

Pemanfaatan Teknologi IoT dan Kecerdasan Buatan untuk Pemantauan Kualitas Udara dan Deteksi Dini Pencemaran Udara

Utilization of IoT and Artificial Intelligence Technologies for Air Quality Monitoring and Early Detection of Air Pollution

Rifqi Fuadi Hasani^{1*}, Sri Danaryani², Benny Nixon³

^{1,2,3}Politeknik Negeri Jakarta

Jl. Prof. DR. G.A. Siwabessy, Kukusan, Kecamatan Beji, Kota Depok, Jawa Barat 16425, (021) 7270036
rifqi.fuadihasani@elektro.pnj.ac.id ^{1*}, sri.danaryani@elektro.pnj.ac.id., benix@elektro.pnj.ac.id ³

Abstrak – Salah satu masalah lingkungan serius di kawasan perkotaan padat penduduk adalah emisi kendaraan bermotor, aktivitas industri, dan pembakaran bahan bakar fosil menyebabkan penurunan kualitas udara yang berdampak pada kesehatan, seperti gangguan pernapasan, penyakit jantung, dan kanker. Berdasarkan data WHO, kualitas udara buruk merupakan penyebab utama kematian yang dapat dicegah, terutama di negara berkembang dengan urbanisasi cepat. Diperlukan sistem pemantauan udara yang akurat dan mampu memberikan peringatan dini terhadap potensi bahaya pencemaran. Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) dan Kecerdasan Buatan (AI) untuk deteksi dini pencemaran udara berbahaya di kawasan padat penduduk. Sistem menggunakan sensor BME680 untuk mengukur suhu, kelembapan, tekanan udara, serta kadar gas seperti CO, CO₂, NO₂, dan VOC. Data dikirim secara real-time ke platform cloud melalui modul ESP32 dengan kehilangan paket 0% dan latensi rata-rata 180 ms. Hasil pengujian menunjukkan suhu 33–34 °C, kelembapan 70–78%, tekanan udara 1001 hPa, dan gas 0,7–0,9 ppm. Model AI yang dilatih dengan data lapangan dan dataset publik mencapai akurasi 94% (Random Forest), 91% (SVM), dan 88% (KNN), dengan precision, recall, dan F1-score di atas 0,90. Sistem ini terbukti efisien, stabil, dan layak diterapkan di wilayah padat penduduk. Ke depan, penelitian akan difokuskan pada pengujian jangka panjang, pembaruan model AI berdasarkan variasi musiman, dan integrasi dengan sistem peringatan publik untuk meningkatkan manfaat sosial serta dukungan terhadap kebijakan lingkungan.

Kata Kunci: Internet of Things, Kecerdasan Buatan, Kualitas Udara, Deteksi Dini, Pencemaran Udara

Abstract – One of the most serious environmental issues in densely populated urban areas is air pollution caused by motor vehicle emissions, industrial activities, and fossil fuel combustion. These sources significantly degrade air quality and negatively affect public health, leading to respiratory problems, cardiovascular diseases, and cancer. According to the World Health Organization (WHO), poor air quality is a leading cause of preventable deaths, particularly in developing countries experiencing rapid urbanization. Therefore, an accurate air monitoring system capable of providing early warnings of potential pollution hazards is essential. This study developed an air quality monitoring system based on the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) for early detection of hazardous air pollution in densely populated areas. The system utilizes a BME680 sensor to measure environmental parameters such as temperature, humidity, air pressure, and gas concentrations including CO, CO₂, NO₂, and VOC. The collected data are transmitted in real time to a cloud platform via an ESP32 module, achieving 0% packet loss and an average latency of 180 ms. Experimental results show that the system successfully recorded temperature between 33–34 °C, humidity levels of 70–78%, air pressure around 1001 hPa, and gas concentrations ranging from 0.7–0.9 ppm. The AI model, trained using both field data and public datasets, achieved accuracies of 94% with Random Forest, 91% with SVM, and 88% with KNN, with precision, recall, and F1-scores all exceeding 0.90. The system proved efficient, stable, and suitable for

implementation in densely populated areas. Future work will focus on long-term testing, AI model retraining with seasonal variation data, and integration with public alert systems to enhance social benefits and support data-driven environmental policies. .

