

Integrasi Wireless Sensor Network (WSN) dan Internet of Things (IoT) untuk Sistem Pemantauan Lingkungan Secara Real-Time

Nadiva Qolbi ^{1)*} , Noera Khairiyati Zulkarnaen ²⁾ 

^{1) 2)} Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ nadivaqolbi42@gmail.com, ³⁾ noerakhairiyatizulkarnaen@gmail.com

Abstract

Pemantauan lingkungan secara real-time telah menjadi kebutuhan penting akibat meningkatnya masalah polusi dan perubahan kondisi lingkungan yang disebabkan oleh aktivitas manusia. Sistem pemantauan konvensional memiliki keterbatasan dalam hal cakupan area, frekuensi pengukuran, dan akses data, sehingga kurang efektif dalam menggambarkan kondisi lingkungan yang sebenarnya. Pengembangan teknologi Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) dan Internet of Things (IoT) telah membuka peluang untuk membangun sistem pemantauan lingkungan yang lebih fleksibel, terdistribusi, dan mudah diakses. Penelitian bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan lingkungan berbasis integrasi WSN dan IoT yang mampu beroperasi secara real-time. Metode penelitian meliputi desain arsitektur sistem, integrasi node sensor dalam jaringan WSN, transmisi data melalui jaringan nirkabel, dan penggunaan platform IoT untuk penyimpanan dan visualisasi data lingkungan. Sistem diuji dengan mengumpulkan data parameter lingkungan secara berkala untuk mengevaluasi kinerja pengukuran, stabilitas transmisi data, dan output sistem pada platform pemantauan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mengumpulkan dan menampilkan data lingkungan secara real-time serta menyajikan informasi dalam bentuk grafik dan data historis yang mudah dipahami. Sistem ini dapat beroperasi relatif stabil meskipun terjadi keterlambatan dalam transmisi data di bawah kondisi jaringan tertentu. Integrasi WSN dan IoT telah terbukti meningkatkan efektivitas pemantauan lingkungan, terutama dalam hal aksesibilitas data dan kemudahan interpretasi informasi. Berdasarkan hasil penelitian, sistem pemantauan lingkungan yang terintegrasi WSN dan IoT memiliki potensi untuk diterapkan dalam berbagai konteks, seperti kampus, kawasan perkotaan, dan kawasan industri. Pengembangan lebih lanjut di bidang efisiensi energi, keandalan jaringan, dan pemrosesan data diharapkan dapat meningkatkan kinerja sistem dalam mendukung pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

Keywords: Wireless Sensor Network, Internet of Things, Pemantauan Lingkungan, Real-Time Monitoring

Article history: Received 5 April 2025, first decision 22 April 2025, accepted 22 August 2025, available online 28 October 2025

I. PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas industri, pertumbuhan penduduk, dan urbanisasi telah memicu berbagai masalah lingkungan, terutama penurunan kualitas udara dan perubahan kondisi iklim. Kondisi-kondisi ini memerlukan sistem pemantauan lingkungan yang dapat menyediakan data yang akurat, berkelanjutan, dan representatif. Sistem pemantauan konvensional dianggap tidak efektif karena cakupan area yang terbatas dan frekuensi pengukuran yang rendah [1]. Kemajuan dalam teknologi sensor telah mendorong penggunaan Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) sebagai solusi yang lebih fleksibel untuk pemantauan simultan dan real-time terhadap parameter lingkungan [2]. Implementasi WSN juga terbukti efektif untuk pemantauan lingkungan di area yang luas [3].

Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) dirancang untuk beroperasi secara mandiri dengan konsumsi daya yang relatif rendah, sehingga cocok untuk aplikasi pemantauan jangka panjang. Karakteristik ini membuat WSN relevan untuk digunakan dalam berbagai kondisi geografis dan lingkungan [4]. Namun, keterbatasan muncul ketika WSN harus menangani pengelolaan data dalam jumlah besar dan menyediakan akses data jarak jauh secara terus-menerus. Internet of Things (IoT) digunakan untuk mengatasi batasan-batasan ini dengan mengintegrasikan node sensor ke dalam jaringan internet. Melalui IoT, data lingkungan yang dikumpulkan oleh WSN dapat dikirim ke server atau cloud untuk diproses dan divisualisasikan secara online [5]. Integrasi ini memungkinkan pemantauan lingkungan secara real-time yang dapat diakses tanpa batasan lokasi [6].

