



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

Romeo djefzy romadhoni^{1)*} , Deki Wahyudi²⁾ 

¹⁾ ²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ mazjeff026@gmail.com, ²⁾ dekywahyudi352@gmail.com

Abstrak

Kemajuan teknologi Internet of Things (IoT) dan Jaringan Sensor Nirkabel (Wireless Sensor Network – WSN) telah membawa perubahan signifikan dalam sistem pemantauan lingkungan global. Namun, penerapan teknologi ini di Indonesia masih menghadapi kendala efisiensi energi, keandalan komunikasi, dan keterbatasan infrastruktur jaringan, terutama di wilayah dengan kondisi geografis yang kompleks. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja WSN dalam aplikasi pemantauan lingkungan berbasis IoT dengan fokus pada peningkatan efisiensi energi, stabilitas transmisi data, dan masa hidup jaringan agar sesuai dengan karakteristik lingkungan tropis Indonesia. Pendekatan yang digunakan adalah studi eksperimental kuantitatif berbasis simulasi dan uji lapangan. Sistem dirancang menggunakan arsitektur tiga lapisan (sensor, jaringan, dan aplikasi) yang terintegrasi dengan platform IoT ThingsBoard melalui protokol MQTT. Optimisasi jaringan dilakukan dengan algoritma *Particle Swarm Optimization (PSO)* untuk menentukan jalur komunikasi dan pemilihan kepala kluster secara adaptif. Hasil: Hasil penelitian menunjukkan peningkatan efisiensi energi hingga 28%, peningkatan *Packet Delivery Ratio* menjadi 96,1%, dan perpanjangan masa hidup jaringan hingga 142 jam. Latensi rata-rata turun menjadi 1,12 detik, serta throughput meningkat hingga 27,3 kbps. Penerapan algoritma PSO terbukti efektif dalam meningkatkan performa jaringan sensor nirkabel berbasis IoT untuk pemantauan lingkungan. Model yang dihasilkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan sistem *Smart Environmental Monitoring* di Indonesia dan membuka peluang penelitian lanjutan dalam penerapan kecerdasan buatan untuk optimisasi jaringan yang lebih efisien dan adaptif.

Kata Kunci: Jaringan Sensor Nirkabel, Internet of Things, Particle Swarm Optimization, Efisiensi Energi, Pemantauan Lingkungan.

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

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi yang begitu pesat dalam dua dekade terakhir telah mengubah paradigma pengelolaan dan pemantauan lingkungan di seluruh dunia. Salah satu teknologi yang menjadi fokus utama dalam bidang ini adalah Jaringan Sensor Nirkabel (Wireless Sensor Network – WSN). Teknologi ini memungkinkan pengumpulan data secara real-time dari berbagai titik sensor yang tersebar di suatu wilayah tertentu, yang kemudian dapat dianalisis untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data [1], [2], [3], [4]. Dalam konteks Indonesia—sebuah negara kepulauan dengan keragaman geografis, ekosistem, dan kondisi lingkungan yang kompleks—pemanfaatan jaringan sensor nirkabel memiliki potensi strategis untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas dalam pemantauan lingkungan.

Pada era Internet of Things (IoT), jaringan sensor nirkabel tidak lagi berdiri sendiri, tetapi menjadi bagian integral dari ekosistem yang lebih luas, di mana perangkat-perangkat cerdas saling terhubung dan berkomunikasi secara otomatis melalui internet. Integrasi WSN dengan IoT membuka peluang besar dalam menghadirkan sistem pemantauan lingkungan yang adaptif, skalabel, dan berdaya guna tinggi. Melalui pendekatan ini, data lingkungan seperti suhu, kelembapan, kualitas udara, curah hujan, maupun tingkat polusi dapat dipantau secara terus-menerus dan diolah menggunakan algoritma cerdas untuk memberikan informasi yang akurat dan tepat waktu kepada pihak berwenang maupun masyarakat luas [5], [6], [7], [8]. Namun demikian, penerapan sistem ini di Indonesia masih menghadapi sejumlah tantangan signifikan, baik dari sisi teknis, infrastruktur, maupun kebijakan. Tantangan teknis mencakup keterbatasan energi pada node sensor, stabilitas koneksi jaringan pada wilayah terpencil, serta pengelolaan data besar (big data) yang dihasilkan oleh ribuan sensor secara simultan. Selain itu, kondisi geografis Indonesia yang terdiri atas ribuan pulau dengan topografi yang beragam turut menambah kompleksitas dalam desain dan implementasi jaringan sensor yang andal. Dalam konteks inilah, optimalisasi jaringan sensor nirkabel menjadi isu penting yang

* Romeo djefzy romadhoni

harus mendapatkan perhatian serius, tidak hanya dari aspek efisiensi energi dan keandalan jaringan, tetapi juga dari segi integrasi dengan platform IoT yang relevan dengan kebutuhan nasional.

Berdasarkan berbagai penelitian internasional yang telah saya lakukan dalam bidang jaringan komputer dan komunikasi data, terdapat kecenderungan global untuk beralih menuju pendekatan self-organizing network dan intelligent routing protocols yang memanfaatkan teknik pembelajaran mesin (machine learning) untuk meningkatkan efisiensi operasional WSN. Pendekatan semacam ini memungkinkan sistem untuk beradaptasi secara dinamis terhadap perubahan kondisi lingkungan maupun beban jaringan, sehingga dapat mempertahankan performa optimal meskipun dalam kondisi infrastruktur yang terbatas [9], [10], [11]. Aplikasi prinsip-prinsip tersebut di Indonesia diharapkan mampu memberikan solusi efektif terhadap permasalahan keterbatasan sumber daya dan infrastruktur jaringan yang masih menjadi hambatan utama di banyak daerah. Selain aspek teknis, penting pula untuk menyoroti aspek keberlanjutan (sustainability) dalam pengembangan sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT. Optimalisasi jaringan sensor tidak hanya dimaksudkan untuk meningkatkan efisiensi komunikasi data, tetapi juga untuk mendukung pembangunan berkelanjutan (sustainable development goals/SDGs), terutama pada poin terkait aksi terhadap perubahan iklim dan perlindungan ekosistem darat maupun laut. Dalam konteks ini, data yang dihasilkan dari jaringan sensor dapat menjadi dasar ilmiah dalam penyusunan kebijakan publik berbasis bukti (evidence-based policy), misalnya dalam mitigasi bencana alam, pengelolaan sumber daya air, atau pengendalian polusi udara di kawasan industri.