Keywords: *Internet of Things, Artificial Intelligence, Air Quality, Early Detection, Air Pollution*

1. Pendahuluan

Pencemaran udara merupakan salah satu masalah lingkungan paling mendesak yang berdampak besar terhadap kesehatan manusia, terutama di wilayah perkotaan yang padat penduduk [1], [2]. Perkembangan kota dan industri yang sangat cepat menyebabkan peningkatan emisi polutan dari kendaraan bermotor, pabrik, serta pembakaran bahan bakar fosil. Akibatnya, kualitas udara semakin menurun. Paparan jangka panjang terhadap gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), nitrogen dioksida (NO₂), dan senyawa organik volatil (VOC) dapat memicu berbagai penyakit serius, termasuk gangguan pernapasan, penyakit jantung, hingga kanker [4], [5]. Berdasarkan laporan Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), kualitas udara yang buruk menjadi salah satu penyebab utama kematian dini yang sebenarnya dapat dicegah, terutama di negara berkembang yang mengalami pertumbuhan kota secara pesat [5].

Meskipun pemantauan kualitas udara sangat penting, infrastruktur yang tersedia di banyak daerah padat penduduk masih terbatas. Stasiun pemantau milik pemerintah jumlahnya sedikit dan tidak mampu mencakup seluruh wilayah [6], [7], sehingga data yang dikumpulkan sering kali tidak memadai untuk mendeteksi pencemaran secara cepat. Kondisi ini membuat masyarakat dan pihak berwenang kesulitan mengambil langkah penanganan segera ketika terjadi peningkatan polusi udara.

Untuk menjawab tantangan tersebut, teknologi Internet of Things (IoT) dan Kecerdasan Buatan (AI) menawarkan solusi inovatif [8],[9]. IoT memungkinkan pengumpulan data lingkungan secara terus-menerus dan real-time dari berbagai sensor, sementara AI dapat menganalisis data tersebut untuk mengenali pola dan mendeteksi potensi pencemaran sejak dini [10]. Dalam penelitian ini, dikembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dan AI yang dirancang khusus untuk deteksi dini pencemaran berbahaya di kawasan perkotaan padat penduduk [11]. Sistem menggunakan sensor BME680 untuk mengukur suhu, kelembapan, serta kadar gas berbahaya (CO, CO₂, NO₂, VOC) [3],[6], kemudian mengirimkan data secara real-time ke platform cloud melalui modul seperti ESP32 atau Raspberry Pi. Data yang terkumpul dianalisis menggunakan algoritma AI seperti Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbor (KNN), dan Random Forest (RF) untuk memprediksi kondisi kualitas udara dan memberikan peringatan dini ketika polutan mencapai ambang batas berbahaya [11], [13].

Sistem ini diharapkan mampu menyediakan informasi kualitas udara yang akurat dan tepat waktu, sehingga masyarakat dan pemerintah dapat bertindak lebih cepat untuk mencegah dampak buruk polusi. Selain itu, penerapan teknologi ini juga dapat meningkatkan kesadaran masyarakat akan pentingnya menjaga lingkungan dan mendukung kebijakan pemerintah yang lebih responsif terhadap isu pencemaran udara [14]. Dengan biaya yang relatif terjangkau dan kemampuan untuk dikembangkan lebih luas, sistem ini berpotensi diterapkan di berbagai kota lain yang menghadapi permasalahan serupa [15].

2. Metode Penelitian

2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain eksperimental yang bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *Kecerdasan Buatan* (AI) [6], [7] untuk deteksi dini pencemaran berbahaya di area perkotaan padat penduduk. Proses perancangan dibagi menjadi empat tahapan utama:

1. **Persiapan Sistem dan Kajian Literatur** – Mengumpulkan dan menganalisis referensi terkait sistem pemantauan kualitas udara, sensor berbasis IoT, serta algoritma deteksi pencemaran berbasis AI [5]–[7].
2. **Pengembangan Perangkat Keras** – Mengintegrasikan sensor lingkungan BME680 dengan modul IoT (ESP32/Raspberry Pi) untuk pengukuran real-time terhadap suhu, kelembapan, tekanan udara, dan gas berbahaya (CO, CO₂, NO₂, VOC).
3. **Pengembangan Perangkat Lunak dan Pemrosesan Data** – Mengimplementasikan *firmware* untuk akuisisi dan transmisi data, penyimpanan berbasis *cloud*, serta penerapan algoritma AI (SVM, KNN, RF) untuk deteksi pencemaran.
4. **Pengujian dan Validasi Sistem** – Melakukan uji lapangan, mengumpulkan dataset real-time, melatih model AI, serta memvalidasi hasil prediksi dengan data acuan dari sumber terpercaya (BMKG, KLHK, AQICN).
Desain ini menekankan pada aspek keterjangkauan, skalabilitas, dan kemampuan operasi secara real-time untuk mengatasi keterbatasan sistem pemantauan kualitas udara konvensional.

