: A comprehensive review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(3), 412. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-10987-4>.