

Mengoptimalkan Jaringan Sensor Nirkabel dalam Aplikasi Monitor Lingkungan dengan Teknologi IoT di Indonesia

Zunan Setiawan¹, Abrar Hiswara², Hanifah Nurul Muthmainah³

¹ Universitas Ahmad Dahlan dan zunan.setiawan@mm.uad.ac.id

² Universitas Bhayangkara Jakarta Raya dan abrar@dsn.ubharajaya.ac.id

³ Universitas Siber Muhammadiyah dan hanifah20220200046@sibermu.ac.id

ABSTRAK

Integrasi teknologi Internet of Things (IoT) dengan jaringan sensor nirkabel (WSN) telah mengantarkan era baru dalam pemantauan lingkungan dan pengumpulan data. Di Indonesia, negara yang kaya akan keanekaragaman ekologi dan tantangan lingkungan, penerapan teknologi IoT untuk mengoptimalkan WSN untuk pemantauan lingkungan menjadi sangat penting. Penelitian ini mengeksplorasi kondisi pemantauan lingkungan saat ini di Indonesia, mengidentifikasi tantangan dan peluang, dan mengevaluasi aspek teknis dari optimalisasi WSN. Survei dan wawancara mendalam dengan para pemangku kepentingan mengungkapkan terbatasnya adopsi IoT, tantangan infrastruktur, dan kekhawatiran mengenai privasi dan keamanan data. Evaluasi teknis penyebaran node sensor menunjukkan tantangan dalam efisiensi transmisi data dan konsumsi daya. Studi kasus menggambarkan tantangan kontekstual dan solusi inovatif dalam pengaturan lingkungan yang beragam. Untuk mengatasi masalah-masalah ini, rekomendasi yang diberikan termasuk mempromosikan adopsi IoT, standarisasi, peningkatan infrastruktur, keamanan data, efisiensi energi, inisiatif kolaboratif, dan pemantauan berkelanjutan. Rekomendasi-rekomendasi ini bertujuan untuk mendorong Indonesia menuju infrastruktur pemantauan lingkungan yang lebih efisien dan berkelanjutan, serta memastikan kelestarian ekosistem dan sumber dayanya yang unik.

Kata Kunci: Jaringan Sensor Nirkabel, Lingkungan, Teknologi IoT, Indonesia

ABSTRACT

The integration of Internet of Things (IoT) technologies with wireless sensor networks (WSNs) has ushered in a new era in environmental monitoring and data collection. In Indonesia, a country rich in ecological diversity and environmental challenges, the application of IoT technology to optimize WSNs for environmental monitoring is particularly important. This research explores the current state of environmental monitoring in Indonesia, identifies challenges and opportunities, and evaluates the technical aspects of WSN optimization. Surveys and in-depth interviews with stakeholders revealed limited adoption of IoT, infrastructure challenges, and concerns regarding data privacy and security. Technical evaluations of sensor node deployments show challenges in data transmission efficiency and power consumption. Case studies illustrate contextual challenges and innovative solutions in diverse environmental settings. To address these issues, recommendations include promoting IoT adoption, standardization, infrastructure improvements, data security, energy efficiency, collaborative initiatives, and continuous monitoring. These recommendations aim to propel Indonesia towards a more efficient and sustainable environmental monitoring infrastructure, while ensuring the preservation of its unique ecosystems and resources.

Keywords: Wireless Sensor Network, Environment, IoT Technology, Indonesia

PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi yang pesat, khususnya di bidang Internet of Things (IoT), telah mengantarkan era baru dalam pemantauan dan pengumpulan data lingkungan. Di dunia yang semakin peduli terhadap perubahan iklim, polusi, dan pengelolaan sumber daya, integrasi teknologi IoT ke dalam aplikasi pemantauan lingkungan telah menjadi fokus utama (Budiman et al., 2022; Harahap et al., 2023; Iskandar & Sarastika, 2023). Indonesia, dengan ekosistem yang beragam dan tantangan lingkungan yang unik, berada di garis depan dalam memanfaatkan potensi IoT untuk mengoptimalkan jaringan sensor nirkabel (WSN) untuk pemantauan lingkungan (Arif et al., 2021;

Kadir et al., 2018; Mendez-Monroy et al., 2022). Penelitian ini berusaha untuk mengeksplorasi dan menjelaskan strategi dan metodologi yang diperlukan untuk secara efektif memanfaatkan teknologi IoT dalam sistem pemantauan lingkungan di Indonesia.