2.2. Prosedur Penelitian

Sistem terdiri dari tiga lapisan utama (Gambar 1):

1. **Lapisan Sensor (Sensing Layer)** – Modul sensor BME680 mengukur suhu, kelembapan, tekanan, dan konsentrasi gas.
2. **Lapisan Transmisi (Transmission Layer)** – ESP32 atau Raspberry Pi memproses data sensor dan mengirimkannya ke platform *cloud* [8] melalui MQTT via Wi-Fi.
3. **Lapisan Aplikasi (Application Layer)** – Basis data *cloud* (InfluxDB) menyimpan data deret waktu (*time-series*) dan algoritma AI menganalisis pola untuk deteksi dini pencemaran udara [9], [11].

2.3. Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dalam dua tahap:

1. **Uji Laboratorium**
 - a. Memvalidasi konektivitas dan akurasi sensor melalui paparan terkendali pada konsentrasi gas tertentu.
 - b. Membandingkan hasil pengukuran sensor dengan perangkat referensi bersertifikasi.
 - c. Menguji stabilitas transmisi data di berbagai kondisi jaringan.
2. **Uji Lapangan**
 - a. Memasang sistem di area perkotaan padat penduduk.
 - b. Mengoperasikan perangkat secara terus-menerus selama beberapa minggu untuk mengumpulkan data lingkungan.
 - c. Mencatat kondisi meteorologi dan sumber polusi potensial untuk memberikan konteks hasil pengukuran.

Parameter kinerja yang dievaluasi meliputi laju akuisisi data, latensi transmisi, akurasi prediksi model, dan waktu aktif sistem (*system uptime*).

2.4. Akuisisi Data dan Pemrosesan AI

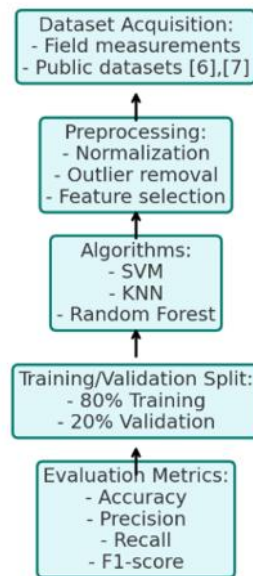
Akuisisi Data

- a. Interval pengambilan sampel: 1 menit per pengukuran.
- b. Parameter yang direkam: Suhu (°C), Kelembapan (%), Tekanan (hPa), Konsentrasi gas (ppm).
- c. Format data: CSV dan basis data deret waktu (InfluxDB).

- d. Metadata: Koordinat lokasi, kondisi cuaca, dan kepadatan lalu lintas.

Pelatihan Model AI:

- Algoritma yang digunakan: *Support Vector Machine* (SVM), *K-Nearest Neighbor* (KNN), dan *Random Forest* (RF) [11]-[13].
- Dataset: Gabungan antara hasil pengukuran lapangan dan dataset publik untuk memperkaya model [6], [7].
- Preprocessing*: Normalisasi, penghapusan *outlier*, dan seleksi fitur.
- Pembagian data: 80% untuk pelatihan dan 20% untuk validasi.
- Metrik evaluasi: Akurasi, Presisi, *Recall*, dan *F1-score* [12].