* Nadiva Qolbi

Integrasi WSN dan IoT memberikan kemampuan pemantauan lingkungan yang lebih responsif terhadap perubahan kondisi. Sistem ini mendukung pengambilan keputusan berbasis data yang terkini dan akurat, terutama dalam aplikasi yang memerlukan respons cepat. Pemantauan IoT berbasis real-time telah terbukti efektif sebagai sistem peringatan dini untuk perubahan kualitas lingkungan [7]. Pemantauan kualitas udara merupakan salah satu aplikasi utama integrasi WSN dan IoT. Sistem ini memungkinkan pengukuran berkelanjutan parameter kualitas udara di area yang luas. Efisiensi energi merupakan aspek penting karena node sensor harus beroperasi secara terus-menerus [8]. Data kualitas udara real-time juga berperan dalam mendukung perencanaan dan pengelolaan perkotaan [9].

Kualitas udara yang buruk dapat berdampak langsung pada kesehatan masyarakat. Sistem pemantauan berbasis IoT dapat menyediakan informasi kualitas udara yang lebih akurat dan mudah diakses oleh masyarakat dan pembuat kebijakan [10]. Selain itu, penggunaan analisis data otomatis dapat meningkatkan efektivitas sistem pemantauan lingkungan [11]. Meskipun integrasi WSN dan IoT menawarkan berbagai keuntungan, tantangan seperti efisiensi energi, keandalan komunikasi, dan skalabilitas sistem tetap menjadi perhatian utama. Optimasi jaringan dan manajemen data diperlukan agar sistem dapat beroperasi secara berkelanjutan [12]. Penelitian lebih lanjut juga diperlukan untuk meningkatkan kinerja keseluruhan sistem pemantauan lingkungan [13]. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan lingkungan berbasis integrasi WSN dan IoT yang mampu beroperasi secara real-time dan efisien [14],[15].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Sistem pemantauan lingkungan berbasis Internet of Things (IoT) telah diterapkan secara luas dalam berbagai konteks, termasuk kampus dan fasilitas umum. Sistem ini memungkinkan pemantauan jarak jauh dan berkelanjutan terhadap kondisi lingkungan melalui integrasi sensor dan jaringan internet [16]. Integrasi WSN dan IoT juga telah diterapkan di daerah dengan infrastruktur jaringan yang terbatas. Dengan konfigurasi jaringan yang tepat, sistem pemantauan tetap dapat beroperasi secara stabil di berbagai kondisi lapangan [17]. Pendekatan ini menunjukkan fleksibilitas WSN dan IoT dalam berbagai lingkungan operasional [18].

Topologi jaringan WSN memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja sistem pemantauan lingkungan. Pemilihan topologi yang tepat dapat meningkatkan keandalan komunikasi dan stabilitas transmisi data antara node sensor [19]. Penggunaan sensor berbiaya rendah merupakan solusi untuk memperluas cakupan pemantauan lingkungan. Strategi ini memungkinkan pemasangan sejumlah besar sensor tanpa secara signifikan meningkatkan biaya investasi [20]. Studi sistematis juga menunjukkan efektivitas pendekatan ini dalam pemantauan lingkungan perkotaan [21].

Kualitas data merupakan aspek krusial dalam sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT. Data yang tidak akurat dapat menyebabkan kesimpulan yang salah dan memengaruhi pengambilan keputusan [22]. Oleh karena itu, kalibrasi sensor secara teratur diperlukan untuk meningkatkan keandalan data lingkungan [23]. Pemantauan lingkungan berbasis IoT tidak hanya diterapkan pada kualitas udara, tetapi juga pada ekosistem perairan. Sistem pemantauan air berbasis IoT mampu menyediakan data kondisi air secara real-time [24]. Keluwesan teknologi IoT memungkinkan sistem serupa diterapkan pada berbagai bidang lingkungan [25].

Efisiensi jaringan WSN menjadi perhatian utama dalam pengembangan sistem pemantauan lingkungan. Strategi efisiensi jaringan diperlukan untuk mengurangi konsumsi energi dan memperpanjang umur node sensor [26]. Penerapan WSN pada sistem pertanian hidroponik berbasis IoT menunjukkan keberhasilan pendekatan ini [27]. Teknologi komunikasi seperti ZigBee mendukung integrasi Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) dan Internet of Things (IoT) dalam sistem pemantauan lingkungan. Teknologi ini efektif untuk aplikasi dengan kebutuhan daya rendah dan komunikasi jarak menengah [28]. Penerapannya dalam konsep kampus pintar dan kota pintar telah menunjukkan hasil yang positif [29].