Pemantauan lingkungan memainkan peran penting dalam menjaga ekosistem, sumber daya alam, dan kesehatan manusia. Data yang tepat waktu dan akurat mengenai faktor-faktor seperti kualitas udara, kondisi tanah, kualitas air, dan parameter iklim sangat penting untuk pengambilan keputusan yang tepat, perumusan kebijakan, dan respons dini terhadap ancaman lingkungan (Nugrahanti, 2016; Suparwata, 2018; Suparwata & Djibrán, 2018; Suparwata & Pomolango, 2019). Secara tradisional, pemantauan lingkungan bergantung pada metode pengumpulan data manual, yang sering kali membutuhkan banyak tenaga kerja, rentan terhadap kesalahan, dan ruang lingkungannya terbatas. Kemunculan WSN yang digabungkan dengan teknologi IoT telah merevolusi lanskap ini, menawarkan potensi pengumpulan data secara real-time, otomatis, dan ekstensif (Eiler et al., 2018; Jaman, 2023; Jaman & Pertiwi, 2023; Jankovská et al., 2014; Jeevanantham & Rebekka, 2022; Wilde et al., 2021).

Indonesia, dengan lanskap kepulauan yang beragam, menghadapi banyak tantangan lingkungan. Dari hutan hujan tropis hingga terumbu karang, ekosistem Indonesia sangat kaya dan beragam. Namun, ekosistem tersebut juga rentan terhadap ancaman seperti deforestasi, pembalakan liar, degradasi lahan, polusi udara dan air, serta naiknya permukaan air laut akibat perubahan iklim. Menerapkan sistem pemantauan lingkungan yang efisien dan hemat biaya merupakan suatu keharusan untuk melestarikan warisan alam negara dan memastikan pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan (Datta & Krishnamoorti, 2022; Halik et al., 2022; Rahmat et al., 2016; Syarif et al., 2013).

Meskipun teknologi IoT dan WSN telah membuat langkah signifikan dalam pemantauan lingkungan secara global, ada kebutuhan mendesak untuk penelitian dan strategi yang disesuaikan dengan konteks Indonesia. Kompleksitas geografis Indonesia, berbagai masalah lingkungan, dan keterbatasan sumber daya membutuhkan solusi yang unik. Literatur yang ada menawarkan wawasan yang berharga tentang aplikasi IoT untuk pemantauan lingkungan, tetapi sering kali tidak cukup untuk menjawab tantangan spesifik yang dihadapi Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan ini dengan mengembangkan strategi yang dapat mengoptimalkan WSN untuk konteks lingkungan Indonesia.

LITERATURE REVIEW

A. Teknologi IoT dalam Pemantauan Lingkungan

Teknologi IoT telah memberdayakan sistem pemantauan lingkungan menjadi lebih fleksibel, efisien, dan hemat biaya. Penelitian yang dilakukan oleh (Chawla et al., 2022; Gandhi et al., 2022; Gribaudo et al., 2017) menekankan potensi sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT dalam mengumpulkan dan menganalisis data dari berbagai sensor yang tersebar di seluruh ekosistem. Sistem ini memungkinkan pengiriman data secara real-time dan menawarkan kemampuan untuk memantau dan mengelola parameter lingkungan dari jarak jauh. Kualitas udara merupakan masalah lingkungan yang krusial di banyak daerah perkotaan di Indonesia. Penelitian seperti yang dilakukan oleh (Jiang et al., 2016; Malche et al., 2019; Rajput & Kumaravelu, 2020) telah mengeksplorasi penerapan teknologi IoT untuk pemantauan kualitas udara secara real-time. Sensor

kualitas udara yang mendukung IoT memberikan data yang akurat dan beresolusi tinggi, yang sangat penting untuk perumusan kebijakan dan penilaian risiko kesehatan.

B. WSN dalam Pemantauan Lingkungan

Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) telah menjadi alat yang penting untuk pemantauan lingkungan, memungkinkan pengumpulan data secara real-time dari lokasi yang jauh. WSN menawarkan skalabilitas dan kemampuan beradaptasi terhadap ekosistem yang beragam, sehingga cocok untuk memantau parameter lingkungan seperti kelembapan tanah, suhu, dan kelembapan (Allahham & Rahman, 2018; Kerkez et al., 2012). Namun, penerapan WSN di lingkungan yang menantang seperti hutan hujan, daerah pesisir, dan pulau-pulau terpencil memiliki tantangan yang unik, termasuk efisiensi energi dan keandalan data (Hou et al., 2018). Untuk mengatasi tantangan ini, para peneliti telah mengembangkan sistem catu daya hemat energi untuk node WSN (Gutiérrez et al., 2013), model kepercayaan untuk memantau kelembaban dan kelembapan di lingkungan pertanian dan industri (Prodanović et al., 2021), dan strategi fusi data untuk WSN hirarkis (Chen et al., 2022). Solusi-solusi ini dapat meningkatkan kinerja WSN dalam pemantauan lingkungan dan memungkinkan pengembangan sistem pemantauan berbasis WSN yang berkelanjutan (Ouni & Saleem, 2022).

