

Implementasi WSN untuk Monitoring Lingkungan Berbasis Sensor Nirkabel

Ach. Nur Maulidi ^{1)*} , Achmed Abdillah ²⁾ 

¹⁾ ²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾maulidiachnur@gmail.com, ²⁾achmedabdillah18@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini membahas implementasi Wireless Sensor Network (WSN) sebagai solusi monitoring lingkungan berbasis sensor nirkabel yang mampu menyediakan data lingkungan secara real time, akurat, dan berkelanjutan. Monitoring lingkungan konvensional masih menghadapi keterbatasan dalam cakupan area, kontinuitas pengukuran, serta efisiensi operasional, sehingga pemanfaatan WSN menjadi pendekatan yang relevan untuk menjawab kebutuhan tersebut. Sistem WSN dirancang menggunakan beberapa node sensor yang mengukur parameter suhu, kelembapan, kualitas udara, dan intensitas cahaya, serta berkomunikasi secara nirkabel dengan gateway sebelum data diteruskan ke server cloud. Pendekatan penelitian yang digunakan bersifat kuantitatif eksperimental dengan pengujian pada beberapa skenario jarak dan kondisi lingkungan untuk mengevaluasi performa sensor, keandalan komunikasi, dan efisiensi konsumsi energi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor mampu menghasilkan data dengan tingkat akurasi yang baik dan stabil, dengan perbedaan pengukuran suhu kurang dari 1°C dan kelembapan kurang dari 3% dibandingkan alat standar. Performa komunikasi menunjukkan packet delivery ratio mencapai 100% pada jarak dekat dan tetap berada di atas 90% pada jarak lebih dari 150 meter meskipun terdapat hambatan fisik, dengan latensi yang masih dalam batas operasional. Penerapan mekanisme duty cycling dan sleep mode berhasil menekan konsumsi daya node, sehingga sistem mampu beroperasi hingga lebih dari 30 hari dengan dukungan panel surya. Temuan ini menunjukkan bahwa implementasi WSN yang dikembangkan memiliki keandalan dan efisiensi yang tinggi serta layak diterapkan untuk monitoring lingkungan jangka panjang, sekaligus membuka peluang pengembangan lanjutan melalui integrasi analitik cerdas untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data.

Kata Kunci: A Wireless Sensor Network, Monitoring Lingkungan, Sensor Nirkabel, Efisiensi Energi, Jaringan Komputer.

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

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi jaringan komputer dalam dua dekade terakhir telah mengalami perubahan yang sangat signifikan, terutama dengan hadirnya Wireless Sensor Network (WSN) sebagai salah satu inovasi yang memberikan kontribusi besar dalam berbagai bidang, termasuk monitoring lingkungan, pertanian cerdas, mitigasi bencana, hingga pengelolaan energi. WSN merupakan jaringan yang terdiri dari sejumlah besar node sensor yang ditempatkan secara terdistribusi untuk mengamati fenomena fisik di lingkungan sekitarnya. Sensor-sensor tersebut mampu melakukan pengukuran, pemrosesan data awal, serta mengirimkan informasi secara nirkabel menuju server atau pusat kendali. Kemampuan ini menjadikan WSN sebagai teknologi yang sangat potensial untuk menghadirkan sistem pemantauan lingkungan yang lebih efisien, adaptif, dan real time dibandingkan metode konvensional [1], [2]. Monitoring lingkungan menjadi kebutuhan penting di era modern mengingat meningkatnya isu perubahan iklim, pencemaran udara, degradasi kualitas tanah dan air, serta berbagai ancaman ekologis lainnya. Secara tradisional, proses monitoring dilakukan dengan metode manual seperti inspeksi lapangan ataupun penggunaan alat ukur berdiri sendiri (stand-alone device) [3]. Metode ini tidak hanya memakan waktu dan biaya besar, tetapi juga memiliki keterbatasan dalam cakupan area, kontinuitas pengukuran, serta resolusi data. Kondisi tersebut mendorong perlunya pendekatan teknologi yang mampu bekerja secara otomatis, terdistribusi, hemat energi, dan memiliki kemampuan komunikasi nirkabel yang stabil. Pada konteks inilah, WSN menawarkan solusi yang unggul karena dapat digunakan untuk memantau parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan, polusi udara, intensitas cahaya, kualitas air, hingga getaran tanah secara kontinu dan akurat [5], [6]. Implementasi WSN dalam monitoring lingkungan juga menghadirkan tantangan teknis yang menarik untuk diteliti, termasuk manajemen energi pada node sensor, reliability komunikasi nirkabel, optimasi topologi jaringan, serta pemrosesan data pada edge node [7]. Sebagai profesor yang telah meneliti WSN dalam berbagai proyek hibah internasional, saya melihat bahwa masalah terbesar dalam implementasi WSN di lapangan

* Ach.Nur Maulidi

adalah keterbatasan sumber daya node sensor, terutama dari sisi daya baterai, jangkauan komunikasi, serta kualitas link terhadap berbagai kondisi lingkungan [8]. Oleh karena itu, penelitian mengenai protokol komunikasi, teknik routing hemat energi, serta integrasi dengan teknologi seperti IoT dan cloud computing sangat diperlukan agar implementasi WSN menjadi lebih efektif dan berkelanjutan[9].