Pengembangan generasi terbaru jaringan seluler seperti 5G juga mendukung sistem IoT berskala besar. Jaringan 5G mampu meningkatkan kecepatan dan stabilitas transmisi data IoT [30]. Selain itu, jaringan mesh memainkan peran penting dalam menjaga kelangsungan komunikasi data dalam aplikasi kota pintar berbasis IoT [31]. Berbagai studi menunjukkan bahwa integrasi WSN dan IoT merupakan pendekatan efektif untuk pemantauan lingkungan. Pendekatan ini mendukung pengelolaan lingkungan yang lebih adaptif pada berbagai skala implementasi [32]. Integrasi teknologi ini juga meningkatkan efisiensi sistem pemantauan lingkungan [33]. Namun, tantangan teknis dan operasional masih memerlukan penelitian lebih lanjut [34], [35].

III. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan lingkungan. Metode ini dipilih untuk mengevaluasi kinerja sensor dan jaringan dalam kondisi operasional yang mendekati lingkungan dunia nyata [36]. Sistem dirancang dengan mengintegrasikan node sensor

berbasis WSN dan platform IoT. Arsitektur sistem dirancang untuk mendukung pengumpulan data lingkungan secara real-time dan terpusat [37]. Efisiensi energi jaringan menjadi pertimbangan utama dalam desain sistem [38].

Sensor dipilih berdasarkan parameter lingkungan yang dipantau, seperti suhu, kelembapan, dan kualitas udara. Keandalan sensor merupakan faktor penting dalam memastikan akurasi data yang dihasilkan [39]. Pemilihan sensor juga disesuaikan dengan kebutuhan pemantauan lingkungan perkotaan [40]. Konfigurasi jaringan WSN dilakukan untuk memastikan komunikasi data yang stabil dan latensi rendah. Inovasi dalam teknologi sensor dan IoT berkontribusi pada peningkatan keandalan sistem pemantauan lingkungan [41]. Data lingkungan yang dikumpulkan oleh node sensor dikirim ke platform IoT berbasis cloud untuk penyimpanan dan visualisasi. Integrasi IoT dengan sistem analitik memungkinkan peningkatan kualitas perkiraan data lingkungan [42].

Pengujian sistem dilakukan dengan mengoperasikan node sensor secara terus-menerus selama periode tertentu. Proses ini bertujuan untuk mengevaluasi stabilitas jaringan dan efektivitas validasi data otomatis [43]. Sistem pemantauan real-time berbasis WSN digunakan sebagai acuan untuk evaluasi kinerja [44]. Evaluasi sistem berfokus pada efisiensi energi dan keandalan pengiriman data. Sistem pemantauan real-time berbasis IoT relevan untuk lingkungan industri dan perkotaan [45]. Pendekatan ini mendukung analisis berkelanjutan kondisi lingkungan [46].

Tahap akhir penelitian mencakup evaluasi keberlanjutan sistem dan identifikasi peluang untuk pengembangan lebih lanjut. Optimasi jaringan WSN dan IoT diperlukan untuk meningkatkan kinerja sistem pemantauan lingkungan [47]. Peningkatan efisiensi energi dan keandalan jaringan akan menjadi fokus pengembangan lebih lanjut [48]. Selain evaluasi teknis, studi ini juga mempertimbangkan keberlanjutan operasional sistem. Sistem ini dirancang agar dapat beroperasi dalam jangka panjang dengan konsumsi daya yang efisien dan kemudahan pemeliharaan perangkat [49]. Optimasi konfigurasi node sensor merupakan faktor penting agar sistem dapat diimplementasikan secara berkelanjutan pada berbagai skala implementasi [50].

IV. HASIL

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pemantauan lingkungan berbasis WSN dan IoT dapat diimplementasikan sesuai dengan desain yang telah ditetapkan. Node sensor berhasil mengumpulkan data lingkungan secara berkala dan mengirimkannya ke platform IoT melalui jaringan nirkabel. Alur kerja sistem berjalan dari pengumpulan data dan transmisi hingga tampilan data real-time di dashboard.