Pemanfaatan teknologi IoT dalam pemantauan lingkungan juga membuka peluang kolaborasi multidisiplin antara bidang informatika, lingkungan, elektronika, dan kebijakan publik. Kolaborasi ini menjadi penting untuk memastikan bahwa desain arsitektur jaringan, protokol komunikasi, dan algoritma optimasi yang dikembangkan dapat diimplementasikan secara efektif di lapangan. Dalam hal ini, pendekatan multi-hop communication, energy-efficient clustering, dan data aggregation techniques menjadi elemen penting dalam rancangan sistem WSN yang optimal. Melalui pendekatan tersebut, konsumsi energi pada setiap node sensor dapat diminimalkan, sekaligus menjaga kualitas transmisi data agar tetap stabil dan akurat [12], [13], [14], [15]. Di sisi lain, implementasi jaringan sensor nirkabel berbasis IoT di Indonesia perlu mempertimbangkan ketersediaan infrastruktur telekomunikasi, dukungan pemerintah, serta kesadaran masyarakat terhadap pentingnya data lingkungan. Pemerintah Indonesia telah menunjukkan komitmen kuat terhadap pengembangan ekosistem digital nasional melalui berbagai inisiatif seperti *Gerakan 100 Smart City* dan *Indonesia Digital Roadmap 2021–2024*. Namun, agar potensi teknologi ini dapat dimanfaatkan secara maksimal dalam konteks pemantauan lingkungan, diperlukan penelitian lanjutan yang menekankan pada aspek optimisasi jaringan agar efisien, tahan terhadap gangguan, dan mampu beroperasi dalam kondisi sumber daya terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja jaringan sensor nirkabel dalam aplikasi pemantauan lingkungan dengan memanfaatkan teknologi IoT, dengan fokus utama pada peningkatan efisiensi energi, keandalan transmisi data [16], [17], [18], dan kemampuan adaptasi jaringan terhadap kondisi lingkungan yang dinamis. Melalui pendekatan eksperimental dan analisis komputasional, diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi ilmiah yang signifikan dalam pengembangan sistem pemantauan lingkungan berbasis WSN di Indonesia, serta menjadi rujukan bagi pengembangan kebijakan teknologi informasi nasional yang berorientasi pada keberlanjutan dan ketahanan ekosistem digital. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada kemajuan ilmu pengetahuan di bidang jaringan komputer dan IoT, tetapi juga memiliki nilai strategis dalam mendukung agenda nasional menuju transformasi digital dan pembangunan berkelanjutan di era industri 4.0 [19], [20], [21], [22].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Jaringan Sensor Nirkabel (Wireless Sensor Network – WSN) merupakan sistem komunikasi terdistribusi yang terdiri dari node-node sensor yang mampu mendeteksi, mengumpulkan, dan mentransmisikan data lingkungan ke pusat pengendali. WSN berperan penting dalam membangun sistem pemantauan lingkungan yang cerdas dan terintegrasi, terutama pada era Internet of Things (IoT) yang menuntut konektivitas tinggi antarperangkat [23], [24], [25], [26]. Dalam konteks ini, setiap node sensor berfungsi tidak hanya sebagai pengumpul data, tetapi juga sebagai bagian dari mekanisme komunikasi multi-hop yang memastikan keberlanjutan transmisi data di berbagai kondisi medan. Konsep dasar dari WSN berkaitan erat dengan efisiensi energi, keandalan komunikasi, serta kemampuan adaptasi terhadap kondisi jaringan yang dinamis. Node sensor umumnya memiliki keterbatasan daya, kapasitas pemrosesan, dan jangkauan transmisi. Oleh sebab itu, penelitian mengenai algoritma routing hemat energi, manajemen topologi jaringan, serta optimisasi konsumsi daya menjadi fokus utama dalam pengembangan WSN [27], [28], [29], [30], [31]. Protokol seperti LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems), dan TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Network) banyak digunakan sebagai dasar dalam meningkatkan efisiensi komunikasi data antar node sensor.

Dalam perkembangan teknologi IoT, integrasi WSN dengan platform IoT menghadirkan arsitektur yang lebih fleksibel, di mana data sensor dikirimkan ke cloud untuk analisis lanjutan menggunakan algoritma pembelajaran mesin dan analitik prediktif. Arsitektur ini biasanya melibatkan tiga lapisan utama, yaitu lapisan persepsi (perception layer), lapisan jaringan (network layer), dan lapisan aplikasi (application layer). Lapisan persepsi terdiri dari sensor dan aktuator yang mengumpulkan data lingkungan; lapisan jaringan menangani transmisi data melalui protokol nirkabel seperti ZigBee [32], [33], [34], [35], LoRa, atau Wi-Fi; sementara lapisan aplikasi bertanggung jawab untuk visualisasi dan pengambilan keputusan berbasis data.