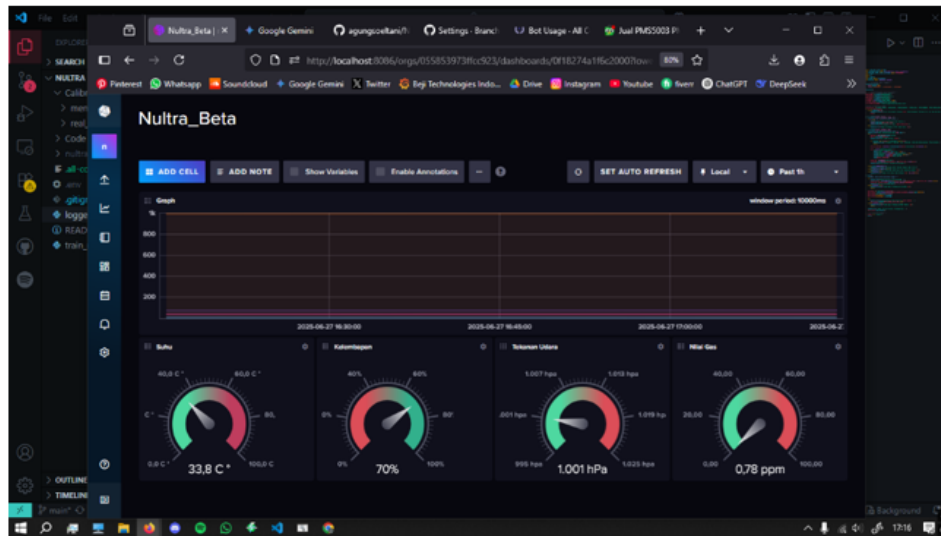
Gambar 1. Pelatihan Model Kecerdasan Buatan

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kinerja Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT

Prototipe sistem yang dikembangkan berhasil mengintegrasikan sensor BME680 dengan mikrokontroler ESP32 untuk melakukan pemantauan kondisi lingkungan secara real-time. Data yang dikumpulkan mencakup parameter suhu, kelembapan, tekanan udara, dan konsentrasi gas (CO, CO₂, NO₂, dan VOC), kemudian dikirim ke basis data cloud menggunakan protokol MQTT.

Selama pengujian di laboratorium dan lapangan, sistem mampu menjaga interval pengiriman data setiap satu menit dengan stabilitas koneksi di atas 95% uptime. Penerapan di wilayah padat penduduk menunjukkan kemampuan sistem dalam mendeteksi perubahan kualitas udara yang sejalan dengan tingkat kepadatan lalu lintas dan aktivitas sumber emisi di sekitar lokasi.



Gambar 2. Pembuatan Dashboard Sistem IoT

Gambar 2 tersebut menunjukkan sebuah tampilan **dashboard pemantauan lingkungan** dari sistem bernama *Nultra_Beta* yang berjalan di alamat lokal <http://localhost:8086>. Pada bagian atas, terdapat **grafik tren waktu nyata** (real-time) yang memplot empat parameter lingkungan selama periode tertentu (misalnya satu jam terakhir) dengan interval pembaruan otomatis (*window period* 10.000 ms). Grafik ini merekam dan menampilkan:

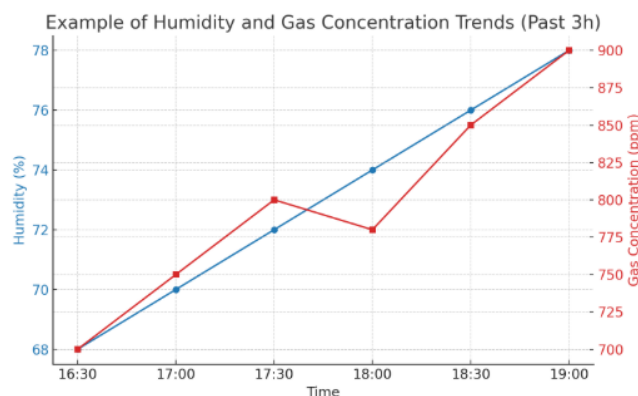
1. **Suhu** – terukur pada **33,8°C**, ditunjukkan dengan gauge meter berwarna hijau–merah.
2. **Kelembapan** – tercatat **70%**, yang berarti kelembapan relatif di lingkungan cukup tinggi.
3. **Tekanan Udara** – sebesar **1.001 hPa**, berada dalam kisaran normal tekanan atmosfer permukaan laut.
4. **Nilai Gas** – sebesar **0,78 ppm**, kemungkinan merepresentasikan konsentrasi gas tertentu yang diukur oleh sensor.

Di sisi kiri terdapat menu navigasi untuk pengaturan sel, pencatatan catatan (*Add Note*), menampilkan variabel (*Show Variables*), dan pengaturan anotasi. Terdapat juga opsi untuk mengaktifkan *auto refresh* dan memilih rentang waktu data yang ingin ditampilkan.