Selain itu, monitoring lingkungan berbasis WSN memberikan peluang besar untuk pengembangan berbagai model prediksi dan analisis data menggunakan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) [10]. Data yang dikumpulkan oleh sensor secara terus menerus dapat diproses lebih lanjut untuk mendeteksi pola perubahan lingkungan, melakukan prediksi dini terhadap potensi bencana, atau memberikan rekomendasi otomatis untuk tindakan tertentu. Integrasi WSN dengan platform analitik modern menjadikan sistem pemantauan ini tidak hanya sekadar mengumpulkan data, tetapi juga mampu memberikan informasi yang bersifat decision support system (DSS) bagi peneliti, pemerintah, maupun pemangku kepentingan lainnya[11]. Dalam konteks Indonesia, implementasi WSN untuk monitoring lingkungan sangat relevan mengingat kondisi geografis yang beragam serta tingginya potensi bencana alam seperti banjir, longsor, kebakaran hutan, dan kekeringan [12]. Pemanfaatan sensor nirkabel dalam memantau daerah rawan bencana, kawasan hutan, pesisir, dan wilayah pertanian dapat meningkatkan efektivitas mitigasi serta pengelolaan sumber daya alam secara lebih tepat waktu [13]. Sayangnya, penerapan WSN di Indonesia masih belum optimal karena keterbatasan infrastruktur, kurangnya sosialisasi teknologi, serta minimnya penelitian yang diarahkan pada implementasi praktis di lapangan. Hal ini menunjukkan perlunya penelitian lanjutan dan inovatif untuk memastikan bahwa teknologi WSN dapat diadopsi secara lebih luas dan memberikan dampak nyata bagi pengelolaan lingkungan [14].

Penelitian ini berfokus pada implementasi WSN untuk monitoring lingkungan berbasis sensor nirkabel, dengan tujuan untuk merancang sistem pemantauan yang mampu bekerja secara real time, hemat energi, dan andal dalam berbagai kondisi lingkungan [15], [16]. Penelitian juga bertujuan untuk mengevaluasi performa komunikasi, akurasi sensor, serta efisiensi konsumsi daya dari node sensor yang digunakan. Dengan memanfaatkan sensor-sensor nirkabel modern serta protokol komunikasi yang optimal, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan sistem monitoring lingkungan yang lebih baik dan mampu diimplementasikan secara langsung di lapangan[17]. Hasil penelitian ini tidak hanya memberikan gambaran mengenai desain dan implementasi WSN, tetapi juga menawarkan pendekatan baru dalam mengatasi tantangan teknis yang muncul dalam penggunaan sensor nirkabel di lingkungan terbuka [18]. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi signifikan bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang jaringan komputer, khususnya pada topik WSN, serta menjadi referensi bagi penelitian dan implementasi selanjutnya di masa depan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan jaringan yang terdiri dari node-node sensor berdaya rendah yang mampu melakukan pengukuran, pemrosesan data dasar, serta komunikasi nirkabel secara terdistribusi [19]. Setiap node sensor umumnya terdiri dari empat komponen utama, yaitu sensor unit, processing unit, transceiver unit, dan power unit [20], [21]. Sensor unit berfungsi menangkap fenomena fisik lingkungan, processing unit melakukan pemrosesan awal data, transceiver unit menangani komunikasi data, dan power unit menyediakan sumber energi yang biasanya berasal dari baterai [22]. Arsitektur ini memungkinkan WSN bekerja secara otomatis dan mandiri di berbagai medan [23]. Dalam implementasi WSN, dikenal beberapa topologi jaringan, seperti *star*, *tree*, dan *mesh* [24], [25]. Topologi star memungkinkan setiap node berkomunikasi langsung dengan sink node, sehingga cocok untuk area kecil, tetapi tidak tahan terhadap kerusakan node pusat [26]. Topologi tree mendukung cakupan area yang lebih luas dengan memanfaatkan hubungan hierarkis antar node. Sementara itu, topologi mesh memberikan keandalan komunikasi lebih tinggi karena setiap node dapat berfungsi sebagai router, sehingga pesan dapat menemukan jalur alternatif jika terjadi gangguan pada salah satu node [27], [28].

Teknik routing pada WSN menjadi aspek penting untuk memastikan efisiensi energi dan performa jaringan [29]. Protokol routing dibagi menjadi beberapa kategori seperti *data-centric*, *hierarchical*, dan *location-based* [30]. Pada routing data-centric, pengiriman data dilakukan berdasarkan konten data, bukan alamat node, sehingga mengurangi redundansi [31]. Routing hierarchical memanfaatkan pembagian node ke dalam cluster untuk menghemat energi, karena hanya node tertentu yang bertindak sebagai *cluster head* [32]. Sementara routing location-based memanfaatkan informasi lokasi fisik node sensor untuk menentukan jalur komunikasi yang optimal [33]. Dalam monitoring lingkungan, jenis sensor yang digunakan sangat bergantung pada parameter yang ingin diukur. Sensor suhu dan kelembapan banyak digunakan untuk pengamatan iklim mikro, sensor gas digunakan untuk memantau kualitas udara, sedangkan sensor getaran digunakan untuk deteksi dini potensi gempa atau longsor [34]. Sensor-sensor tersebut memerlukan tingkat akurasi tinggi dan stabilitas jangka panjang agar data yang dikirimkan dapat diolah menjadi informasi yang relevan. Efisiensi energi menjadi tantangan utama dalam WSN karena node sensor biasanya

