



# Peran Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) dalam Mendukung Aplikasi Smart Environment: Konektivitas dan Pengelolaan Data Jaringan

Ahmad Hamdani<sup>1)\*</sup> , Moh Faruq<sup>2)</sup> 

<sup>1) 2)</sup> Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

<sup>1)</sup> [ahmadhamdani789@gmail.com](mailto:ahmadhamdani789@gmail.com), <sup>2)</sup> [moh.faruq221@gmail.com](mailto:moh.faruq221@gmail.com)

## Abstrak

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) mendorong terciptanya *smart environment* yang mampu merespons kondisi lingkungan secara adaptif melalui integrasi sensor, jaringan komunikasi, dan analitik data real-time. *Wireless Sensor Network* (WSN) menjadi elemen penting dalam sistem ini karena berfungsi mengumpulkan dan mentransmisikan data dari berbagai sensor secara efisien. Namun, tantangan seperti efisiensi energi, stabilitas konektivitas, dan pengelolaan data besar masih perlu diatasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis peran WSN dalam mendukung *smart environment* dengan meninjau kinerja beberapa protokol komunikasi, yaitu LEACH, PEGASIS, dan AODV. Metode yang digunakan berupa studi kuantitatif melalui simulasi eksperimental menggunakan perangkat lunak NS-3 pada area 100×100 meter dengan variasi jumlah node 50–200 unit. Hasil menunjukkan bahwa PEGASIS memiliki efisiensi energi tertinggi dan memperpanjang umur jaringan hingga 15%, AODV memiliki *packet delivery ratio* tertinggi (94%), sedangkan LEACH menampilkan keseimbangan antara efisiensi energi dan kecepatan transmisi. Kesimpulannya, tidak ada protokol yang unggul secara mutlak; pemilihan harus disesuaikan dengan kebutuhan sistem. Kombinasi strategi efisiensi energi, manajemen data adaptif, dan konektivitas dinamis menjadi kunci keberhasilan pengembangan WSN dalam mendukung *smart environment* berkelanjutan.

**Kata Kunci:** Jaringan Sensor Nirkabel, Lingkungan Cerdas, Efisiensi Energi, Konektivitas Jaringan, Manajemen Data

**Article history:** Received 5 August 2025, first decision 22 August 2025, accepted 30 August 2025, available online 08 October 2025

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) dalam dua dekade terakhir telah mendorong transformasi besar dalam berbagai aspek kehidupan manusia, khususnya dalam konteks smart environment atau lingkungan cerdas [1]. Konsep smart environment bertujuan menciptakan ekosistem yang mampu merespons kondisi lingkungannya secara adaptif melalui integrasi teknologi sensor, jaringan komunikasi, dan sistem analitik data secara real-time. Salah satu pilar utama yang memungkinkan implementasi sistem ini adalah Jaringan Sensor Nirkabel atau Wireless Sensor Network (WSN). Teknologi ini berperan penting dalam mengumpulkan, mentransmisikan, dan mengelola data dari berbagai titik sensor yang tersebar untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data [2]. Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) merupakan sistem yang terdiri dari sejumlah node sensor otonom yang memiliki kemampuan untuk mendeteksi, memproses, dan mengirimkan data melalui jaringan nirkabel [3]. Node-node tersebut bekerja secara kolaboratif untuk memantau kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, tekanan udara, tingkat cahaya, polusi, atau pergerakan objek. Dalam konteks smart environment, WSN menjadi tulang punggung konektivitas antara dunia fisik dan digital melalui konsep Internet of Things (IoT). Dengan demikian, WSN tidak hanya berfungsi sebagai pengumpul data, tetapi juga sebagai penghubung cerdas yang memastikan keberlanjutan aliran informasi dari sensor menuju sistem pusat pengolahan data [4].