C. Integrasi IoT dan WSN

Integrasi teknologi IoT dan WSN sangat penting dalam mengoptimalkan sistem pemantauan lingkungan. Penelitian oleh Jawad dkk. (Dogra et al., 2022; Lazarescu, 2017; Li et al., 2022) mengeksplorasi sinergi antara IoT dan WSN, menunjukkan bagaimana integrasi ini meningkatkan skalabilitas dan kemampuan jaringan sensor secara real-time, yang memungkinkan transmisi dan analisis data yang efisien. Kemampuan gabungan IoT dan WSN memfasilitasi pengumpulan data dalam jumlah besar. Manajemen dan analisis data yang efektif sangat penting. (Hong et al., 2023; Mainetti et al., 2016; Salunke & Bhambar, 2019) membahas tantangan dan solusi untuk mengelola data yang dihasilkan IoT, dengan menekankan pentingnya platform berbasis cloud dan analisis data besar, yang dapat memberikan wawasan yang berharga ke dalam data yang dikumpulkan dari node sensor dalam konteks lingkungan yang beragam di Indonesia.

D. Pemantauan Lingkungan di Indonesia

Indonesia menghadapi beberapa tantangan lingkungan, termasuk deforestasi, degradasi lahan, polusi udara dan air, serta perubahan iklim. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan telah memprakarsai pengembangan sistem pemantauan lingkungan yang dikenal sebagai SISTEK Lingkungan (Sistem Informasi Pemantauan Lingkungan) (Petrich & Smith-Sanclare, 1997). Namun, penelitian oleh Masykuri dan Ramadana (2020) menggarisbawahi pentingnya menyelaraskan kebijakan-kebijakan ini dengan teknologi IoT dan WSN yang canggih (Petrich & Smith-Sanclare, 1997; Wu et al., 2017). Penguatan Arsitektur IoT-WSN untuk Pemantauan Lingkungan adalah salah satu teknologi modern yang hemat biaya yang banyak digunakan untuk merancang node sensor nirkabel (Wu et al., 2017). Penelitian oleh Dita (2021) menemukan adanya hubungan antara sistem pembuangan limbah rumah tangga dan pembuatan sumur dengan kualitas fisik air di wilayah kerja Puskesmas Salo (Syafarida et al., 2022). Perlindungan hukum untuk menjaga kelestarian hutan tercermin dari berbagai peraturan baik yang dikeluarkan oleh Kementerian Perdagangan dan Perindustrian maupun dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan dengan mewajibkan

pengusaha hasil hutan untuk memiliki izin dalam usaha kayu olahan (Mulyani & Lisdiyono, 2020). Studi oleh Masykuri dan Ramadana (2020) menggarisbawahi pentingnya menyelaraskan kebijakan dengan teknologi IoT dan WSN yang canggih (Petrich & Smith-Sanclare, 1997; Wu et al., 2017).

E. Kesenjangan Penelitian

Meskipun literatur yang ada memberikan wawasan yang berharga tentang teknologi IoT, WSN, dan pemantauan lingkungan, masih ada kesenjangan penelitian yang cukup besar yang spesifik pada optimalisasi WSN untuk pemantauan lingkungan di Indonesia. Literatur yang ada saat ini sebagian besar berfokus pada konteks global atau regional dan sering kali tidak memiliki pemahaman yang bernuansa tentang tantangan dan peluang yang unik bagi kepulauan Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan metode campuran, yang menggabungkan teknik penelitian kuantitatif dan kualitatif. Pendekatan ini dipilih untuk memberikan pemahaman yang komprehensif dan holistik tentang aspek-aspek kompleks dan multi-dimensi yang terlibat dalam mengoptimalkan WSN untuk pemantauan lingkungan di Indonesia. Penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian terapan, yang bertujuan untuk mengatasi isu-isu praktis di bidang pemantauan lingkungan di Indonesia. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan dan pengoptimalan solusi di dunia nyata.

A. Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan aspek penting dalam penelitian ini. Pengumpulan data mencakup sumber data primer dan sekunder dan akan dilakukan melalui berbagai instrumen. Survei terstruktur diberikan kepada berbagai pemangku kepentingan yang terlibat dalam pemantauan lingkungan di Indonesia. Para pemangku kepentingan ini mencakup lembaga pemerintah 20 sampel, lembaga swadaya masyarakat (LSM) 30 sampel, peneliti sebanyak 40 sampel, dan pakar industry sebanyak 15 sampel. Survei ini berfokus pada penilaian kondisi WSN dan teknologi IoT saat ini dalam pemantauan lingkungan dan parameter lingkungan spesifik yang dipantau. Sebuah kuesioner akan dikembangkan untuk memandu survei.

Wawancara mendalam akan dilakukan dengan lima informan kunci dan ahli di bidang pemantauan lingkungan, IoT, dan WSN. Wawancara ini akan memberikan wawasan kualitatif yang berharga tentang tantangan dan peluang untuk mengoptimalkan WSN dalam konteks lingkungan di Indonesia. Panduan wawancara semi-terstruktur akan disiapkan untuk memandu wawancara. Node sensor ditempatkan di beberapa lokasi pemantauan lingkungan di seluruh Indonesia. Node sensor ini akan dipilih dengan cermat untuk mengukur parameter lingkungan tertentu, seperti suhu, kelembapan, kualitas udara, kualitas air, dan banyak lagi. Data real-time akan dikumpulkan dari node-node sensor ini untuk mendukung evaluasi teknis WSN.

B. Data Sekunder

Tinjauan komprehensif terhadap literatur, makalah akademis, laporan, dan publikasi yang ada terkait dengan WSN dalam pemantauan lingkungan di Indonesia dan aplikasi global akan dilakukan. Data sekunder ini akan memberikan informasi latar belakang, konteks, dan wawasan yang berharga untuk studi ini. Laporan dan data dari lembaga pemerintah, khususnya Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Indonesia, akan digunakan untuk mendapatkan wawasan

tentang kebijakan, peraturan, dan standar lingkungan di Indonesia. Data sekunder ini akan memberikan pemahaman dasar tentang infrastruktur pemantauan lingkungan yang ada di Indonesia.

C. Analisis Data

Data kuantitatif, terutama yang berasal dari survei dan sensor node, dianalisis menggunakan perangkat lunak statistik SPSS. Statistik deskriptif akan digunakan untuk meringkas dan menyajikan data survei, memberikan gambaran umum tentang temuan dan tren utama. Statistik inferensial akan digunakan untuk mengidentifikasi pola dan korelasi dalam data survei. Analisis ini akan memungkinkan identifikasi hubungan antar variabel, membantu menjawab pertanyaan penelitian yang spesifik. Data yang dikumpulkan dari node sensor akan menjadi subjek analisis deret waktu. Analisis ini akan memungkinkan pengamatan tren dan pola lingkungan dari waktu ke waktu.

Data kualitatif yang berasal dari wawancara dianalisis secara tematik. Analisis kualitatif akan melibatkan langkah-langkah berikut: Transkrip wawancara akan ditranskrip untuk memastikan semua konten tersedia untuk dianalisis. Transkrip akan diberi kode untuk mengidentifikasi tema, ide, dan konsep yang berulang dalam data kualitatif. Tema dan pola akan diidentifikasi dengan memeriksa konten yang dikodekan. Tema-tema ini akan berkontribusi pada pemahaman yang lebih mendalam tentang data kualitatif. Kesimpulan dan wawasan akan diambil dari data kualitatif, memperkaya pemahaman tentang tantangan dan peluang dalam mengoptimalkan WSN untuk pemantauan lingkungan di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil penelitian, yang mencakup temuan dari survei kuantitatif dan wawasan yang dikumpulkan melalui wawancara kualitatif. Hasil tersebut kemudian dibahas untuk mendapatkan wawasan, kesimpulan, dan rekomendasi terkait optimalisasi jaringan sensor nirkabel (WSN) untuk pemantauan lingkungan dengan menggunakan teknologi IoT dalam konteks Indonesia.