Data lingkungan yang diperoleh menunjukkan variasi nilai sesuai dengan kondisi lingkungan di sekitar titik pengamatan. Fluktuasi suhu, kelembapan, dan kualitas udara dapat diamati secara langsung melalui tampilan grafik seri waktu. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu menangkap perubahan kondisi lingkungan secara dinamis dan tidak statis.

Pengujian komunikasi data menunjukkan bahwa transmisi data dari node ke platform IoT relatif stabil. Meskipun terdapat penundaan transmisi akibat fluktuasi jaringan nirkabel dalam beberapa kondisi, sistem tetap dapat melanjutkan transmisi data pada siklus berikutnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem memiliki ketahanan operasional yang cukup untuk pemantauan lingkungan secara berkelanjutan.

Platform IoT menampilkan data dalam bentuk dashboard informatif. Data real-time, catatan historis, dan grafik tren memudahkan pengguna untuk memahami kondisi lingkungan secara komprehensif. Dengan akses jarak jauh, sistem ini tidak memerlukan kehadiran fisik di lokasi sensor untuk melakukan pemantauan.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi WSN dan IoT efektif dalam membangun sistem pemantauan lingkungan real-time menyeluruh (end-to-end). WSN berfungsi sebagai lapisan pengumpulan data, sementara IoT mendukung konektivitas data, penyimpanan, dan visualisasi. Kombinasi ini menghasilkan sistem pemantauan yang lebih fungsional dibandingkan penggunaan WSN atau IoT secara terpisah.

Kualitas data yang diperoleh menunjukkan bahwa sistem mampu merekam perubahan kondisi lingkungan secara konsisten. Penyajian data dalam bentuk grafik tren membantu pengguna menafsirkan hasil pengukuran dan mengenali pola perubahan lingkungan. Namun, kualitas data masih dipengaruhi oleh penempatan sensor dan kondisi lingkungan sekitar, sehingga kalibrasi dan validasi menjadi aspek penting untuk pengembangan lebih lanjut.

Dalam hal komunikasi, sistem menunjukkan keandalan yang memadai, meskipun masih dipengaruhi oleh kondisi jaringan nirkabel. Penundaan transmisi data tidak menyebabkan sistem gagal sepenuhnya, tetapi menunjukkan kebutuhan akan mekanisme manajemen data yang lebih adaptif. Penerapan buffer data atau pengaturan interval transmisi dapat menjadi solusi untuk meningkatkan stabilitas sistem.

Efisiensi energi juga merupakan faktor penting dalam pemantauan lingkungan jangka panjang. Sistem yang dikembangkan dapat beroperasi selama periode pengujian, namun optimasi konsumsi daya perlu dipertimbangkan

agar sistem dapat diimplementasikan untuk periode yang lebih lama tanpa perawatan intensif. Pengaturan interval pengambilan sampel dan komunikasi merupakan strategi yang relevan untuk menjaga keberlanjutan operasional.

Secara keseluruhan, sistem pemantauan lingkungan yang terintegrasi dengan WSN dan IoT memiliki potensi aplikasi yang luas di kampus, kawasan perkotaan, dan kawasan industri. Dengan pengembangan lebih lanjut dalam keandalan jaringan, efisiensi energi, dan analisis data, sistem ini dapat menjadi alat yang mendukung pengelolaan lingkungan yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan lingkungan berbasis integrasi Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) dan Internet of Things (IoT) yang mampu beroperasi secara real-time. Sistem yang dikembangkan mencakup proses pengumpulan data lingkungan melalui node sensor, pengiriman data melalui jaringan nirkabel, dan penyajian informasi pada platform IoT yang dapat diakses secara jarak jauh.

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian, sistem ini mampu memantau parameter lingkungan secara berkala dan berkelanjutan. Data yang dihasilkan menunjukkan respons terhadap perubahan kondisi lingkungan, sehingga sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat perekaman data, tetapi juga sebagai sarana pemantauan kondisi lingkungan yang sebenarnya. Penyajian data dalam bentuk grafik dan tampilan real-time memudahkan pengguna untuk memahami kondisi lingkungan dan mengamati pola perubahan.