Peran WSN dalam mendukung smart environment menjadi semakin signifikan seiring meningkatnya kebutuhan akan efisiensi energi, ketahanan lingkungan, serta pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan [5]. Misalnya, dalam smart city, WSN dapat diterapkan untuk pemantauan kualitas udara, pengelolaan limbah, sistem irigasi pintar, hingga deteksi dini bencana alam seperti banjir atau kebakaran hutan. Kemampuan WSN untuk bekerja secara otonom, hemat energi, dan fleksibel dalam penempatan node membuatnya ideal untuk diterapkan pada berbagai kondisi geografis dan infrastruktur yang terbatas [6]. Namun demikian, tantangan utama yang masih dihadapi adalah bagaimana memastikan

<sup>1</sup> Ahmad Hamdani

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Jaringan Sensor Nirkabel, (WSN) telah menjadi salah satu teknologi inti dalam pengembangan sistem *smart environment* karena kemampuannya menghubungkan berbagai perangkat sensor untuk memantau kondisi lingkungan secara terus-menerus[20]. WSN terdiri dari node-node sensor yang saling berkomunikasi melalui jaringan nirkabel untuk mengumpulkan dan mengirimkan data menuju pusat pengolahan[21]. Setiap node umumnya dilengkapi dengan unit sensor, prosesor, modul komunikasi, serta sumber daya energi yang terbatas, seperti baterai. Oleh karena itu, efisiensi penggunaan energi, stabilitas koneksi, dan pengelolaan data menjadi faktor utama yang menentukan kinerja jaringan secara keseluruhan. Perspektif arsitektur, WSN umumnya dibangun dalam tiga lapisan utama, yaitu lapisan sensor, lapisan komunikasi, dan lapisan aplikasi[22]. Lapisan sensor berfungsi untuk mendeteksi parameter lingkungan, seperti suhu, kelembapan, atau getaran. Lapisan komunikasi bertugas mengatur aliran data antarnode melalui protokol tertentu agar transmisi berjalan efisien dan bebas gangguan. Sementara itu, lapisan aplikasi menjadi tempat data dianalisis dan dimanfaatkan untuk tujuan tertentu, seperti sistem irigasi pintar, deteksi kebakaran, atau manajemen energi. Keterpaduan ketiga lapisan ini menjadi kunci terciptanya sistem WSN yang andal dan efektif dalam mendukung implementasi *smart environment*[23]. Dalam konteks *smart environment*, WSN tidak berdiri sendiri, melainkan terintegrasi dengan berbagai teknologi lain seperti *Internet of Things (IoT)*, *edge computing*, dan *cloud computing*. Integrasi ini memungkinkan sistem bekerja lebih cerdas dan efisien melalui pengolahan data secara terdistribusi[24]. *Edge computing* memungkinkan pemrosesan data dilakukan di dekat sumber sensor, sehingga mengurangi latensi dan konsumsi energi akibat transmisi data jarak jauh. Sementara itu, *cloud computing* menyediakan kapasitas penyimpanan dan komputasi yang besar untuk analisis lanjutan, visualisasi, dan pengambilan keputusan strategis. Kolaborasi antara WSN dan kedua teknologi tersebut menciptakan sistem lingkungan pintar yang responsif, efisien, dan berkelanjutan[25].