A. Kondisi Pemantauan Lingkungan Saat Ini di Indonesia

Survei dilakukan terhadap para pemangku kepentingan yang terlibat dalam pemantauan lingkungan di Indonesia. Temuan-temuan utama berikut ini muncul: Integrasi IoT yang terbatas, hasil survei menunjukkan bahwa 65% responden melaporkan integrasi teknologi IoT yang terbatas dalam sistem pemantauan lingkungan mereka saat ini. Meskipun beberapa responden menyebutkan penggunaan IoT untuk aplikasi spesifik seperti pemantauan kualitas udara, adopsi teknologi IoT secara keseluruhan masih moderat. Sebagian besar (47%) responden mengungkapkan tantangan terkait transmisi data real-time dan keandalan data. Masalah konektivitas jaringan juga menjadi sorotan, dengan 61% responden mengidentifikasi tantangan terkait jaringan, terutama di daerah terpencil. Survei ini mengungkapkan bahwa jenis sensor yang digunakan sangat bervariasi. Sensor suhu dan kelembaban adalah yang paling umum digunakan (75%), sementara sensor yang lebih khusus untuk pemantauan kualitas air dan kualitas udara lebih jarang digunakan.

B. Wawasan Wawancara

Wawancara mendalam dengan para ahli di bidang pemantauan lingkungan memberikan wawasan kualitatif yang melengkapi hasil survei: Para ahli menekankan kurangnya protokol standar untuk penerapan IoT dalam pemantauan lingkungan, dengan 83% menyoroti hal ini sebagai tantangan yang signifikan. Kurangnya standarisasi ini menghambat interoperabilitas dan berbagi data. Tantangan yang terkait dengan infrastruktur sangat menonjol, terutama di daerah terpencil di Indonesia. Catu daya (69%), konektivitas internet (74%), dan dukungan pemeliharaan (62%) diidentifikasi sebagai penghalang yang signifikan terhadap penerapan IoT yang efektif. Mayoritas ahli (71%) menyoroti pentingnya privasi dan keamanan data, terutama saat mengumpulkan data lingkungan yang sensitif. Memastikan kerahasiaan dan integritas data dianggap sebagai prioritas.

C. Evaluasi Teknis WSN

Node sensor berhasil dipasang di beberapa lokasi pemantauan lingkungan di seluruh Indonesia. Node-node ini ditempatkan secara strategis untuk menangkap beragam parameter lingkungan, termasuk suhu, kelembaban, kualitas udara, dan kualitas air. Data yang dikumpulkan dari WSN yang digunakan kemudian dianalisis secara teknis, dengan hasil sebagai berikut: Analisis menunjukkan bahwa efisiensi transmisi data sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kemacetan jaringan dan gangguan. Paket data hilang dalam 23% kasus karena tantangan ini, yang menyebabkan kesenjangan dalam kumpulan data. Analisis konsumsi daya menunjukkan variasi di antara node sensor. Node yang dilengkapi dengan komponen hemat daya menunjukkan daya tahan baterai yang lebih lama, sementara yang lain membutuhkan penggantian baterai lebih sering. Sistem penyimpanan dan manajemen data secara umum terbukti kuat, dengan kapasitas untuk menangani volume data yang dihasilkan oleh WSN. Aksesibilitas data dipastikan, memungkinkan untuk analisis lebih lanjut.

D. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan beberapa aspek penting yang mempengaruhi optimalisasi WSN untuk pemantauan lingkungan di Indonesia. Terbatasnya adopsi teknologi IoT dalam sistem pemantauan lingkungan di Indonesia menjadi perhatian penting. IoT menawarkan potensi yang signifikan untuk pengumpulan data secara real-time dan analisis data yang efisien, tetapi pemanfaatannya yang kurang memberikan peluang yang signifikan untuk perbaikan. Tantangan yang ditimbulkan oleh infrastruktur dan konektivitas, terutama di daerah terpencil, merupakan penghalang yang signifikan. Mengatasi tantangan-tantangan ini sangat penting untuk memastikan pemantauan lingkungan yang komprehensif di seluruh negeri. Memastikan privasi dan keamanan data merupakan hal yang sangat penting, terutama ketika mengumpulkan data lingkungan yang sensitif. Kepatuhan terhadap standar perlindungan data sangat penting untuk membangun kepercayaan dalam penggunaan teknologi IoT.

Efisiensi dan keandalan node sensor sangat penting untuk pengoptimalan WSN. Temuan ini menyoroti perlunya komponen hemat energi dan metode transmisi data yang kuat untuk mengurangi kehilangan data. Studi kasus menunjukkan tantangan kontekstual dan solusi inovatif dalam mengoptimalkan WSN untuk pemantauan lingkungan. Wawasan ini dapat memandu penyebaran dan strategi di masa depan, terutama dalam pengaturan geografis dan lingkungan yang beragam.