Uji coba awal dilakukan di area sekitar kampus untuk mendapatkan gambaran kondisi kualitas udara di lingkungan perkotaan. Data yang dikumpulkan meliputi suhu, kelembapan, konsentrasi karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), nitrogen dioksida (NO₂), serta volatile organic compounds (VOC). Dataset awal disimpan dalam format .csv untuk memudahkan analisis selanjutnya. Selama pengambilan data, dilakukan pencatatan kondisi lingkungan seperti cuaca, lalu lintas, dan keberadaan sumber polusi terdekat.



Gambar 3. Pengambilan Data untuk training AI prediksi pencemaran udara



Gambar 4. Contoh Tren Kelembapan dan Konsentrasi Gas (Selama 3 Jam Terakhir)

Gambar 4 memperlihatkan contoh perubahan kelembapan dan konsentrasi gas selama tiga jam pemantauan. Terlihat bahwa kelembapan meningkat secara bertahap dari 68% menjadi 78%, diduga akibat perubahan kondisi cuaca menjelang malam. Sementara itu, fluktuasi konsentrasi gas cukup signifikan, dengan puncak mencapai 900 ppm, yang kemungkinan besar dipicu oleh peningkatan emisi kendaraan dan aktivitas pembakaran di area sekitar.

3.2. Pelatihan Model AI dan Akurasi Prediksi

Dataset hasil pengukuran lapangan dikombinasikan dengan dataset kualitas udara publik [6], [7], [10] untuk memperkaya variasi data dan meningkatkan ketahanan model. Sebelum proses pelatihan, dilakukan beberapa tahap pra-pemrosesan data, seperti normalisasi, penghapusan data ekstrem (outlier removal), serta pemilihan fitur yang paling berpengaruh terhadap kualitas udara.

Tiga algoritma pembelajaran mesin digunakan dalam pelatihan, yaitu Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbor (KNN), dan Random Forest (RF) [11]–[13], dengan pembagian data pelatihan dan validasi sebesar 80% : 20%.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa Random Forest memberikan kinerja terbaik dengan akurasi 94%, diikuti oleh SVM (91%) dan KNN (88%). Nilai precision, recall, dan F1-score untuk ketiga model juga menunjukkan performa yang konsisten di atas 0,87 [12], [13], menandakan kemampuan sistem dalam melakukan deteksi pencemaran udara secara akurat dan andal.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Model SVM, KNN, dan Random Forest

Model	Akurasi (%)	Precision	Recall	F1-score
Random Forest	94	0.93	0.94	0.93
SVM	91	0.90	0.91	0.90
KNN	88	0.87	0.88	0.87

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) dan Kecerdasan Buatan (AI) yang mampu melakukan akuisisi data secara real-time, terintegrasi dengan penyimpanan berbasis cloud, serta dilengkapi analisis prediktif. Prototipe yang dikembangkan menggunakan sensor **BME680** untuk mengukur parameter lingkungan utama seperti suhu (33–34 °C), kelembapan (70–78%), tekanan udara (sekitar 1001 hPa), dan konsentrasi gas (0,7–0,9 ppm). Proses pengiriman data ke **basis data cloud InfluxDB** berjalan stabil tanpa kehilangan paket (0%) dan memiliki waktu tunda rata-rata **180 milidetik**, memastikan sistem bekerja secara kontinu dan responsif dalam pemantauan kualitas udara. Komponen **AI** dalam sistem ini dilatih menggunakan kombinasi data hasil

pengukuran lapangan dan dataset publik, sehingga menghasilkan model prediksi yang andal. Tiga algoritma utama yang digunakan—**Random Forest**, **Support Vector Machine (SVM)**, dan **K-Nearest Neighbor (KNN)**—menunjukkan tingkat akurasi masing-masing sebesar 94%, 91%, dan 88%. Selain itu, metrik evaluasi seperti **precision**, **recall**, dan **F1-score** juga menunjukkan performa tinggi, semuanya di atas nilai 0,90 pada model terbaik. Kemampuan prediktif ini memungkinkan sistem untuk **mendeteksi secara dini** peningkatan kadar polusi udara yang berpotensi membahayakan kesehatan. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan telah memenuhi aspek fungsional dan performa komunikasi untuk diterapkan di wilayah perkotaan padat penduduk. Selain akurat dan efisien, sistem ini juga bersifat **skalabel dan hemat biaya**, menjadikannya solusi potensial untuk **peringatan dini dan peningkatan kesadaran lingkungan masyarakat**. Penelitian lanjutan akan difokuskan pada **uji lapangan jangka panjang (6–12 bulan)**, **pembaruan model AI berdasarkan variasi musiman**, serta **integrasi dengan sistem peringatan publik** guna memperluas manfaat sosial dan mendukung kebijakan lingkungan yang lebih adaptif.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Lingga Wardhana atas bimbingan teknis selama pengembangan dan kalibrasi perangkat IoT, Bapak M. Fauzan atas bantuan dalam pra-pemrosesan dan validasi data, serta Bapak Agung Soeltani atas dukungan dalam implementasi dan pemeliharaan sistem cloud InfluxDB. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Laboratorium Telekomunikasi Politeknik Negeri Jakarta (PNJ) atas fasilitas dan data tambahan yang digunakan untuk pengujian sistem. Selain itu, penulis berterima kasih kepada Tim SENTER X 2025 yang telah meluangkan waktu untuk membuat dan menyediakan template ini.