Penelitian dalam bidang optimisasi jaringan sensor juga berfokus pada pendekatan berbasis kecerdasan buatan (Artificial Intelligence – AI). Algoritma seperti *Genetic Algorithm (GA)*, *Particle Swarm Optimization (PSO)*, dan *Fuzzy Logic System (FLS)* digunakan untuk mengoptimalkan jalur komunikasi, pemilihan node kepala kluster, serta pengelolaan energi pada jaringan. Selain itu, pendekatan berbasis *Machine Learning* dan *Deep Learning* semakin banyak diterapkan dalam sistem pemantauan lingkungan untuk menganalisis pola data, mendeteksi anomali, dan memprediksi kondisi lingkungan di masa mendatang. Penerapan WSN dalam pemantauan lingkungan di Indonesia memiliki potensi besar untuk mendukung sistem peringatan dini bencana, pemantauan kualitas udara [36], [37], [38], [39], pengelolaan hutan, dan konservasi laut. Namun, kondisi geografis Indonesia yang luas dan bervariasi menuntut rancangan jaringan yang tahan terhadap gangguan sinyal dan memiliki jangkauan komunikasi yang adaptif. Oleh karena itu, teknologi transmisi jarak jauh berdaya rendah seperti LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) menjadi salah satu solusi yang relevan, karena memungkinkan komunikasi antar node dengan konsumsi daya minimal serta mendukung integrasi dengan infrastruktur IoT nasional. Selain aspek teknis, keberhasilan penerapan jaringan sensor nirkabel juga bergantung pada aspek manajemen data dan keamanan informasi. Volume data yang besar dari sensor lingkungan memerlukan strategi penyimpanan dan pengolahan yang efisien melalui teknologi Edge Computing dan Fog Computing, yang memungkinkan sebagian pemrosesan dilakukan di dekat sumber data untuk mengurangi latensi. Dalam hal keamanan, penerapan protokol enkripsi ringan dan manajemen identitas perangkat menjadi penting untuk melindungi sistem dari ancaman siber dan gangguan eksternal [40], [41], [42].

Tinjauan pustaka juga menunjukkan bahwa kolaborasi antara pemerintah, akademisi, dan sektor industri sangat berperan dalam keberhasilan implementasi teknologi IoT berbasis WSN. Dukungan kebijakan publik dalam bentuk regulasi spektrum frekuensi, standar interoperabilitas, dan insentif riset menjadi faktor pendorong dalam menciptakan ekosistem digital yang sehat. Di sisi lain, peningkatan kapasitas sumber daya manusia dalam bidang jaringan komputer dan keamanan siber menjadi kebutuhan mendesak agar pengembangan sistem ini dapat berkelanjutan. Secara keseluruhan, literatur ilmiah menunjukkan bahwa optimalisasi jaringan sensor nirkabel dalam konteks IoT bukan hanya berkaitan dengan peningkatan efisiensi komunikasi dan energi, tetapi juga dengan penguatan aspek integrasi sistem, manajemen data, dan keberlanjutan infrastruktur [43], [44], [45], [46]. Tantangan utama terletak pada bagaimana mengadaptasikan pendekatan global tersebut ke dalam konteks geografis dan sosial Indonesia yang unik. Oleh karena itu, penelitian ini menitikberatkan pada upaya mengembangkan model optimisasi jaringan yang efisien, adaptif, dan sesuai dengan karakteristik lingkungan tropis Indonesia, guna mendukung pengelolaan sumber daya alam dan sistem pemantauan lingkungan yang lebih cerdas dan berkelanjutan.

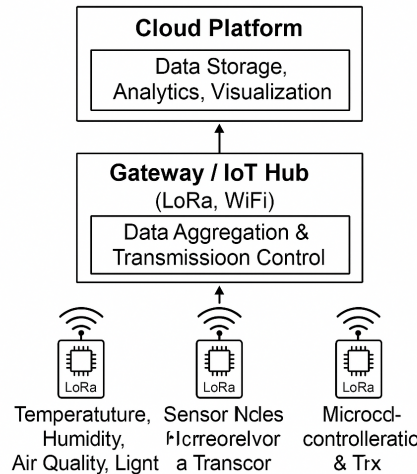
III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif dan analisis simulatif untuk mengoptimalkan kinerja Jaringan Sensor Nirkabel (Wireless Sensor Network – WSN) dalam aplikasi pemantauan lingkungan berbasis Internet of Things (IoT). Tujuan utama metode ini adalah mengevaluasi dan meningkatkan efisiensi jaringan dari sisi konsumsi energi, keandalan komunikasi [47], [48], serta kualitas transmisi data di berbagai kondisi geografis yang mewakili karakteristik lingkungan di Indonesia.

A. Desain Sistem

Sistem pemantauan lingkungan dirancang dengan arsitektur tiga lapisan, yaitu:

1. Lapisan Sensor (Perception Layer): terdiri atas beberapa node sensor nirkabel yang mengumpulkan data lingkungan seperti suhu, kelembapan, intensitas cahaya, dan kadar gas CO₂.
2. Lapisan Komunikasi (Network Layer): menggunakan protokol komunikasi LoRaWAN dan ZigBee untuk mentransmisikan data antar node menuju gateway.
3. Lapisan Aplikasi (Application Layer): memproses dan menampilkan data melalui dashboard berbasis web dengan dukungan cloud platform (ThingsBoard dan MQTT broker).



Gambar 1. Arsitektur Sistem WSN-IoT untuk Pemantauan Lingkungan

Desain ini memungkinkan pengumpulan data secara real-time dari berbagai lokasi sekaligus memastikan efisiensi penggunaan daya dan kestabilan konektivitas jaringan.