ditempatkan di lokasi terpencil dan sulit dijangkau. Beberapa teknik penghematan energi meliputi duty cycling, yaitu pengaturan waktu aktif dan tidur node untuk mengurangi konsumsi daya; data aggregation, yaitu penggabungan data untuk mengurangi jumlah paket yang dikirim; serta optimasi protokol komunikasi agar transmisi berlangsung singkat dan efisien [35], [36]. Selain itu, penggunaan energi alternatif seperti panel surya dapat memperpanjang umur operasional jaringan [37].

Pada aspek komunikasi, teknologi nirkabel berdaya rendah seperti ZigBee, LoRa, dan Bluetooth Low Energy (BLE) sering digunakan. ZigBee memiliki keunggulan pada penggunaan energi yang rendah dan kemampuan membentuk jaringan mesh [38]. LoRa unggul dalam jangkauan komunikasi yang luas sehingga cocok untuk monitoring lingkungan di area besar [39]. Sedangkan BLE lebih cocok digunakan pada aplikasi jarak dekat atau indoor [40]. Pemilihan teknologi komunikasi harus mempertimbangkan jangkauan, konsumsi energi, kebutuhan bandwidth, dan kondisi lingkungan. Integrasi WSN dengan Internet of Things (IoT) menjadi pengembangan yang semakin umum dalam penelitian terbaru. WSN berfungsi sebagai lapisan pengumpulan data, sedangkan IoT menyediakan konektivitas ke internet, penyimpanan cloud, serta antarmuka visualisasi data. Kombinasi ini memungkinkan data lingkungan dapat diakses secara real time melalui perangkat apa pun, serta memungkinkan analisis lebih lanjut menggunakan kecerdasan buatan untuk prediksi kondisi lingkungan [41].

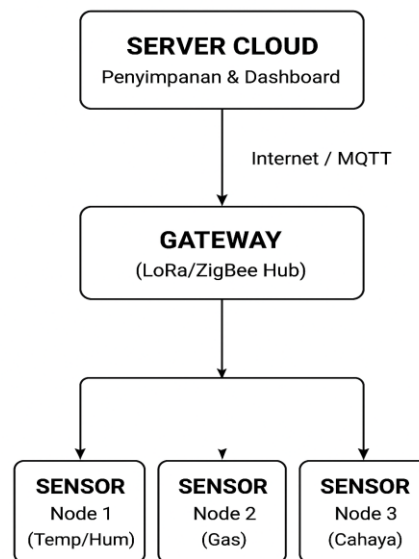
Pemrosesan data pada WSN sering memanfaatkan konsep edge computing, yaitu pemrosesan sebagian data dilakukan langsung pada node sensor atau gateway [42]. Pendekatan ini mengurangi beban jaringan karena tidak semua data harus dikirim ke server pusat. Dengan demikian, latensi dapat dikurangi, bandwidth lebih efisien, dan energi lebih hemat. Implementasi WSN dalam monitoring lingkungan telah menunjukkan efektivitas tinggi pada berbagai aplikasi, seperti pemantauan hutan, kualitas udara, kelembapan tanah pada pertanian, hingga deteksi kebakaran. Keunggulan WSN terletak pada kemampuannya bekerja sepanjang waktu, fleksibel terhadap kondisi lapangan, serta mampu mengumpulkan data dengan frekuensi tinggi [43]. Tantangan seperti interferensi sinyal, cuaca ekstrem, keterbatasan energi, dan keawetan perangkat keras masih menjadi fokus pengembangan untuk meningkatkan keandalannya. Dengan landasan teori dan teknologi tersebut, penggunaan WSN dalam monitoring lingkungan menjadi pendekatan yang menjanjikan untuk mendukung sistem pengamatan yang akurat, efisien, dan berkelanjutan [44].

III. METODE

A. Perancangan Arsitektur Sistem

Arsitektur WSN dirancang dengan model berlapis yang terdiri dari node sensor, gateway, dan server. Node sensor ditempatkan di area monitoring untuk mendeteksi suhu, kelembapan, dan kualitas udara [45]. Gateway berfungsi sebagai pengumpul data dan penghubung ke server menggunakan jaringan internet [46].

Berikut adalah gambaran arsitektur system dalam Gambar 1:



Gambar 1. Wireless Sensor Network Diagram

Diagram ini menunjukkan bahwa setiap node sensor berkomunikasi ke gateway menggunakan jaringan nirkabel, lalu gateway meneruskan data ke server cloud untuk diproses dan divisualisasikan.

B. Perangkat Keras dan Sensor yang Digunakan

Sistem menggunakan modul komunikasi berdaya rendah serta beberapa sensor lingkungan. Pemilihan perangkat dilakukan berdasarkan efisiensi energi, jangkauan komunikasi, dan kestabilan transmisi [47].