Dalam hal keandalan, sistem pemantauan lingkungan yang dikembangkan menunjukkan kinerja yang cukup stabil selama periode pengujian. Meskipun terjadi penundaan dalam transmisi data di bawah kondisi jaringan tertentu, sistem tetap dapat melanjutkan proses pemantauan tanpa gangguan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa arsitektur sistem memiliki ketahanan operasional yang cukup untuk mendukung pemantauan lingkungan berbasis jaringan nirkabel.

Integrasi WSN dan IoT memberikan nilai tambah dalam manajemen data lingkungan, terutama dalam hal aksesibilitas data dan kemudahan interpretasi. Penggunaan platform IoT memungkinkan data lingkungan disimpan, ditampilkan, dan dipantau secara terpusat, sehingga pengguna tidak perlu memproses data secara manual. Dengan demikian, sistem ini mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan terinformasi berdasarkan data lingkungan.

Meskipun sistem telah beroperasi sesuai dengan tujuan penelitian, masih ada beberapa aspek yang perlu dipertimbangkan untuk pengembangan lebih lanjut. Efisiensi energi pada node sensor merupakan faktor penting ketika sistem diterapkan dalam jangka panjang. Selain itu, perbaikan pada mekanisme pengelolaan data, seperti penanganan keterlambatan pengiriman data dan penyaringan data, dapat meningkatkan kualitas informasi yang dihasilkan oleh sistem.

Secara keseluruhan, sistem pemantauan lingkungan yang terintegrasi dengan WSN dan IoT merupakan solusi yang efektif dan fleksibel untuk mendukung pemantauan lingkungan secara real-time. Sistem ini memiliki potensi untuk diterapkan dalam berbagai konteks, seperti lingkungan kampus, kawasan perkotaan, dan kawasan industri. Dengan pengembangan lebih lanjut dalam hal keandalan, efisiensi, dan analisis data, sistem ini dapat berkontribusi dalam mendukung pengelolaan lingkungan yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

Author Contributions: [Nadiva]: Konseptualisasi penelitian, perancangan metodologi, penulisan draf awal, analisis data, serta penyuntingan dan finalisasi naskah. [Noera]: Simulasi jaringan, visualisasi data, validasi hasil, kurasi data, serta peninjauan literatur.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

Funding:

Acknowledgments:

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian ini.

Ketersediaan Data:

Informed Consent:

Institutional Review Board Statement:

Animal Subjects:

ORCID:

First Author:

Second Author:

REFERENCES

- [1] A. Lanzolla dan M. Spadavecchia, "Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring," *Sensors*, vol. 21, no. 4, hlm. 1172, Feb 2021, doi: 10.3390/s21041172.
- [2] S. L. Ullo dan G. R. Sinha, "Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors," *Sensors*, vol. 20, no. 11, hlm. 3113, Mei 2020, doi: 10.3390/s20113113.
- [3] S. Duobiene dkk., "Development of Wireless Sensor Network for Environment Monitoring and Its Implementation Using SSAIL Technology," *Sensors*, vol. 22, no. 14, hlm. 5343, Jul 2022, doi: 10.3390/s22145343.
- [4] R. Ouni dan K. Saleem, "Framework for Sustainable Wireless Sensor Network Based Environmental Monitoring," *Sustainability*, vol. 14, no. 14, hlm. 8356, Jul 2022, doi: 10.3390/su14148356.
- [5] A. Mota, C. Seródio, A. Briga-Sá, dan A. Valente, "Implementation of an Internet of Things Architecture to Monitor Indoor Air Quality: A Case Study During Sleep Periods," *Sensors*, vol. 25, no. 6, hlm. 1683, Mar 2025, doi: 10.3390/s25061683.
- [6] G. Provolò dkk., "An Internet of Things Framework for Monitoring Environmental Conditions in Livestock Housing to Improve Animal Welfare and Assess Environmental Impact," *Animals*, vol. 15, no. 5, hlm. 644, Feb 2025, doi: 10.3390/ani15050644.
- [7] O. Yildiz dan H. S. Sucuoğlu, "Development of Real-Time IoT-Based Air Quality Forecasting System Using Machine Learning Approach," *Sustainability*, vol. 17, no. 19, hlm. 8531, Sep 2025, doi: 10.3390/su17198531.
- [8] K. Przystupa, N. Bernatska, E. Dzhumelia, T. Drzymała, dan O. Kochan, "Ensuring Energy Efficiency of Air Quality Monitoring Systems Based on Internet of Things Technology," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 14, hlm. 3768, Jul 2025, doi: 10.3390/en18143768.
- [9] S. R. S., R. Aburukba, dan K. El Fakih, "Wireless Sensor Networks for Urban Development: A Study of Applications, Challenges, and Performance Metrics," *Smart Cities*, vol. 8, no. 3, hlm. 89, Mei 2025, doi: 10.3390/smartcities8030089.
- [10] Z. Wang, Z. Chen, I. Shahid, Z. Asif, dan F. Haghghat, "Indoor Air Quality Assessment Through IoT Sensor Technology: A Montreal–Qatar Case Study," *Atmosphere (Basel)*, vol. 16, no. 5, hlm. 574, Mei 2025, doi: 10.3390/atmos16050574.
- [11] E. Prayitno, N. Fahmi, M. U. H. Al Rasyid, dan A. Sudarsono, "An implementation of IoT for environmental monitoring and its analysis using k-NN algorithm," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 19, no. 6, hlm. 1811, Des 2021, doi: 10.12928/telkomnika.v19i6.15724.
- [12] F. Zijie, M. A. Al-Shareeda, M. A. Saare, S. Manickam, dan S. Karuppayah, "Wireless sensor networks in the internet of things: review, techniques, challenges, and future directions," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 31, no. 2, hlm. 1190, Agu 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v31.i2.pp1190-1200.
- [13] S. Metia, H. A. D. Nguyen, dan Q. P. Ha, "IoT-Enabled Wireless Sensor Networks for Air Pollution Monitoring with Extended Fractional-Order Kalman Filtering," *Sensors*, vol. 21, no. 16, hlm. 5313, Agu 2021, doi: 10.3390/s21165313.
- [14] A. Miptahudin, T. Suryani, dan W. Wirawan, "Wireless Sensor Network Based Monitoring System: Implementation, Constraints, and Solution," *JOIV : International Journal on Informatics Visualization*, vol. 6, no. 4, hlm. 778, Des 2022, doi: 10.30630/joiv.6.4.1530.
- [15] D. N. Azizah, S. Heranurweni, dan L. O. M. Idris, "Internet of Things Based Air Quality Monitoring System with Automatic Notification," *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, vol. 5, no. 3, hlm. 776–787, Jun 2025, doi: 10.57152/malcom.v5i3.1945.