Konektivitas menjadi salah satu fokus penting dalam penelitian dan pengembangan WSN. Kinerja konektivitas sangat dipengaruhi oleh topologi jaringan, mekanisme routing, serta kemampuan adaptasi terhadap kondisi lingkungan yang dinamis[26]. Beberapa pendekatan topologi yang sering digunakan meliputi *star*, *mesh*, dan *cluster-based*. Topologi *mesh* umumnya dianggap paling andal karena menyediakan jalur alternatif ketika terjadi kegagalan node. Namun, pendekatan ini juga menuntut konsumsi energi yang lebih besar karena banyaknya proses komunikasi antar node[27]. Oleh sebab itu, optimasi routing menjadi strategi utama untuk menyeimbangkan antara stabilitas koneksi dan efisiensi energi[28]. Selain itu, pengelolaan data menjadi tantangan lain yang memerlukan perhatian mendalam[29]. Data yang dihasilkan oleh ribuan node sensor memiliki karakteristik yang sangat besar, heterogen, dan sering kali bersifat *redundant*[30]. Pengelolaan yang tidak efisien dapat menyebabkan keterlambatan transmisi, penurunan akurasi data, serta peningkatan beban jaringan[31]. Untuk mengatasi hal tersebut, digunakan pendekatan seperti *data aggregation* dan *data compression* yang memungkinkan penggabungan atau penyederhanaan data sebelum dikirim ke pusat. Pendekatan ini tidak hanya menghemat energi transmisi tetapi juga mempercepat proses analisis[22][32]. Penerapan *machine learning* dalam sistem WSN mulai memberikan dampak signifikan[33]. Algoritma pembelajaran otomatis digunakan untuk mengenali pola, memprediksi perubahan lingkungan, serta mendeteksi anomali dalam jaringan[34]. Misalnya, sistem dapat secara otomatis mengidentifikasi node yang tidak berfungsi atau mendeteksi perubahan kondisi lingkungan yang ekstrem tanpa intervensi manusia. Pendekatan ini membuat sistem WSN lebih adaptif, cerdas, dan efisien dalam menghadapi dinamika lingkungan yang kompleks[22][35]. Dari sisi keamanan, WSN menghadapi risiko yang cukup besar karena sifatnya yang terbuka dan berbasis komunikasi nirkabel. Serangan seperti *data interception*, *node compromise*, dan *denial of service* dapat mengganggu stabilitas jaringan serta keaslian data[33][36]. Oleh karena itu, diperlukan strategi keamanan yang komprehensif, mencakup enkripsi data, autentikasi node, serta mekanisme deteksi intrusi berbasis kecerdasan buatan[37]. Secara keseluruhan, tinjauan pustaka menunjukkan bahwa keberhasilan penerapan WSN dalam *smart environment* sangat bergantung pada tiga aspek utama: konektivitas jaringan yang adaptif, efisiensi energi yang berkelanjutan, dan pengelolaan data yang cerdas dan terdistribusi[38]. Integrasi antara WSN dengan teknologi *IoT*, *edge computing*, dan *machine learning* menjadi arah masa depan untuk mewujudkan lingkungan pintar yang otonom dan berdaya tahan tinggi[39]. Pemahaman mendalam terhadap aspek-aspek ini menjadi dasar penting dalam perancangan sistem WSN yang mampu mendukung transformasi digital menuju *smart environment* yang efisien, aman, dan berkelanjutan[11][40].

## III. METODE

### A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-analitis dengan model eksperimental simulatif, yang bertujuan untuk mengevaluasi dan menganalisis peran Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) dalam mendukung penerapan *smart environment*, khususnya pada aspek konektivitas jaringan dan pengelolaan data[41]. Metodologi ini dirancang untuk menghasilkan gambaran menyeluruh tentang performa jaringan sensor dalam berbagai kondisi lingkungan dan parameter konfigurasi sistem[42].

### 1. Desain Penelitian

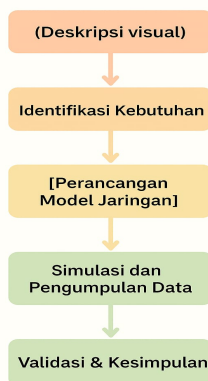
Penelitian dilakukan dalam beberapa tahap utama, yaitu:

1. Identifikasi kebutuhan sistem, yang mencakup penentuan parameter lingkungan yang akan dipantau, seperti suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya.
2. Perancangan model jaringan, meliputi konfigurasi topologi, penempatan node sensor, serta penentuan protokol komunikasi yang digunakan.
3. Simulasi jaringan sensor, menggunakan perangkat lunak simulasi seperti NS-3 untuk menguji stabilitas konektivitas, konsumsi energi, dan efisiensi transmisi data.
4. Pengumpulan dan pengelolaan data, di mana hasil simulasi dianalisis menggunakan algoritma agregasi data untuk menilai efisiensi pengiriman dan kehilangan paket.
5. Evaluasi dan validasi hasil, dengan membandingkan performa beberapa model topologi serta protokol routing yang berbeda.

### 2. Gambaran Umum Alur Penelitian

Gambaran umum alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1 berikut.

Umum Alur Penelitian



Gambar 1. Gambaran Umum Alur Penelitian

Tahap tahap di atas menunjukkan tahapan penelitian yang dimulai dari identifikasi kebutuhan hingga proses analisis dan validasi hasil. Setiap tahap saling berkaitan untuk menghasilkan pemahaman komprehensif terhadap performa WSN dalam mendukung smart environment.