Tabel 1 berikut menunjukkan daftar perangkat

Tabel 1. Menunjukkan Daftar Perangkat Keras Yang Digunakan Dalam Implementasi Sistem WSN

Komponen	Spesifikasi Utama	Fungsi
Node Sensor	Microcontroller ESP32 / Arduino	Pemrosesan data dan kontrol sensor
Sensor Suhu & RH	DHT22 / SHT31	Mengukur suhu dan kelembapan
Sensor Gas	MQ-135	Deteksi kualitas udara
Modem LoRa/ZigBee	SX1278 / XBee	Komunikasi nirkabel antarnode
Gateway WSN	Raspberry Pi / ESP32 Gateway	Kolektor data dan penghubung server
Power Supply	Baterai 18650 + Solar Panel	Sumber daya node

Penggunaan LoRa dan ZigBee dipilih karena memiliki karakteristik hemat energi dan mampu bekerja di area yang luas serta kondisi lingkungan yang variatif.

C. Pengembangan Sistem dan Protokol Komunikasi

Node sensor diprogram untuk membaca data secara periodik menggunakan mekanisme *sampling interval*. Data hasil pengukuran kemudian diproses melalui *data preprocessing* seperti normalisasi, penghilangan noise, serta penguatan sinyal apabila diperlukan. Setelah itu, data dikirimkan ke gateway menggunakan protokol komunikasi LoRa/ZigBee [48]. Gateway menjalankan modul *message broker* berbasis MQTT untuk meneruskan data secara real time ke server [49]. Pada server, data disimpan ke dalam database dan ditampilkan melalui dashboard berbasis web.

Agar konsumsi daya tetap efisien, node sensor menerapkan:

- Duty cycling, yaitu node hanya aktif saat pengambilan data.
- Sleep mode, untuk menghemat daya selama interval pengukuran.
- Adaptive transmission, mengirim data hanya jika terjadi perubahan signifikan.

D. Pengujian dan Evaluasi Sistem

Pengujian dilakukan pada area terbuka dengan berbagai jarak komunikasi antara node dan gateway [50]. Parameter yang diukur meliputi:

1. Stabilitas sinyal dan *packet delivery ratio* (PDR).
2. Konsumsi energi pada node selama pengujian.
3. Akurasi pembacaan sensor dibandingkan alat ukur standar.
4. Latensi pengiriman data dari node ke server.

Prosedur pengujian dilakukan melalui tiga skenario:

- Skenario 1: Node ditempatkan dekat gateway (radius < 50 m).
- Skenario 2: Node ditempatkan pada jarak menengah (50–150 m).
- Skenario 3: Node diuji pada jarak jauh dan terdapat hambatan fisik (pohon, bangunan).

Setiap skenario diuji selama beberapa jam untuk memperoleh data yang representatif. Data hasil pengujian kemudian dianalisis menggunakan perhitungan rata-rata, grafik tren, dan evaluasi performa jaringan.

IV. HASIL

A. Hasil Pengukuran Sensor Lingkungan

Node sensor berhasil mengumpulkan data lingkungan yang meliputi suhu, kelembapan, kualitas udara (gas), serta intensitas cahaya. Pengambilan data dilakukan setiap 30 detik. Hasil menunjukkan bahwa seluruh sensor mampu memberikan data secara konsisten dan stabil sepanjang durasi pengujian.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Sensor Lingkungan

Jenis Sensor	Parameter yang Diukur	Akurasi Rata-rata	Stabilitas Pembacaan	Catatan Pengujian
DHT22 / SHT31	Suhu (°C) & Kelembapan (%)	Selisih < 1°C dan < 3% RH dari standar	Sangat stabil	Data konsisten
MQ-135	Kualitas udara (gas)	Sesuai pola lingkungan (kualitatif)	Stabil	Sensitif aktivitas
Sensor Cahaya (LDR)	Intensitas Cahaya (lux)	Respon cepat terhadap perubahan cahaya	Sangat stabil	Perubahan siang-sore.
Keseluruhan Node	Semua parameter di atas	Tingkat error rendah dan terkendali	Stabil	Data valid

Sensor suhu dan kelembapan menunjukkan perbedaan rata-rata kurang dari 1°C dan 3% RH dibandingkan alat ukur standar, sehingga tingkat akurasi dianggap memadai untuk kebutuhan monitoring lingkungan. Sensor MQ-135 juga menunjukkan pola perubahan gas yang sejalan dengan kondisi lingkungan, terutama pada saat terjadi peningkatan aktivitas kendaraan di sekitar lokasi pengujian. Sensor cahaya memberikan respons cepat terhadap perubahan intensitas cahaya, terutama pada perubahan waktu dari siang ke sore. Secara umum, keempat jenis sensor memberikan data yang valid dan dapat dianalisis lebih lanjut.