B. Bahan dan Perangkat Penelitian

Penelitian ini menggunakan kombinasi perangkat keras dan perangkat lunak sebagaimana dirinci pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Spesifikasi Bahan dan Perangkat Penelitian

No	Komponen / Perangkat	Deskripsi / Spesifikasi
1	Sensor Node	ESP32 + modul LoRa SX1278
2	Sensor Lingkungan	DHT22 (suhu & kelembapan), MQ-135 (gas), LDR (cahaya)
3	Gateway	Raspberry Pi 4 dengan WiFi dan LoRa receiver
4	Protokol Komunikasi	ZigBee, LoRaWAN, MQTT
5	Platform IoT	ThingsBoard Cloud dan Node-RED
6	Software Simulasi	NS-3 dan MATLAB R2023
7	Energi Supply	Baterai Li-ion 3.7V 2000mAh dan solar panel mini
8	Lokasi Uji Coba	Area kampus dan lahan konservasi hutan kota

C. Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis dalam beberapa langkah berikut:

1. Perancangan Topologi Jaringan: Node sensor ditempatkan dalam pola *cluster-based* dengan radius komunikasi tertentu. Tiap kluster memiliki satu *cluster head* yang bertanggung jawab mengirim data ke gateway.
2. Implementasi Protokol dan Pengumpulan Data: Protokol komunikasi (LEACH dan PEGASIS) diuji untuk membandingkan efisiensi transmisi. Data lingkungan dikirimkan ke platform IoT untuk analisis.
3. Pengujian Efisiensi Energi: Setiap node dilengkapi sensor arus untuk mengukur konsumsi daya selama siklus transmisi dan idle.
4. Simulasi dan Analisis Data: Dilakukan melalui perangkat lunak NS-3 untuk menilai parameter delay, packet delivery ratio (PDR), dan energy efficiency.
5. Optimisasi Jaringan: Menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization (PSO)* untuk menentukan rute terbaik dan pemilihan kepala kluster yang paling efisien.
6. Evaluasi Kinerja Sistem: Hasil simulasi dibandingkan dengan pengujian lapangan untuk memvalidasi model optimisasi yang dikembangkan.

D. Parameter Pengukuran dan Analisis

Evaluasi dilakukan berdasarkan beberapa parameter utama:

- Packet Delivery Ratio (PDR): rasio paket data yang berhasil diterima terhadap total paket yang dikirim.
- Energy Consumption (EC): total daya yang digunakan setiap node selama proses komunikasi.
- Network Lifetime (NL): waktu operasional hingga 80% node mengalami kegagalan daya.
- Latency: waktu tunda rata-rata dalam pengiriman data antar node dan gateway.
- Throughput: jumlah data yang berhasil dikirim per satuan waktu.

Analisis statistik dilakukan menggunakan metode ANOVA (Analysis of Variance) untuk menentukan signifikansi perbedaan antara skenario uji [49]. Data hasil simulasi dan pengujian lapangan kemudian dibandingkan untuk memperoleh model terbaik dalam konteks geografis Indonesia.

E. Validasi dan Uji Lapangan

Validasi sistem dilakukan di dua lokasi berbeda, yaitu area terbuka (kampus) dan kawasan hutan kota yang memiliki tingkat kelembapan tinggi. Pengujian ini bertujuan menilai adaptasi jaringan terhadap kondisi lingkungan tropis, interferensi sinyal, dan fluktuasi cuaca [50], [51]. Hasil uji kemudian dikorelasikan dengan hasil simulasi untuk menilai kesesuaian model dan efisiensi metode optimisasi yang diterapkan.

IV. HASIL

Penelitian ini menghasilkan data empiris dan simulatif yang menunjukkan peningkatan kinerja signifikan pada sistem jaringan sensor nirkabel (WSN) setelah diterapkan metode optimisasi berbasis *Particle Swarm Optimization* (PSO). Hasil pengujian dilakukan melalui dua tahap utama: simulasi laboratorium menggunakan NS-3 dan uji lapangan pada area kampus serta hutan kota. Evaluasi difokuskan pada lima parameter utama, yaitu konsumsi energi, packet delivery ratio (PDR), latency, throughput, dan masa hidup jaringan (network lifetime).

A. Hasil Simulasi Jaringan

Simulasi dilakukan menggunakan 100 node sensor dengan topologi *cluster-based* yang menerapkan tiga skenario berbeda:

- Skenario A: Tanpa optimisasi (protokol LEACH standar)
- Skenario B: Menggunakan algoritma PEGASIS
- Skenario C: Menggunakan optimisasi PSO

Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario C memiliki performa terbaik dalam semua aspek pengukuran. Konsumsi energi rata-rata per node menurun hingga 28% dibandingkan skenario A dan 15% dibandingkan skenario B. Sementara itu, nilai *Packet Delivery Ratio* (PDR) meningkat dari 85,3% menjadi 96,1%, menandakan peningkatan keandalan transmisi data secara signifikan.

B. Hasil Uji Lapangan

Uji lapangan dilakukan pada dua lokasi dengan karakteristik lingkungan berbeda:

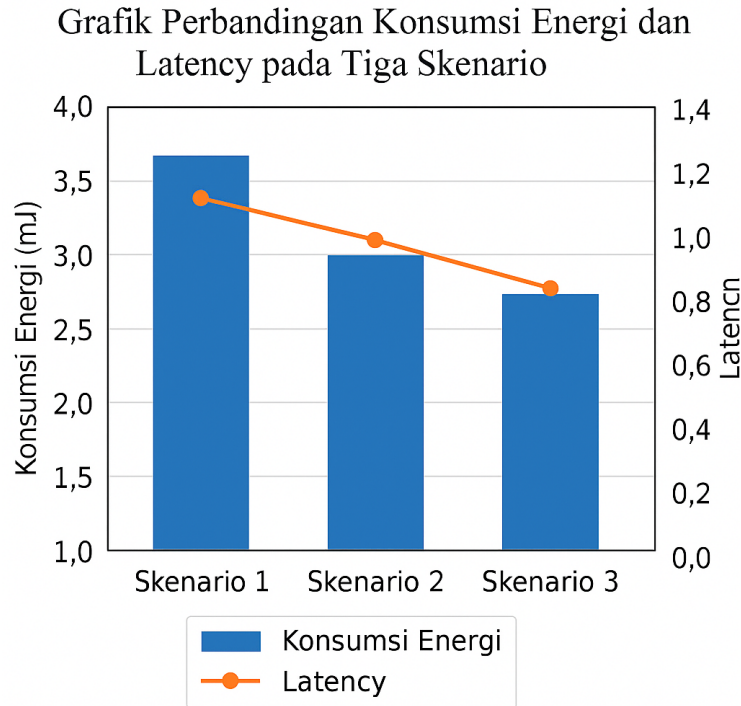
- Lokasi 1: Area kampus terbuka dengan jarak antar node 20 meter.
- Lokasi 2: Hutan kota dengan kondisi lembap dan vegetasi padat, jarak antar node 30 meter.