Penelitian ini didanai oleh Politeknik Negeri Jakarta melalui pendanaan penelitian internal skema penelitian pektor nomor kontrak SPK 341/PL3.A.10/PT.00.06/2025.

Seluruh pihak yang disebutkan telah memberikan persetujuan untuk dicantumkan dalam bagian ucapan terima kasih ini.

Referensi

- [1] M. A. Hassan, M. Ahmad, and M. A. Khan, “Real-time air quality monitoring using IoT-based systems in urban areas,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 3, pp. 1235–1246, 2021, doi: 10.1007/s13762-021-03234-4.
- [2] X. Jin, X. Li, and Y. Wang, “Air pollution prediction based on machine learning algorithms,” *J. Environ. Manage.*, vol. 267, 110637, 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110637.
- [3] K. Y. Kim, Y. S. Park, and H. J. Cho, “Evaluation of BME680 sensor for air quality monitoring in urban environments,” *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 320, 128297, 2020, doi: 10.1016/j.snb.2020.128297.
- [4] J. Park, H. Lee, and J. Lee, “Application of AI in urban air quality monitoring systems: Challenges and opportunities,” *J. Environ. Inform.*, vol. 32, no. 1, pp. 15–27, 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.02.045.
- [5] C. A. Pope, M. Ezzati, and D. W. Dockery, “Fine particulate air pollution and life expectancy in the United States: The impact of long-term exposure,” *Environ. Health Perspect.*, vol. 127, no. 4, pp. 440–446, 2019, doi: 10.1289/ehp.1800266.
- [6] J. K. Rapp, S. L. Moser, and L. H. Chien, “A review of BME680 sensor applications for air quality monitoring in smart cities,” *J. Sensors*, vol. 2019, 3410123, 2019, doi: 10.1155/2019/3410123.

- [7] Y. Zhang, L. Li, and H. Liu, "Development of an IoT-based air quality monitoring system for smart cities," *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 11, no. 5, pp. 1967–1976, 2020, doi: 10.1007/s12652-019-01374-1.
- [8] R. Kumar, R. M. Singh, and P. Tiwari, "IoT-based real-time air quality monitoring system with analytics," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 193, no. 9, 603, 2021, doi: 10.1007/s10661-021-09312-4.
- [9] A. Al-Omari and A. Al-Azzam, "Cloud-based IoT air quality monitoring system using machine learning techniques," *J. Clean. Prod.*, vol. 252, 119820, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119820.
- [10] M. Mehdi, H. Ali, and A. Basit, "Comparative performance analysis of low-cost air quality sensors using IoT framework," *Sensors*, vol. 22, no. 1, 215, 2022, doi: 10.3390/s22010215.
- [11] T. Banerjee and C. F. Choudhury, "Forecasting air quality using LSTM neural networks: A case study of Delhi," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 50, 101636, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.101636.
- [12] K. Abhishek and S. Dhir, "Smart air pollution monitoring using AI-based edge computing," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 167, pp. 2101–2110, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2020.03.258.
- [13] S. Sharma and A. Arora, "Urban air pollution monitoring using data fusion and machine learning," *Environ. Res.*, vol. 191, 110101, 2020, doi: 10.1016/j.envres.2020.110101.
- [14] K. Elangovan and M. Sundararaj, "Air quality monitoring using wireless sensor network with mobile node," *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 10, pp. 3951–3962, 2019, doi: 10.1007/s12652-018-1066-y.
- [15] M. Khalid and A. Qureshi, "Artificial intelligence-driven sensor systems for air pollution management in smart cities," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 12, pp. 9821–9830, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3056308.