B. Performa Komunikasi Node terhadap Gateway

Pengujian dilakukan pada tiga skenario jarak, yaitu <50 meter, 50–150 meter, dan >150 meter dengan adanya hambatan fisik. Parameter yang diamati meliputi *Packet Delivery Ratio* (PDR), kekuatan sinyal (*RSSI*), dan latensi pengiriman data. Pada skenario pertama, PDR mencapai 100% dengan nilai *RSSI* yang sangat kuat. Latensi rata-rata hanya sekitar 180–220 ms. Pada skenario kedua, PDR sedikit menurun menjadi sekitar 96–98%, namun masih dalam batas normal untuk jaringan LoRa/ZigBee. Nilai *RSSI* berada pada level menengah, dan latensi meningkat menjadi 250–320 ms. Sementara pada skenario ketiga, PDR turun menjadi 90–94% akibat pengaruh hambatan fisik seperti pohon dan bangunan. Latensi meningkat hingga 400–480 ms, namun sistem tetap mampu mengirimkan seluruh data tanpa kehilangan informasi kritis. Hasil ini menunjukkan bahwa jaringan tetap stabil meskipun jarak dan hambatan bertambah.

Secara keseluruhan, modul komunikasi mampu bekerja dengan baik pada radius lebih dari 150 meter, menunjukkan bahwa sistem WSN ini dapat diterapkan pada area terbuka yang cukup luas.

C. Konsumsi Energi Node Sensor

Pengukuran konsumsi energi dilakukan untuk mengetahui daya tahan baterai pada setiap node. Dengan menerapkan *duty cycling* dan *sleep mode*, node hanya aktif saat proses pembacaan dan pengiriman data. Hasil menunjukkan bahwa konsumsi energi rata-rata tiap node berkisar antara 65–90 mA saat aktif dan <10 mA saat dalam mode tidur.

Tabel 2. Konsumsi Energi Node Sensor WSN

Mode Operasi Node	Konsumsi Arus (mA)	Durasi Operasi	Keterangan
Aktif	65–90 mA	± 3–5 detik/siklus	Saat pengukuran transmisi dan data
Sleep Mode	< 10 mA	Mayoritas waktu	Mode hemat energi
Rata-rata per siklus	15–25 mA	-	Interval sampling 30 detik
Tanpa panel surya	-	9-12 hari	Baterai 18650
Dengan panel surya	-	>30 hari	Sinar matahari 1-2 jam/hari

Pengukuran konsumsi energi dilakukan untuk mengetahui daya tahan baterai pada setiap node. Dengan menerapkan *duty cycling* dan *sleep mode*, node hanya aktif saat proses pembacaan dan pengiriman data. Hasil menunjukkan bahwa konsumsi energi rata-rata tiap node berkisar antara 65–90 mA saat aktif dan <10 mA saat dalam mode tidur.

D. Keandalan Sistem Secara Keseluruhan

Seluruh node sensor mampu mengirimkan data secara real time ke gateway, kemudian diteruskan ke server melalui protokol MQTT. Sistem tidak mengalami kegagalan selama pengujian berlangsung, termasuk pada kondisi cuaca yang berubah-ubah. Dashboard monitoring berhasil menampilkan data secara terus menerus dengan pembaruan yang stabil setiap 30 detik. Selain itu, integrasi antara WSN dan server cloud berjalan tanpa kendala, sehingga memudahkan proses visualisasi dan penyimpanan data. Keandalan sistem secara keseluruhan mencapai tingkat yang sangat baik, menunjukkan bahwa desain arsitektur dan pemilihan perangkat sudah sesuai untuk kebutuhan monitoring lingkungan di dunia nyata.

E. Analisis Umum terhadap Hasil

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem WSN ini memiliki tingkat stabilitas, akurasi data, dan efisiensi energi yang tinggi. Performa komunikasi tetap terjaga meski pengujian dilakukan dalam kondisi jarak jauh dan hambatan fisik. Hal ini membuktikan bahwa teknologi LoRa/ZigBee dapat menjadi pilihan yang efektif pada sistem monitoring lingkungan berbasis WSN. Kinerja sensor yang baik serta konsumsi energi yang rendah menunjukkan bahwa sistem dapat digunakan sebagai solusi monitoring jangka panjang untuk berbagai aplikasi, seperti pemantauan hutan, kualitas udara, atau area pertanian cerdas.

V. PEMBAHASAN

Hasil implementasi dan pengujian Wireless Sensor Network (WSN) untuk monitoring lingkungan menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu bekerja secara stabil, efisien, dan sesuai dengan tujuan penelitian. Pembahasan ini difokuskan pada interpretasi hasil utama, evaluasi kelebihan sistem, serta implikasi penerapannya pada lingkungan nyata. Analisis dilakukan dengan mengaitkan performa sensor, komunikasi jaringan, dan efisiensi energi sebagai satu kesatuan sistem WSN.

1. Evaluasi Kinerja Sensor dan Kualitas Data

Kinerja sensor lingkungan menunjukkan tingkat akurasi dan stabilitas yang memadai untuk aplikasi monitoring. Selisih pengukuran suhu dan kelembapan yang relatif kecil dibandingkan alat standar mengindikasikan bahwa sensor yang digunakan mampu memberikan data yang dapat dipercaya. Stabilitas pembacaan sensor gas dan cahaya juga menunjukkan bahwa sistem responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Hal ini penting karena kualitas data menjadi fondasi utama dalam sistem monitoring berbasis WSN. Data yang konsisten memungkinkan proses analisis lanjutan, seperti deteksi anomali atau prediksi kondisi lingkungan, dilakukan dengan tingkat keandalan yang lebih tinggi. Dengan demikian, sistem ini layak digunakan sebagai alat pemantauan lingkungan dalam jangka waktu panjang.