E. Rekomendasi

Berdasarkan hasil dan diskusi, beberapa rekomendasi muncul untuk mengoptimalkan WSN untuk pemantauan lingkungan di Indonesia:

1. Mendorong adopsi teknologi IoT yang lebih luas dalam pemantauan lingkungan dengan memberikan insentif, pendanaan, dan dukungan teknis kepada lembaga dan organisasi pemerintah.
2. Mengembangkan dan menerapkan protokol dan kerangka kerja standar untuk penerapan IoT dalam pemantauan lingkungan, meningkatkan interoperabilitas dan berbagi data.
3. Berinvestasi dalam pengembangan infrastruktur, terutama di daerah terpencil, untuk memastikan pasokan daya dan konektivitas internet untuk node sensor. Solusi off-grid dan berdaya rendah harus dieksplorasi.
4. Menerapkan langkah-langkah keamanan data dan privasi yang kuat untuk melindungi data lingkungan yang sensitif. Patuhi peraturan dan standar perlindungan data yang relevan untuk membangun kepercayaan di antara para pemangku kepentingan.
5. Fokus pada pengembangan dan penyebaran node sensor hemat energi untuk memperpanjang masa pakai baterai dan mengurangi kebutuhan pemeliharaan, serta mengatasi tantangan kehilangan data.
6. Mendorong kolaborasi antara lembaga pemerintah, LSM, dan penyedia teknologi untuk memanfaatkan sumber daya dan keahlian dalam pemantauan lingkungan, menciptakan ekosistem yang lebih holistik dan efisien.
7. Mempertahankan fokus berkelanjutan dalam memantau dan meningkatkan kinerja dan efisiensi WSN melalui evaluasi rutin dan peningkatan teknis untuk mengatasi tantangan yang terus berkembang.

KESIMPULAN

Dalam upaya untuk mengoptimalkan jaringan sensor nirkabel (WSN) untuk pemantauan lingkungan di Indonesia dengan menggunakan teknologi Internet of Things (IoT), penelitian ini telah menjelaskan tantangan-tantangan penting, peluang-peluang potensial, dan nuansa teknis. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun adopsi IoT mendapatkan daya tarik di beberapa sektor pemantauan lingkungan, masih ada ruang yang cukup besar untuk berkembang, terutama di daerah-daerah terpencil dengan keterbatasan infrastruktur. Tantangan infrastruktur, yang meliputi catu daya, konektivitas internet, dan dukungan pemeliharaan, terus menghambat penyebaran teknologi IoT dan jaringan sensor yang efisien. Kurangnya protokol standar semakin menghambat interoperabilitas dan berbagi data, sehingga menghambat potensi WSN.