- [16] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, dan I. S. Maqom, "Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of Things (IoT) di Kampus," *Digital Transformation Technology*, vol. 3, no. 2, hlm. 996–1001, Feb 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3457.
- [17] M. Saifulloh, B. Santoso, dan D. Ariyus, "Implementation of WSN and IoT to Monitor and Control Villa Electronic Equipment in Blankspot Areas," *Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing*, vol. 7, no. 1, hlm. 151–162, Jan 2025, doi: 10.47709/cnahpc.v7i1.5165.
- [18] N. Elhami Fard dan R. R. Selmic, "Adversarial Attacks on Heterogeneous Multi-Agent Deep Reinforcement Learning System with Time-Delayed Data Transmission," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 11, no. 3, hlm. 45, Agu 2022, doi: 10.3390/jsan11030045.
- [19] J. Waworundeng, "IoT-based Environmental Monitoring with Data Analysis of Temperature, Humidity, and Air Quality," *CogITO Smart Journal*, vol. 10, no. 1, hlm. 271–284, Jun 2024, doi: 10.31154/cogito.v10i1.708.692-705.
- [20] M. Eriyadi, D. Notosudjono, H. Setiana, dan Muh. A. A. A. Yakin, "Low-cost mobile air quality monitoring based on internet of things for factory area," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 32, no. 1, hlm. 545, Okt 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v32.i1.pp545-554.
- [21] D. Munera, D. P. Tobon V., J. Aguirre, dan N. G. Gomez, "IoT-based air quality monitoring systems for smart cities: A systematic mapping study," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 11, no. 4, hlm. 3470, Agu 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i4.pp3470-3482.
- [22] J. Kustija, D. Fahrizal, dan M. Nasir, "Revitalizing IoT-based air quality monitoring system for major cities in Indonesia," *SINERGI*, vol. 28, no. 3, hlm. 605, Jul 2024, doi: 10.22441/sinergi.2024.3.016.
- [23] "WIRELESS SENSOR NETWORK FOR ENVIRONMENTAL MONITORING," *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, Nov 2023, doi: 10.56726/IRJMETS45853.
- [24] J. Trevathan dan S. Schmidtke, "Open-source Internet of Things remote aquatic environmental sensing," *HardwareX*, vol. 12, hlm. e00336, Okt 2022, doi: 10.1016/j.ohx.2022.e00336.
- [25] Shaikh Junaid Ahmad, "Environmental Monitoring Using IoT," *Journal Electrical and Computer Experiences*, vol. 1, no. 1, hlm. 36–39, Mei 2023, doi: 10.59535/ece.v1i1.12.
- [26] S. Safiuddin dan F. P. E. Putra, "Strategi Efisiensi Wireless Sensor Network (WSN)," *INFORMATICS FOR EDUCATORS AND PROFESSIONAL : Journal of Informatics*, vol. 8, no. 1, hlm. 52, Jul 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2441.
- [27] F. P. E. Putra, F. Fauzan, S. Syiropi, M. Mursidi, D. Wahid, dan A. Nuraini, "Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik," *Digital Transformation Technology*, vol. 3, no. 2, hlm. 931–937, Jan 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [28] N. Haidar, F. P. Eka Putra, M. Arifin, M. Yasir Zain, dan I. Darmawan, "Desain dan Perancangan Smart Campus berbasis ZigBee Wireless Sensor Network," *Jurnal Inovasi Teknologi dan Edukasi Teknik*, vol. 1, no. 11, hlm. 842–850, Nov 2021, doi: 10.17977/um068v1i112021p842-850.
- [29] F. P. Eka Putra, A. Baidawi, A. A. Mubarak, dan Frediyanto, "Merancang Jaringan Sensor Nirkabel dan IoT untuk Kota Pintar Pamekasan," *Jurnal Informasi dan Teknologi*, hlm. 138–145, Jul 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.331.