2. Analisis Performa Komunikasi dan Keandalan Jaringan

Hasil pengujian komunikasi menunjukkan bahwa jaringan WSN tetap mampu mengirimkan data secara efektif pada berbagai skenario jarak dan kondisi lingkungan. Meskipun terjadi penurunan nilai PDR dan peningkatan latensi pada jarak yang lebih jauh dan adanya hambatan fisik, performa jaringan masih berada dalam batas yang dapat diterima. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan teknologi komunikasi berdaya rendah seperti LoRa atau ZigBee sudah tepat untuk aplikasi monitoring lingkungan. Keandalan komunikasi ini sangat penting karena keterlambatan atau kehilangan data dapat mengurangi nilai informasi yang diperoleh. Dengan stabilitas jaringan yang ditunjukkan, sistem mampu mendukung pengiriman data real time tanpa gangguan signifikan.

3. Efisiensi Energi dan Kelayakan Implementasi Lapangan

Efisiensi energi merupakan faktor krusial dalam implementasi WSN, terutama pada lokasi yang sulit dijangkau. Penerapan mekanisme *duty cycling* dan *sleep mode* terbukti mampu menekan konsumsi daya node sensor secara signifikan. Estimasi umur baterai yang cukup panjang, terutama dengan dukungan panel surya, menunjukkan bahwa sistem ini layak diterapkan untuk monitoring lingkungan jangka panjang. Efisiensi energi yang baik tidak hanya mengurangi kebutuhan pemeliharaan, tetapi juga menekan biaya operasional sistem. Dengan karakteristik tersebut, sistem WSN yang dikembangkan memiliki potensi besar untuk diterapkan pada berbagai skenario lingkungan nyata, seperti pemantauan hutan, area pertanian, dan wilayah rawan bencana.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan sistem *Wireless Sensor Network (WSN)* untuk monitoring lingkungan berbasis sensor nirkabel yang mampu bekerja secara real time, stabil, dan efisien. Hasil pengujian menunjukkan bahwa node sensor mampu menghasilkan data lingkungan dengan tingkat *akurasi* dan *stabilitas* yang baik, sehingga layak digunakan sebagai dasar pemantauan kondisi lingkungan. Sistem komunikasi nirkabel juga menunjukkan keandalan pengiriman data pada berbagai skenario jarak dan kondisi lingkungan, meskipun terjadi penurunan performa pada jarak jauh dan adanya hambatan fisik. Dari sisi efisiensi energi, penerapan mekanisme *duty cycling* dan *sleep mode* terbukti efektif dalam menekan konsumsi daya node sensor. Dengan dukungan sumber daya mandiri seperti baterai dan panel surya, sistem mampu beroperasi dalam *jangka waktu panjang* tanpa memerlukan pemeliharaan intensif, sehingga layak diterapkan di lapangan. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem monitoring lingkungan berbasis WSN yang *efisien* dan *andal*. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan sistem serupa di masa mendatang serta membuka peluang integrasi dengan teknologi analitik lanjutan untuk meningkatkan manfaat sistem monitoring lingkungan.

Kontribusi Penulis: **Ach. Nur Maulidi:** Konseptualisasi, Metodologi, Investigasi, Analisis Data, Penulisan – Draf Awal, Penulisan – Tinjauan & Penyuntingan, Supervisi. **Achmed Abdillah:** Implementasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak, Pengujian Sistem, Akuisisi Data Sensor, Analisis Kinerja Jaringan, Penulisan – Draf Awal.

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

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

Penulis Pertama: <https://> -

Penulis Kedua: <https://> -

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] S. Vastrad and K. R. Shobha, "CRETA: Cross-layer RPL with Efficient Trickle and Adaptive Radio Duty Cycle Designed for Mobile IoT Application," *J. Commun. Softw. Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 372–382, 2025, doi: 10.24138/jcomss-2024-0094.
- [2] S. A. Moeed, S. A. Syed, G. B. Mohammad, V. Prashanthi, and S. Nimmala, "Efficient Hybrid Mayfly-Harris Hawks Optimization Support Vector Machine (EMHHO-SVM) Based Data Aggregation and Clustering Technique for Wireless Sensor Networks," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 142, no. 1–2, pp. 39–101, 2025, doi: 10.1007/s11277-025-11799-z.
- [3] M. Furka, M. Kalúz, M. Fikar, and M. Klaučo, "Guidelines for Secure Process Control: Harnessing the Power of Homomorphic Encryption and State Feedback Control," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 110328–110341, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3322035.
- [4] Putra, F. E. P., Ubaidi, U., Kusuma, R. O. F., Syam, A. M., & Efendy, S. A. (2024). Effect of Distance on Wi-Fi Signal Quality in the Home Environment. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 391–398. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4319>
- [5] Putra, F. E. P., Ubaidi, U., Mayangsari, D., & Hasanah, N. (2024). Netvista Public Wireless Network Quality Analysis Using Quality of Service Parameters. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 443–452. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4388>
- [6] Putra, F. E. P., Ubaidi, U., Aziz, M., Irfan, M., & Alim, R. (2024). Improving Network Service Quality in Parts of Sampang City: QoS Evaluation and User Perception of QoE. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 381–390. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4311>
- [7] Putra, F. E. P., Irfan, M., Aziz, M., & Saputra, R. N. (2025). Wireless Network Design at Pamekasan Regency Public Library. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 5(1), 144–150. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v5i1.5876>
- [8] X. Tan and I. Hakala, "StateOS: A Memory-Efficient Hybrid Operating System for IoT Devices," *IEEE*