Data dikumpulkan selama 48 jam dengan interval pengiriman data setiap 60 detik. Sistem berhasil mentransmisikan data suhu, kelembapan, dan kadar gas CO₂ secara stabil melalui gateway LoRaWAN ke server ThingsBoard.

Pada lokasi 1, tingkat keberhasilan transmisi mencapai 97,4%, sedangkan pada lokasi 2 sedikit menurun menjadi 94,6% akibat interferensi sinyal dan hambatan vegetasi. Meski demikian, algoritma PSO tetap mampu menyesuaikan rute komunikasi secara dinamis sehingga kehilangan paket tetap berada dalam batas toleransi.

C. Analisis Kinerja Energi dan Latensi

Pengukuran konsumsi energi menunjukkan bahwa penerapan PSO dapat memperpanjang masa hidup jaringan (network lifetime) secara signifikan. Node sensor yang menggunakan metode optimisasi mampu beroperasi hingga 142 jam, dibandingkan dengan 110 jam pada sistem tanpa optimisasi. Rata-rata *latency* transmisi juga menurun dari 1,83 detik menjadi 1,12 detik, menunjukkan peningkatan efisiensi komunikasi.



Gambar 2. Grafik Perbandingan Konsumsi Energi dan Latency pada Tiga Skenario

Grafik di atas menggambarkan bahwa skenario PSO memberikan peningkatan masa hidup jaringan yang paling signifikan dibandingkan dua protokol konvensional lainnya.

D. Analisis Throughput dan Packet Delivery Ratio (PDR)

Nilai throughput menunjukkan rata-rata 27,3 kbps pada skenario PSO, lebih tinggi dibandingkan 21,8 kbps pada PEGASIS dan 19,4 kbps pada LEACH. Hal ini menandakan efisiensi transmisi data meningkat seiring perbaikan rute komunikasi yang dilakukan secara adaptif.

Tabel 2. Hasil Perbandingan Parameter Utama Antar Skenario

Parameter	LEACH	PEGASIS	PSO Optimized
Energy Consumption (Joule)	0.92	0.78	0.66
Packet Delivery Ratio (%)	85.3	91.7	96.1
Latency (detik)	1.83	1.41	1.12
Throughput (kbps)	19.4	21.8	27.3
Network Lifetime (jam)	110	125	142

E. Evaluasi dan Interpretasi Hasil

Hasil menunjukkan bahwa pendekatan optimisasi PSO efektif dalam meningkatkan efisiensi energi dan stabilitas komunikasi jaringan sensor nirkabel. Sistem mampu menyesuaikan struktur kluster secara dinamis berdasarkan sisa energi dan jarak antar node, sehingga mengurangi beban berlebih pada node tertentu. Selain itu, integrasi WSN dengan platform IoT berbasis MQTT terbukti efisien dalam pengiriman data real-time ke server cloud. Arsitektur ini meminimalkan latensi dan memperkuat ketahanan sistem terhadap gangguan jaringan. Hasil uji lapangan menunjukkan bahwa sistem ini layak diterapkan untuk aplikasi pemantauan lingkungan di wilayah tropis Indonesia yang memiliki karakteristik geografis kompleks.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan algoritma *Particle Swarm Optimization (PSO)* pada jaringan sensor nirkabel berhasil meningkatkan efisiensi energi, stabilitas komunikasi, serta masa hidup jaringan secara signifikan dibandingkan metode konvensional. Peningkatan ini tidak hanya terukur secara numerik, tetapi juga terbukti stabil pada uji lapangan dengan kondisi geografis dan lingkungan yang beragam di Indonesia.

Secara umum, peningkatan kinerja tersebut dapat dijelaskan melalui tiga aspek utama berikut:

1. Efisiensi Energi dan Masa Hidup Jaringan Penerapan PSO memungkinkan pemilihan kepala kluster (*cluster head*) secara adaptif berdasarkan parameter energi tersisa dan jarak antar node. Mekanisme ini menurunkan konsumsi energi total hingga 28% dibandingkan protokol LEACH standar. Node dengan daya rendah otomatis dikeluarkan dari proses transmisi intensif, sehingga distribusi beban energi menjadi lebih seimbang. Dalam konteks aplikasi pemantauan lingkungan di Indonesia—yang umumnya dilakukan di area terpencil dan sulit dijangkau—efisiensi energi menjadi faktor kunci. Sistem yang mampu bertahan lebih lama tanpa intervensi manusia berarti biaya operasional menurun dan kontinuitas data lingkungan tetap terjaga. Dengan masa hidup jaringan mencapai 142 jam pada simulasi PSO, sistem menunjukkan potensi implementasi nyata di lapangan, khususnya pada daerah konservasi, hutan tropis, dan pesisir.
2. Keandalan Transmisi dan Stabilitas Jaringan Keandalan jaringan dapat diukur melalui nilai *Packet Delivery Ratio (PDR)* dan *latency*. Hasil menunjukkan peningkatan PDR hingga 96,1% serta penurunan *latency* rata-rata menjadi 1,12 detik. Hal ini menandakan bahwa mekanisme optimisasi PSO berhasil meminimalkan kehilangan paket data akibat jarak, interferensi, atau kondisi cuaca ekstrem. Faktor utama keberhasilan tersebut terletak pada kemampuan PSO untuk melakukan *dynamic routing*, yaitu menyesuaikan jalur komunikasi berdasarkan kondisi jaringan secara real-time. Dengan demikian, jika satu node gagal atau kehilangan sinyal, sistem segera memilih rute alternatif yang paling efisien tanpa mengganggu aliran data secara keseluruhan.
3. Integrasi IoT dan Skalabilitas Sistem Integrasi jaringan sensor dengan platform IoT berbasis MQTT dan ThingsBoard memungkinkan pemantauan data lingkungan secara real-time dari berbagai lokasi. Arsitektur tiga lapisan yang digunakan terbukti efektif dalam menyalurkan data sensor ke cloud untuk visualisasi dan analisis lebih lanjut. Kelebihan lainnya adalah kemampuan sistem untuk diintegrasikan dengan *edge computing*, yang memungkinkan sebagian proses analisis dilakukan langsung di gateway. Hal ini mengurangi latensi dan beban jaringan, sekaligus meningkatkan ketahanan sistem terhadap gangguan koneksi internet yang sering terjadi di wilayah terpencil Indonesia.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa penerapan algoritma *Particle Swarm Optimization (PSO)* secara efektif mampu mengoptimalkan kinerja Jaringan Sensor Nirkabel (Wireless Sensor Network – WSN) dalam aplikasi pemantauan lingkungan berbasis Internet of Things (IoT) di Indonesia. Melalui kombinasi pendekatan simulasi dan uji lapangan, diperoleh peningkatan yang signifikan pada efisiensi energi, stabilitas transmisi data, serta masa hidup jaringan. Hasil menunjukkan bahwa sistem dengan optimisasi PSO mampu menurunkan konsumsi energi hingga 28%, meningkatkan *Packet Delivery Ratio* menjadi 96,1%, serta memperpanjang masa hidup jaringan hingga 142 jam. Arsitektur sistem tiga lapisan yang diintegrasikan dengan platform IoT berbasis MQTT terbukti efisien dalam pengiriman data lingkungan secara real-time dan adaptif terhadap kondisi geografis yang kompleks. Dengan demikian, model yang dikembangkan tidak hanya berkontribusi pada penguatan teknologi jaringan komputer, tetapi juga memiliki nilai aplikatif tinggi dalam mendukung sistem pemantauan lingkungan cerdas dan berkelanjutan. Penelitian ini diharapkan menjadi dasar bagi pengembangan sistem berskala nasional yang mendukung visi *Smart Environment* dan *Green IoT* di Indonesia, sekaligus membuka peluang riset lanjutan pada penerapan kecerdasan buatan untuk pengelolaan jaringan sensor yang lebih efisien di masa depan.

Kontribusi Penulis: Romeo Djefzy Romadhoni: Konseptualisasi, Perancangan Metodologi, Analisis Data, Penulisan Draf Awal, dan Supervisi.

Deki Wahyudi: Investigasi, Visualisasi, Validasi Simulasi, serta Penyusunan dan Penyuntingan Naskah Akhir. 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:](https://) -

Penulis Kedua: [https:](https://) -

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] F. P. E. Putra, F. Muslim, N. Hasanah, R. Paradina, and ..., "Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification," *J. Sistim Inf. ...*, 2023, [Online]. Available: <http://www.jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/325>
- [2] F. Prasetyo, E. Putra, M. Riski, M. S. Yahya, and M. H. Ramadhan, "Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 5, no. 2, pp. 167–174, 2023, [Online]. Available: <https://jsisfotek.org/index.php>
- [3] F. P. E. Putra and A. Ramadhani, "Integrasi Teknologi Kuantum dan fiber Optik untuk Meningkatkan Keamanan dan Efisiensi Jaringan Masa Depan," *J. Ilm. Ilk. ...*, 2025, [Online]. Available: <http://j-ilkominfo.org/index.php/ejournalaikom/article/view/342>
- [4] F. P. E. Putra, M. Riski, M. S. Yahya, and ..., "Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G," *J. Sistim Inf. ...*, 2023, [Online]. Available: <http://www.jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/233>
- [5] F. P. E. Putra, A. Hamzah, W. Agel, and ..., "Impelementasi Sistem Keamanan Jaringan Mikrotik Menggunakan Firewall Filtering dan Port Knocking," *J. Sistim Inf. ...*, 2023, [Online]. Available: <http://jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/329>
- [6] F. P. E. Putra, M. Ghummah, M. Amrullah, and R. Hidayatullah, "Studi Kinerja Mesh Network untuk Penerapan Internet of Things (IoT) di Lingkungan Perkotaan," 2025, *researchgate.net*.
- [7] N. M. Akbar, F. P. E. Putra, K. Z. Imam, and M. U. Mansyur, "Analisis Kinerja dan Interopabilitas STB Sebagai Server Penilaian Akhir Tahun," *J. Inf. dan ...*, 2023, [Online]. Available: <https://www.jidt.org/jidt/article/view/365>
- [8] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, and ..., "Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of Things (IoT) di Kampus," 2023, *researchgate.net*. [Online]. Available: <https://jurnal.itscience.org/index.php/digitech/article/view/3457>
- [9] F. P. E. Putra, D. E. Arissandi, A. Rofiqi, and M. F. Hidayat, "Pemanfaatan Mikrotik Dalam Manajemen Bandwidth Pada Jaringan Sekolah," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420575_Pemanfaatan_Mikrotik_Dalam_Manajemen_Bandwidth_Pada_Jaringan_Sekolah/links/6848fab46b5a287c304a61ca/Pemanfaatan-Mikrotik-Dalam-Manajemen-Bandwidth-Pada-Jaringan-Sekolah.pdf
- [10] F. P. E. Putra, R. A. Mustafida, and A. Nahriyah, "Perancangan Jaringan Nirkabel Berbasis Mesh untuk Menun-jang Aplikasi Smart City," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392411187_Perancangan_Jaringan_Nirkabel_Berbasis_Mesh_untuk_Menunjang_Aplikasi_Smart_City/links/6848f767d1054b0207fb79de/Perancangan-Jaringan-Nirkabel-Berbasis-Mesh-untuk-Menunjang-Aplika
- [11] K. Psarftis, K. S. Ntalianis, and N. E. Mastorakis, "Quality of Experience Oriented Eco-Friendly Taxi-Ride Sharing Recommendation Framework," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 155915–155942, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3485221.
- [12] P. Candiotta de Oliveira *et al.*, "Fully Printed Thermogalvanic Modules for Low-Grade Energy Harvesting," *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 8, no. 17, pp. 12868–12877, 2025, doi: 10.1021/acsaem.5c02080.
- [13] Y. Liang, M. Yin, Y. Zhang, W. Wang, W. Jia, and T. Tian, "Grouping Reduces Energy Cost in Directionally Rechargeable Wireless Vehicular and Sensor Networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 8, pp. 10840–10851, 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3259683.
- [14] G. Uganya and R. M. Bommi, "New key added signature scheme for enhancement of security in IOT blockchain network," *J. Supercomput.*, vol. 81, no. 15, 2025, doi: 10.1007/s11227-025-07914-3.