Masalah privasi dan keamanan data adalah yang terpenting, terutama ketika berhadapan dengan data lingkungan yang sensitif. Kepercayaan terhadap teknologi IoT dan praktik manajemen data hanya dapat dibangun dengan mematuhi standar perlindungan data dan praktik terbaik. Evaluasi teknis node sensor dalam pengaturan lingkungan dunia nyata mengungkapkan tantangan dalam efisiensi transmisi data dan konsumsi daya, yang mengindikasikan perlunya komponen hemat energi dan metode transmisi data yang kuat. Studi kasus ini menggambarkan keragaman tantangan dan solusi inovatif di berbagai konteks lingkungan yang berbeda di Indonesia. Wawasan ini sangat berharga untuk penerapan dan strategi di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Allahham, A. A., & Rahman, M. A. (2018). A smart monitoring system for campus using Zigbee wireless sensor networks. *International Journal of Software Engineering and Computer Systems (IJSECS)*, 4(1), 1–14.
- Arif, C., Nugroho, B. D. A., Maftukha, R., Suryandika, F., Hapsari, U., Nihayah, B., Naititi, N., & Sain, R. I. A. (2021). Performance of agro-environmental monitoring for optimum water and crop management: A case study for East Nusa Tenggara, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 871(1), 12032.
- Budiman, D., Iskandar, Y., & Jasuni, A. Y. (2022). Millennials' Development Strategy Agri-Socio-Preneur in West Java. *International Conference on Economics, Management and Accounting (ICEMAC 2021)*, 315–323.
- Chawla, A., Arellano, Y., Johansson, M. V., Darvishi, H., Shaneen, K., Vitali, M., Finotti, F., & Rossi, P. S. (2022). IoT-Based Monitoring in Carbon Capture and Storage Systems. *IEEE Internet of Things Magazine*, 5(4), 106–111.
- Chen, H., Nan, X., & Xia, S. (2022). Data fusion based on temperature monitoring of aquaculture ponds with wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 23(1), 6–20.
- Datta, A., & Krishnamoorti, R. (2022). Understanding the greenhouse gas impact of deforestation fires in Indonesia and Brazil in 2019 and 2020. *Frontiers in Climate*, 4, 799632.
- Dogra, R., Babbar, H., & Rani, S. (2022). Integration of WSN and IoT: Its Applications and Technologies. In *IoT and WSN based Smart Cities: A Machine Learning Perspective* (pp. 243–256). Springer.
- Eiler, A., Löfgren, A., Hjerne, O., Nordén, S., & Saetre, P. (2018). Environmental DNA (eDNA) detects the pool frog (*Pelophylax lessonae*) at times when traditional monitoring methods are insensitive. *Scientific Reports*, 8(1), 5452.
- Gandhi, V., Sardar, A., Wani, P., Borase, R., & Gawande, J. (2022). IOT Based Wireless Data Technology Using LORA and GSM. *ITM Web of Conferences*, 44, 1006.
- Gribaudo, M., Iacono, M., & Levis, A. H. (2017). An IoT-based monitoring approach for cultural heritage sites: The Matera case. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 29(11), e4153.
- Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., & Porta-Gándara, M. Á. (2013). Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(1), 166–176.
- Halik, G., Putra, V. S., & Wiyono, R. U. A. (2022). Assessment of climate change impact on drought disaster in Sampean Baru watershed, East Java, Indonesia based on IPCC-AR5. *Natural Hazards*, 112(2), 1705–1726.
- Harahap, M. A. K., Tanipu, F., Manuhutu, A., & Supriandi, S. (2023). Relations between Architecture, Urban Planning, Environmental Engineering, and Sociology in Sustainable Urban Design in Indonesia (Literature Study). *Jurnal Geosains West Science*, 1(02), 77–88.
- Hong, S.-S., Lee, J., Chung, S., & Kim, B. (2023). Fast Real-Time Data Process Analysis Based on NoSQL for IoT Pavement Quality Management Platform. *Applied Sciences*, 13(1), 658.
- Hou, L., Tan, S., Zhang, Z., & Bergmann, N. W. (2018). Thermal energy harvesting WSNs node for temperature monitoring in IIoT. *Ieee Access*, 6, 35243–35249.
- Iskandar, Y., & Sarastika, T. (2023). Study of Socio-Economic Aspect and Community Perception on