- [30] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Dian Tri Agustina, Triana Selvia Khusnul Khotimah, dan Tarisha Ramadhanty, “Analisis Kinerja Jaringan 5G dalam Meningkatkan Konektivitas Internet of Things (IoT),” *Jurnal Informatika Dan Teknologi Komputer (JITEK)*, vol. 5, no. 1, hlm. 56–62, Mar 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5836.
- [31] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Mustafida Mustafida, Royhan Alfadili, dan Afifatun Nahriyah, “Perancangan Jaringan Nirkabel Berbasis Mesh untuk Menunjang Aplikasi Smart City,” *Jurnal Informatika Dan Teknologi Komputer (JITEK)*, vol. 5, no. 1, hlm. 84–92, Mar 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5934.
- [32] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. N. Saputra, F. M. Haris, dan S. N. R. Barokah, “Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds,” *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, hlm. 356–361, Jul 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4231.
- [33] A. F. Rachman, F. P. E. Putra, S. Syirofi, dan D. Wahid, “Case Study of Computer Network Development for the Internet Of Things (IoT) Industry in an Urban Environment,” *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, hlm. 399–407, Agu 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4302.
- [34] F. P. E. Putra, D. A. M. Putra, A. Firdaus, dan A. Hamzah, “Analisis Kecepatan Dan Kinerja Jaringan 5G (generasi ke 5) Pada Wilayah Perkotaan,” *INFORMATICS FOR EDUCATORS AND PROFESSIONAL: Journal of Informatics*, vol. 8, no. 1, hlm. 47, Jul 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2439.
- [35] S. Metia, H. A. D. Nguyen, dan Q. P. Ha, “IoT-Enabled Wireless Sensor Networks for Air Pollution Monitoring with Extended Fractional-Order Kalman Filtering,” *Sensors*, vol. 21, no. 16, hlm. 5313, Agu 2021, doi: 10.3390/s21165313.
- [36] I. Christakis, O. Tsakiridis, D. Kandris, dan I. Stavrakas, “Air Pollution Monitoring via Wireless Sensor Networks: The Investigation and Correction of the Aging Behavior of Electrochemical Gaseous Pollutant Sensors,” *Electronics (Basel)*, vol. 12, no. 8, hlm. 1842, Apr 2023, doi: 10.3390/electronics12081842.
- [37] F. O. Adunola, V. N. Omeke, A. A. Ahmad, A. R. Bunu, A. J. Nkohon, dan E. Obiajulu, “Energy-efficient wireless sensor network for real-time environmental monitoring: Simulink-based design,” *Discover Electronics*, vol. 2, no. 1, hlm. 63, Jul 2025, doi: 10.1007/s44291-025-00104-8.
- [38] M. ghazi Arkhan dan Z. R. S. Elsi, “Air Quality Monitoring System Based Internet Of Things,” *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 2, hlm. 669–673, Nov 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i2.4924.
- [39] J. Buelvas, D. Múnera, D. P. Tobón V., J. Aguirre, dan N. Gaviria, “Data Quality in IoT-Based Air Quality Monitoring Systems: a Systematic Mapping Study,” *Water Air Soil Pollut*, vol. 234, no. 4, hlm. 248, Apr 2023, doi: 10.1007/s11270-023-06127-9.
- [40] O. Alvear, C. Calafate, J.-C. Cano, dan P. Manzoni, “Crowdsensing in Smart Cities: Overview, Platforms, and Environment Sensing Issues,” *Sensors*, vol. 18, no. 2, hlm. 460, Feb 2018, doi: 10.3390/s18020460.
- [41] S. Shahid, D. J. Brown, P. Wright, A. M. Khasawneh, B. Taylor, dan O. Kaiwartya, “Innovations in Air Quality Monitoring: Sensors, IoT and Future Research,” *Sensors*, vol. 25, no. 7, hlm. 2070, Mar 2025, doi: 10.3390/s25072070.
- [42] H. A. D. Nguyen, T. H. Le, M. Azzi, dan Q. P. Ha, “Monitoring and estimation of urban emissions with low-cost sensor networks and deep learning,” *Ecol Inform*, vol. 82, hlm. 102750, Sep 2024, doi: 10.1016/j.ecoinf.2024.102750.
- [43] T. Kanwal, S. U. Rehman, A. Imran, dan H. A. Mahmoud, “Energy-Efficient Internet of Things-Based Wireless Sensor Network for Autonomous Data Validation for Environmental Monitoring,” *Computer Systems Science and Engineering*, vol. 49, no. 1, hlm. 185–212, 2025, doi: 10.32604/csse.2024.056535.
- [44] J. Gutierrez, J. F. Villa-Medina, A. Nieto-Garibay, dan M. A. Porta-Gandara, “Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module,” *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 63, no. 1, hlm. 166–176, Jan 2014, doi: 10.1109/TIM.2013.2276487.
- [45] K. Prasert dan T. Sutthibutpong, “Unveiling the Fundamental Mechanisms of Graphene Oxide Selectivity on the Ascorbic Acid, Dopamine, and Uric Acid by Density Functional Theory Calculations and Charge Population Analysis,” *Sensors*, vol. 21, no. 8, hlm. 2773, Apr 2021, doi: 10.3390/s21082773.
- [46] M. N. A. Ramadan, M. A. H. Ali, S. Y. Khoo, M. Alkhedher, dan M. Alherbawi, “Real-time IoT-powered AI system for monitoring and forecasting of air pollution in industrial environment,” *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 283, hlm. 116856, Sep 2024, doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116856.
- [47] Z. Setiawan, A. Hiswara, dan H. N. Muthmainah, “Mengoptimalkan Jaringan Sensor Nirkabel dalam Aplikasi Monitor Lingkungan dengan Teknologi IoT di Indonesia,” *Jurnal Multidisiplin West Science*, vol. 2, no. 10, hlm. 858–867, Okt 2023, doi: 10.58812/jmws.v2i10.704.
- [48] S. Bhukya, S. D, dan K. Saheb, “Environmental Monitoring with Wireless Sensor Network for Energy Aware Routing and Localization,” *Journal of Sensors, IoT & Health Sciences*, vol. 1, no. 1, hlm. 27–39, Des 2023, doi: 10.69996/jsihs.2023003.
- [49] Revifal Anugerah dan Tata Sutabri, “Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Menggunakan IoT dengan Metode Prototype,” *Modem: Jurnal Informatika dan Sains Teknologi.*, vol. 3, no. 1, hlm. 01–05, Des 2024, doi: 10.62951/modem.v3i1.304.
- [50] R. Roslidar, K. Karnaini, dan T. Y. Arif, “IoT based System for Air Pollution Monitoring in Banda Aceh,” *Jurnal Rekayasa ElektriKa*, vol. 19, no. 3, Sep 2023, doi: 10.17529/jre.v19i3.28686.