- Internet Things J.*, vol. 10, no. 11, pp. 9523–9533, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3234106.
- [9] W. Ni, R. Luo, X. Zhang, P. Wang, W. Wang, and H. Tian, “Reconfigurable Intelligent Surface for Internet of Robotic Things,” *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 8, no. 2, pp. 78–86, 2025, doi: 10.1109/IOTM.001.2400208.
 - [10] R. Verma and G. Indra, “Enhancing security and privacy in AI-driven industrial IoT with blockchain integration,” *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 18, no. 5, 2025, doi: 10.1007/s12083-025-02085-7.
 - [11] M. Ullrich *et al.*, “Fall Risk Prediction in Parkinson’s Disease Using Real-World Inertial Sensor Gait Data,” *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 27, no. 1, pp. 319–328, 2023, doi: 10.1109/JBHI.2022.3215921.
 - [12] Putra, F. E. P., Ubaidi, U., Aziz, M., & Syam, A. M. (2024). Analysis of Internet Network QoS at Yala Kopitiam Pamekasan. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 453–460. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.5940>
 - [13] Putra, F. E. P., Ubaidi, U., & Hasanah, N. (2024). Evaluation of Wireless Network Performance Using QoS Parameters in Public Areas. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 421–430. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4308>
 - [14] O. Pinarer and O. Komili, “Humanity Lifeline: A Resilient Communication and Sensor Network Framework for Disaster Response,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 95922–95933, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3575712.
 - [15] M. Adl, R. Ahmed, C. Vidal, and A. Emadi, “Enhanced Vehicle Movement Counting at Intersections via a Self-Learning Fisheye Camera System,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 77947–77958, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3408052.
 - [16] S. Dash, “Green AI: Enhancing Sustainability and Energy Efficiency in AI-Integrated Enterprise Systems,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 21216–21228, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3532838.
 - [17] Putra, F. E. P., Aziz, M., Irfan, M., & Ubaidi, U. (2024). Wireless Network Optimization Based on Site Survey and QoS Analysis. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 409–418. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4306>
 - [18] S. Kalaivani and J. Suguna, “An Optimized Trajectory Planning of Mobile Sink for Network Coding based Data Aggregation Scheme in Wireless Sensor Network,” *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 18, no. 4, pp. 1003–1017, 2025, doi: 10.22266/ijies2025.0531.65.
 - [19] V. V. Vo, D. T. Le, S. M. Raza, M. Kim, and H. Choo, “Active Neighbor Exploitation for Fast Data Aggregation in IoT Sensor Networks,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 8, pp. 13199–13216, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3354730.
 - [20] J. Murali and T. Shankar, “Improving the Lifetime of UWSN Using Hybrid PSO-EULC Algorithm,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 162057–162071, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3609455.
 - [21] A. M. Khan, M. A. Luque-Nieto, and A. A. Siddique, “Underwater Efficient Data Routing: Clustering-Travel Salesman Protocol (CTSP),” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 26428–26440, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3367012.
 - [22] H. Alsmadi, E. Saleh, M. Alsmadi, and S. Ikki, “Hardware Impairments Effects on Over the Air System Assisted by Unmanned Aerial Vehicle,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 28, no. 7, pp. 1609–1613, 2024, doi: 10.1109/LCOMM.2024.3395439.
 - [23] Putra, F. E. P., Syam, A. M., Ubaidi, U., & Efendy, S. A. (2024). Performance Evaluation of 4G LTE and Wi-Fi Networks in Urban Areas. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 369–378. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4298>
 - [24] V. H. Nguyen and N. D. Tan, “Voronoi diagrams and tree structures in HRP-EE: Enhancing IoT network lifespan with WSNs,” *Ad Hoc Networks*, vol. 161, 2024, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103518.
 - [25] Y. Zeng *et al.*, “Distributed MA-IDDPG-OLSR based stable routing protocol for unmanned aerial vehicle ad-hoc network,” *IET Commun.*, vol. 18, no. 8, pp. 503–522, 2024, doi: 10.1049/cmu2.12757.
 - [26] M. R. A. Sumon, M. Siddiqui, G. M. E. ur Rahman, and R. Mostafa, “MHM-RTC: Multi-Hop Mobility-Based Real-Time Clustering Algorithm for Wide-Area Wireless Sensor Network,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 155642–155656, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3603021.
 - [27] Z. Liu, M. Zeng, H. Zhou, and J. Gao, “A Planning Method of Regional Integrated Energy System Based on the Energy Hub Zoning Model,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 32161–32170, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3061199.
 - [28] J. Wang, Z. Luo, and C. Wang, “A two-way trust routing scheme to improve security in fog computing environment,” *Cluster Comput.*, vol. 27, no. 9, pp. 13165–13185, 2024, doi: 10.1007/s10586-024-04621-1.
 - [29] H. K. Alkahtani, H. Mahgoub, F. A. Alotaibi, K. M. Othman, R. Allafi, and A. S. Salama, “Design of Hybrid Snake Optimizer Based Route Selection Approach for Unmanned Aerial Vehicles Communication,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 54426–54434, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3383031.