- The Development of The Agricultural Area Shrimp Ponds in Pasir mendit and Pasir Kadilangu. *West Science Journal Economic and Entrepreneurship*, 1(01), 28–36.
- Jaman, U. B. (2023). Legal Analysis of The Impact of Industrial Development on The Environment. *The Easta Journal Law and Human Rights*, 1(03), 87–92.
- Jaman, U. B., & Pertiwi, E. (2023). Kedaulatan Pajak Negara Indonesia Terhadap Perusahaan Multinasional Digital. *Jurnal Aktiva: Riset Akuntansi Dan Keuangan*, 5(1), 32–42.
- Jankovská, I., Miholová, D., Romočuský, Š., Petrtýl, M., Langrová, I., Kalous, L., Sloup, V., Válek, P., Vadlejch, J., & Lukešová, D. (2014). Importance of fish gender as a factor in environmental monitoring of mercury. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 6239–6242.
- Jeevanantham, S., & Rebekka, B. (2022). Hierarchical stable election protocol for WSN-based IoT inhabitant and environmental monitoring applications. *International Journal of Communication Systems*, 35(15), e5301.
- Jiang, Y., Liu, X., & Lian, S. (2016). Design and implementation of smart-home monitoring system with the Internet of Things technology. *Wireless Communications, Networking and Applications: Proceedings of WCNA 2014*, 473–484.
- Kadir, E. A., Efendi, A., & Rosa, S. L. (2018). Application of LoRa WAN sensor and IoT for environmental monitoring in Riau Province Indonesia. *2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, 281–285.
- Kerkez, B., Glaser, S. D., Bales, R. C., & Meadows, M. W. (2012). Design and performance of a wireless sensor network for catchment-scale snow and soil moisture measurements. *Water Resources Research*, 48(9).
- Lazarescu, M. T. (2017). Wireless Sensor Networks for the Internet of Things: barriers and synergies. *Components and Services for IoT Platforms: Paving the Way for IoT Standards*, 155–186.
- Li, H., Tang, B., Lu, H., Cheema, M. A., & Jensen, C. S. (2022). Spatial data quality in the iot era: management and exploitation. *Proceedings of the 2022 International Conference on Management of Data*, 2474–2482.
- Mainetti, L., Marasovic, I., Patrono, L., Solic, P., Stefanizzi, M. L., & Vergallo, R. (2016). A Novel IoT-aware Smart Parking System based on the integration of RFID and WSN technologies. *International Journal of RF Technologies*, 7(4), 175–199.
- Malche, T., Maheshwary, P., & Kumar, R. (2019). Environmental monitoring system for smart city based on secure Internet of Things (IoT) architecture. *Wireless Personal Communications*, 107(4), 2143–2172.
- Mendez-Monroy, P. E., Cruz May, E., Jiménez Torres, M., Gómez Hernández, J. L., Canto Romero, M., Sanchez Dominguez, I., May Tzuc, O., & Bassam, A. (2022). IoT System for the Continuous Electrical and Environmental Monitoring into Mexican Social Housing Evaluated under Tropical Climate Conditions. *Journal of Sensors*, 2022.
- Mulyani, S., & Lisdiyono, E. (2020). Legal Protection Model for Forest Preservation of Processed Timber Businesses. *International Conference on Law, Economics and Health (ICLEH 2020)*, 580–583.
- Nugrahanti, T. P. (2016). Risk assessment and earning management in banking of Indonesia: corporate governance mechanisms. *Global Journal of Business and Social Science Review*, 4(1), 1–9.
- Ouni, R., & Saleem, K. (2022). Framework for sustainable wireless sensor network based environmental monitoring. *Sustainability*, 14(14), 8356.
- Petrich, C. H., & Smith-Sanclare, S. (1997). Environmental Challenges and Policy Responses in

- Indonesia. In *Latin American Environmental Policy in International Perspective* (pp. 237–262). Routledge.
- Prodanović, R., Sarang, S., Rančić, D., Vulić, I., Stojanović, G. M., Stankovski, S., Ostojić, G., Baranovski, I., & Maksović, D. (2021). Trustworthy Wireless Sensor Networks for Monitoring Humidity and Moisture Environments. *Sensors*, 21(11), 3636.
- Rahmat, R. F., Syahputra, M. F., & Lydia, M. S. (2016). Real time monitoring system for water pollution in Lake Toba. *2016 International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, 383–388.
- Rajput, A., & Kumaravelu, V. B. (2020). Fuzzy logic-based distributed clustering protocol to improve energy efficiency and stability of wireless smart sensor networks for farmland monitoring systems. *International Journal of Communication Systems*, 33(4), e4239.
- Salunke, A., & Bhambar, S. (2019). Comparative Study of Trust and Reputation Security Models in IoT Networks. *2019 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS)*, 830–835.
- Suparwata, D. O. (2018). *Pengelolaan rehabilitasi lahan kritis berdasarkan partisipasi masyarakat di DAS Randangan Kabupaten Pohuwato*.
- Suparwata, D. O., & Djibran, M. (2018). Pemanfaatan pekarangan bero untuk usahatani buah naga. *Journal of Agritech Science (JASc)*, 2(2), 72.
- Suparwata, D. O., & Pomolango, R. (2019). Arahkan pengembangan agribisnis buah naga di pekarangan terintegrasi desa wisata Banuroja. *Agromix*, 10(2), 85–99.
- Syafarida, U. Y., Jati, D. R., & Sulastri, A. (2022). Analisis Hubungan Konstruksi Sumur Gali dan Sanitasi Lingkungan Terhadap Jumlah Bakteri Coliform Dalam Air Sumur Gali (Studi Kasus: Desa PAL IX, Kecamatan Sungai Kakap). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(3), 437–444.
- Syarif, S., Harun, N., Tola, M., & Tjaronge, M. W. (2013). Detection System of Illegal Logging Image Using Matching Process With Discrete Cosine Transform. *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER) IJCER | June 2013 | VOL 3 ISSUE 6*, 57.
- Wilde, N., Sadeghi, A., & Smith, S. L. (2021). Learning submodular objectives for team environmental monitoring. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2), 960–967.
- Wu, F., Rudiger, C., & Yuce, M. R. (2017). Design and field test of an autonomous IoT WSN platform for environmental monitoring. *2017 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*, 1–6.