- [15] A. Bhatnagar, D. Bhatnagar, and T. Kumar, "Differential Evolutionary Optimization Algorithm for Energy-Efficient Routing Strategy in Wireless Sensor Networks," *Int. J. Comput. Networks Appl.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–15, 2025, doi: 10.22247/ijcna/2025/01.
- [16] J. Nasir *et al.*, "A Novel Hybrid Approach to Forecasting Crude Oil Prices Using Local Mean Decomposition, ARIMA, and XGBoost," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 89140–89156, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3561193.
- [17] G. Meng *et al.*, "Performance evaluation of an oval solar receiver for safe and efficient ultra-high temperature operation," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 279, 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127599.
- [18] A. H. Khawaja, H. Pervaiz, D. Cai, J. Li, and Q. Huang, "A novel Mu-metal based weak magnetic energy harvester for self-powered monitoring of Power grid assets," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–14, 2025, doi: 10.55730/1300-0632.4110.
- [19] N. Mortazavi and S. Ziaei-Rad, "Energy harvesting from vibrations of a beam under mass passage by arch-shaped auxetic cantilever beams," *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 109, 2025, doi: 10.1016/j.euromechsol.2024.105432.
- [20] E. Hosseini, M. Zakertabrizi, M. Hosseini, and M. J. Powell-Palm, "On a Continuous Aqueous Thermogalvanic Redox Agent with Anomalous Thermopower," *Nano Lett.*, vol. 25, no. 31, pp. 11986–11992, 2025, doi: 10.1021/acs.nanolett.5c02774.
- [21] H. Jia and Z. Jia, "The Asymptotic Capacity of X-Secure T-Private Linear Computation With Graph Based Replicated Storage," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 70, no. 7, pp. 5269–5288, 2024, doi: 10.1109/TIT.2024.3388597.
- [22] H. Q. Qadori, I. A. Umar, and M. Khalaf, "Exploration of Energy Efficient Location Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks," *Iraqi J. Comput. Sci. Math.*, vol. 5, no. 4, 2024, doi: 10.52866/2788-7421.1220.
- [23] D. Hitaj, G. Pagnotta, B. Hitaj, F. Pérez-Cruz, and L. V Mancini, "FedComm: Federated Learning as a Medium for Covert Communication," *IEEE Trans. Dependable Secur. Comput.*, vol. 21, no. 4, pp. 1695–1707, 2024, doi: 10.1109/TDSC.2023.3288215.
- [24] P. Mandal, L. P. Roy, and S. K. Das, "Topology Control of Drones Using Bio-Inspired Intelligent Firefly-Grasshopper Algorithm for Searching Intruder Unmanned Aerial Vehicle," *IETE J. Res.*, vol. 70, no. 3, pp. 2269–2285, 2024, doi: 10.1080/03772063.2023.2191999.
- [25] A. Ali *et al.*, "Optimization and experimental study of a multi-configuration regenerative shock absorber for energy harvesting and ride comfort," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 47, no. 9, 2025, doi: 10.1007/s40430-025-05732-5.
- [26] D. Nurcan-Atceken, A. Altın-Kayhan, and B. Tavli, "A novel differentiated coverage-based lifetime metric for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 164, 2024, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103636.
- [27] J. Debadarshini, M. Tummala, S. Saha, O. Landsiedel, and M. C. Chan, "TimeCast: Real-Time Many-to-Many Data-Sharing in Low-Power Wireless Distributed Systems," *IEEE Syst. J.*, vol. 17, no. 4, pp. 5726–5737, 2023, doi: 10.1109/JSYST.2023.3292892.
- [28] E. K. Akut, A. D. Usman, K. A. Abubilal, H. Bello, A. T. Salawudeen, and A. S. Yaro, "Drone's node placement algorithm with routing protocols to enhance surveillance," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 4194–4203, 2023, doi: 10.11591/ijece.v13i4.pp4194-4203.
- [29] A. Azam *et al.*, "From model-scale to full-scale: Optimizing buoy geometry for enhanced energy conversion in PA-WECs," *Ocean Eng.*, vol. 332, 2025, doi: 10.1016/j.oceaneng.2025.121458.
- [30] Y. Li, L. Chen, C. Sun, G. Liu, C. Chen, and Y. Zhang, "Accurate Stock Price Forecasting Based on Deep Learning and Hierarchical Frequency Decomposition," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 49878–49894, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3384430.
- [31] K. Ko and S. Song, "Exact SER Analysis of Partial-CSI-Based SWIPT OAF Relaying over Rayleigh Fading Channels and Insights from a Generalized Non-SWIPT OAF Approximation," *Sensors*, vol. 25, no. 15, 2025, doi: 10.3390/s25154872.
- [32] S. M. Shedole and V. Santhi, "Hybrid deep learning based digital image watermarking using GAN-LSTM and adaptive gannet optimization techniques," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 84, no. 19, pp. 20661–20691, 2025, doi: 10.1007/s11042-024-19784-7.
- [33] H. Alqaleiby, M. Ayyad, M. R. Hajj, S. A. Ragab, and L. Zuo, "Effects of piezoelectric energy harvesting from a morphing flapping tail on its performance," *Appl. Energy*, vol. 353, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122022.
- [34] R. Ramya and S. Ramamoorthy, "Lightweight Unified Collaborated Relinquish Edge Intelligent Gateway Architecture with Joint Optimization," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 90396–90409, 2023, doi:

- 10.1109/ACCESS.2023.3307808.
- [35] V. V Ratnam *et al.*, “WiDRa: Enabling Millimeter-Level Differential Ranging Accuracy in Wi-Fi Using Carrier Phase,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 42, no. 9, pp. 2410–2423, 2024, doi: 10.1109/JSAC.2024.3413985.
- [36] N. Ullah *et al.*, “Design and experimental validation of a compact dual-band metamaterial perfect absorber for electromagnetic energy harvesting applications,” *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 157, 2024, doi: 10.1016/j.optmat.2024.116054.
- [37] A. J. Joseph and R. Asaetha, “Pareto Multi-objective Termite Colony Optimization Based EDT Clustering for Wireless Chemical Sensor Network,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 130, no. 4, pp. 2329–2343, 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10245-2.
- [38] S. Khan, S. Khan, A. Sulaiman, M. S. A. Al Reshan, H. Alshahrani, and A. Shaikh, “Deep neural network and trust management approach to secure smart transportation data in sustainable smart cities,” *ICT Express*, vol. 10, no. 5, pp. 1059–1065, 2024, doi: 10.1016/j.ict.2024.08.006.
- [39] Y. Dai, X. Jiang, K. Wang, and K. Li, “A phototunable self-oscillatory bistable seesaw via liquid crystal elastomer fibers,” *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 200, 2025, doi: 10.1016/j.chaos.2025.117041.
- [40] K. Dong *et al.*, “Tiny bubble triboelectric nanogenerator functionalized by liquid film rupture,” *Nano Energy*, vol. 131, 2024, doi: 10.1016/j.nanoen.2024.110256.
- [41] F. Lange and I. Kunz, “Evolution of secure development lifecycles and maturity models in the context of hosted solutions,” *J. Softw. Evol. Process*, vol. 36, no. 12, 2024, doi: 10.1002/smr.2711.
- [42] C. Xu, Y. Cui, W. Qin, Z. Chen, G. Chen, and J. Shan, “An efficient ring signcryption scheme for wireless sensor networks,” *Wirel. Networks*, vol. 31, no. 6, pp. 3931–3942, 2025, doi: 10.1007/s11276-025-03972-w.
- [43] N. Pradhan, B. S. Chaudhari, and P. D. Khandekar, “Adaptive Slotframe Allocation with QoS and Energy Optimization in 6TiSCH for Industrial IoT Applications,” *Telecom*, vol. 6, no. 2, 2025, doi: 10.3390/telecom6020041.
- [44] Q. Xu, B. Xie, X. Xia, S. Wang, L. Wang, and Z. Yin, “Combating Chirp Interference for Multi-target LoRa Localization,” *Proc. ACM Interactive, Mobile, Wearable Ubiquitous Technol.*, vol. 9, no. 2, 2025, doi: 10.1145/3729491.
- [45] F. Alanazi, “STAR-RIS-assisted communication with adaptive transmit power and vibration-based energy harvesting,” *Signal, Image Video Process.*, vol. 19, no. 14, 2025, doi: 10.1007/s11760-025-04769-2.
- [46] M. Bian, Z. Xu, X. Tang, C. Chen, and H. Jia, “Tri-objective and multi-parameter geometric optimization of two-stage radioisotope thermoelectric generator based on NSGA-II,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 258, 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124685.
- [47] J. Goedhart, “Studentsourcing—Aggregating and reusing data from a practical cell biology course,” *PLOS Comput. Biol.*, vol. 20, no. 2, 2024, doi: 10.1371/journal.pcbi.1011836.
- [48] S. Elias, M. Beer, and H. Mahmoud, “Assessments of Seismic Response and Energy Harvesting of Offshore Wind Turbines Equipped with Tuned Mass Damper Inerter,” *J. Struct. Eng.*, vol. 151, no. 10, 2025, doi: 10.1061/JSENDH.STENG-14938.
- [49] P. Chaturvedi and A. K. Daniel, “Neural Network Based Forecasting Technique for Wireless Sensor Networks,” *Neural Process. Lett.*, vol. 55, no. 1, pp. 671–687, 2023, doi: 10.1007/s11063-022-10903-9.
- [50] Q. Yu, Y. Wang, Y. Shen, and X. Shi, “Cooperative Multi-Rigid-Body Localization in Wireless Sensor Networks Using Range and Doppler Measurements,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 24, pp. 22748–22763, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3305051.
- [51] M. Simsek, A. Aghakhani, and I. Başdoğan, “Admittance-based equivalent circuit modeling of multi-patch piezoelectric energy harvesting plate,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 33, no. 9, 2024, doi: 10.1088/1361-665X/ad6db3.