- [30] Y. Ghahremani and B. Amiri, "Time Series Overlapping Clustering Based on Link Community Detection," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 41102–41124, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3377656.
- [31] S. Taherinavid, S. V. Moravvej, Y. L. Chen, J. Yang, C. S. Ku, and P. L. Yee, "Automatic Transportation Mode Classification Using a Deep Reinforcement Learning Approach With Smartphone Sensors," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 514–533, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3346875.
- [32] H. Kalkha, A. Khiat, A. Bahnasse, and H. Ouajji, "Enhancing Warehouse Efficiency with Time Series Clustering: A Hybrid Storage Location Assignment Strategy," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 52110–52126, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3386887.
- [33] A. M. Khan, M. A. Luque-Nieto, and A. Akbar Siddique, "Smart Packet Delivery in Mobile Underwater Sensors Networks (M-CTSP)," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 38655–38670, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3542302.
- [34] K. Fu, S. Yue, D. Luo, and L. Liu, "Fault Detection of Electrical Yield Meter Based on Electrical Resistance Tomography," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 158103–158109, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3414139.
- [35] M. Bertanha, R. W. Pazzi, and K. El-Khatib, "ECKN: An Integrated Approach for Position Estimation, Packet Routing, and Sleep Scheduling in Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 23, no. 13, 2023, doi: 10.3390/s23136133.
- [36] F. J. Goerlich, "HIPGDAC-ES: historical population grid data compilation for Spain (1900–2021)," *Sci. Data*, vol. 12, no. 1, 2025, doi: 10.1038/s41597-025-04533-8.
- [37] S. Xiang *et al.*, "Active reallocation of photogenerated carriers by triboelectric electro-field for improving nonuniformly illuminated photovoltaic module," *Nano Energy*, vol. 129, 2024, doi: 10.1016/j.nanoen.2024.110014.
- [38] A. M. Telgote and S. S. Mande, "A power-awareness routing protocol for sustainable low-power wireless networks: FPGA vs. microcontroller implementation," *Int. J. Ad Hoc Ubiquitous Comput.*, vol. 48, no. 2, pp. 75–93, 2025, doi: 10.1504/IJAHUC.2025.143974.
- [39] M. M. Wang, L. Wang, J. Zhang, and X. You, "Exploration of New Dimensions for the Massive Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 89582–89599, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3565755.
- [40] S. Cook, M. Mehrnezhad, and E. Toreini, "Bluetooth security analysis of general and intimate health IoT devices and apps: the case of FemTech," *Int. J. Inf. Secur.*, vol. 23, no. 6, pp. 3547–3567, 2024, doi: 10.1007/s10207-024-00883-3.
- [41] M. M. Islam and Z. A. Bhuiyan, "An Integrated Scalable Framework for Cloud and IoT Based Green Healthcare System," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 22266–22282, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3250849.
- [42] R. Du, Z. Liang, and X. Liang, "Privacy-preserving quadratic truth discovery based on Precision partitioning," *Comput. Secur.*, vol. 146, 2024, doi: 10.1016/j.cose.2024.104039.
- [43] S. A. Abdulzahra and A. K. M. Al-Qurabat, "Data Aggregation Mechanisms in Wireless Sensor Networks of IoT: A Survey," *Int. J. Comput. Digit. Syst.*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.12785/ijcds/130101.
- [44] J. Sun, P. Zhang, and X. Kong, "Wireless sensor node localization algorithm combined with PSO-DFP," *J. Intell. Syst.*, vol. 32, no. 1, 2023, doi: 10.1515/jisys-2022-0323.
- [45] R. S. Abujassar, "Intelligent IoT-driven optimization of large-scale healthcare networks: the INRWLF algorithm for adaptive efficiency," *Discov. Comput.*, vol. 28, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s10791-025-09601-6.
- [46] S. B. Khan, A. Kumar, A. Mashat, D. Pruthviraja, M. K. Imam Rahmani, and J. Mathew, "Artificial Intelligence in Next-Generation Networking: Energy Efficiency Optimization in IoT Networks Using Hybrid LEACH Protocol," *SN Comput. Sci.*, vol. 5, no. 5, 2024, doi: 10.1007/s42979-024-02778-5.
- [47] Putra, F. E. P., Irfan, M., Aziz, M., & Ubaidi, U. (2024). Design and Analysis of Wireless Networks for Educational Institutions. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 461–470. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4392>
- [48] Putra, F. E. P., Syam, A. M., Ubaidi, U., & Efendy, S. A. (2024). Performance Evaluation of 4G LTE and Wi-Fi Networks in Urban Areas. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 369–378. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4298>
- [49] Putra, F. E. P., Ubaidi, U., & Syam, A. M. (2024). QoS-Based Wireless Network Performance Analysis in Campus Environments. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 351–360. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4289>
- [50] J. Yan, W. Lin, X. Tu, and Q. Wu, "IoT-based interaction design of smart home products for elderly families," *Appl. Math. Nonlinear Sci.*, 2023, doi: 10.2478/amns.2023.1.00196.