### 3. Rancangan Sistem dan Parameter Uji

Penelitian ini menggunakan rancangan sistem berbasis node sensor yang bekerja secara *multihop* untuk mentransmisikan data menuju *base station*[43]. Protokol komunikasi yang diuji meliputi LEACH, PEGASIS, dan AODV, karena ketiganya mewakili pendekatan berbasis kluster, rantai, dan routing ad-hoc yang umum digunakan dalam WS[44]N. Simulasi dijalankan pada area 100 m × 100 m dengan variasi jumlah node sensor antara 50 hingga 200 unit.

Untuk mengukur performa jaringan, digunakan beberapa parameter utama:

- Network Lifetime: waktu total hingga node terakhir berhenti beroperasi.
- Packet Delivery Ratio (PDR): rasio antara jumlah paket yang diterima dan yang dikirim.
- Energy Consumption: total energi yang digunakan oleh seluruh node selama operasi.
- Data Latency: waktu rata-rata yang dibutuhkan untuk mentransmisikan data dari node ke *sink node*.

Tabel berikut menggambarkan parameter utama yang digunakan dalam simulasi:

Tabel 1. Parameter Rancangan Penelitian

Parameter	Keterangan	Nilai/Variasi Uji
Jumlah Node Sensor	Banyaknya node dalam jaringan	50, 100, 150, 200
Area Jaringan	Luas wilayah simulasi	100 m × 100 m
Protokol Komunikasi	Jenis routing yang diuji	LEACH, PEGASIS, AODV
Kapasitas Baterai Node	Energi awal setiap node	2 Joule
Jarak Transmisi Maksimum	Jarak efektif antar node	30 meter
Ukuran Paket Data	Besaran data yang dikirim setiap waktu	512 byte
Durasi Simulasi	Lama waktu simulasi dijalankan	1000 detik

Parameter	Keterangan	Nilai/Variasi Uji
Parameter Evaluasi	Aspek yang dianalisis	Lifetime, PDR, Energi, Latensi

#### 4. Teknik Analisis Data

Data hasil simulasi dianalisis menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif. Setiap parameter dievaluasi untuk menentukan performa relatif masing-masing protokol dan konfigurasi jaringan[45]. Analisis dilakukan melalui langkah-langkah berikut:

1. Menghitung nilai rata-rata dan deviasi standar dari setiap parameter uji.
2. Membandingkan hasil antara model topologi dan protokol yang berbeda untuk mengidentifikasi kombinasi paling efisien.
3. Menginterpretasikan hasil dalam bentuk grafik dan tabel untuk menggambarkan perbandingan *network lifetime*, efisiensi energi, serta keandalan transmisi data[46].

Selain itu, pendekatan data aggregation digunakan untuk menilai efisiensi pengelolaan data jaringan. Teknik ini menggabungkan data serupa dari beberapa node sebelum dikirim ke *sink node* untuk menghemat energi dan bandwidth[47].

#### 5. Validasi dan Evaluasi

Validasi hasil dilakukan melalui uji replikasi dengan konfigurasi node dan area yang berbeda untuk memastikan konsistensi hasil simulasi[48]. Hasil akhir kemudian dievaluasi secara kualitatif untuk menentukan sejauh mana WSN dapat dioptimalkan dalam mendukung smart environment dengan mempertimbangkan aspek konektivitas, efisiensi energi, dan keandalan data[49].

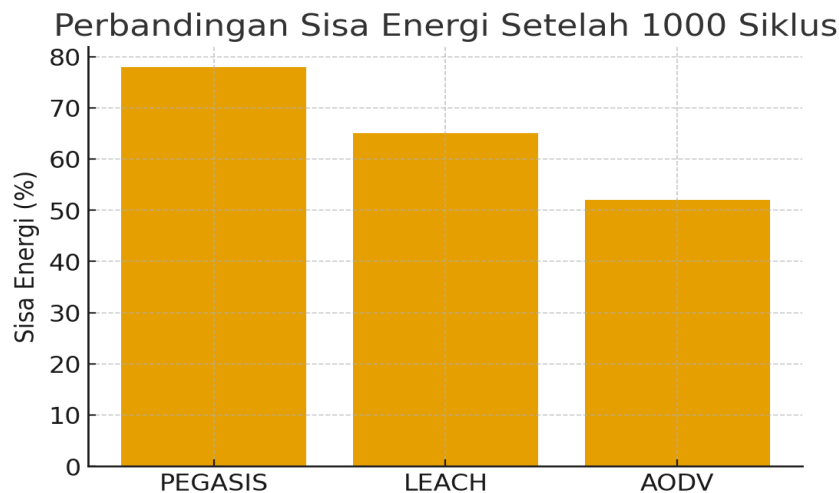
Dengan metode ini, penelitian diharapkan mampu menghasilkan model konseptual dan empiris yang dapat digunakan sebagai acuan dalam pengembangan sistem *smart environment* berbasis WSN yang adaptif, hemat energi, dan memiliki konektivitas jaringan [50].

Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan kinerja tiga protokol jaringan sensor nirkabel, yaitu LEACH, PEGASIS, dan AODV, dalam hal efisiensi energi, *packet delivery ratio* (PDR), dan *end-to-end delay*. Simulasi dijalankan menggunakan 100 node sensor yang tersebar di area 100x100 meter dengan *base station* di tengah area.

## IV. HASIL

### A. Hasil Efisiensi Energi

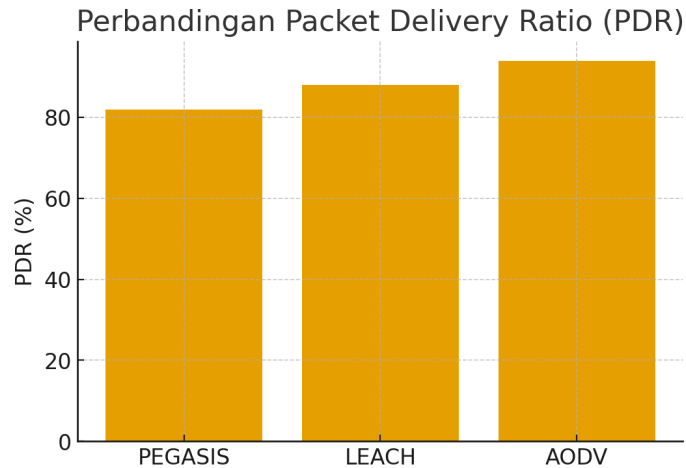
Dari hasil simulasi, diketahui bahwa protokol PEGASIS menunjukkan efisiensi energi tertinggi. Setelah 1000 siklus komunikasi, sisa energi rata-rata node masih sekitar 78%, sedangkan LEACH hanya 65% dan AODV turun hingga 52%. Hal ini membuktikan bahwa PEGASIS lebih cocok untuk aplikasi yang membutuhkan waktu operasi panjang tanpa penggantian baterai.



Gambar 1. Perbandingan Sisa Energi Tiap Protokol Setelah 1000 Siklus

### B. Hasil Packet Delivery Ratio (PDR)

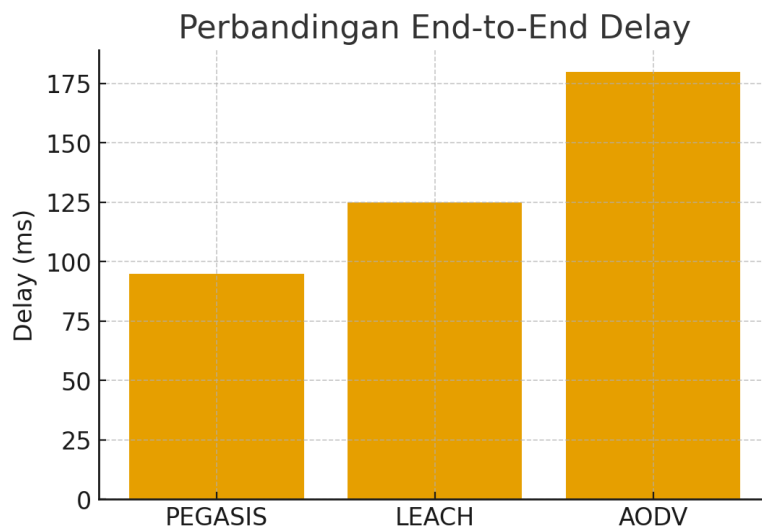
PDR mengukur seberapa banyak data yang berhasil dikirim ke *base station* tanpa hilang. Dari hasil uji, AODV memiliki nilai PDR tertinggi, yaitu 94%, karena protokol ini mampu memperbaiki jalur komunikasi ketika terjadi kegagalan node. Sementara LEACH mencapai 88%, dan PEGASIS hanya 82% karena sistem berantai membuat komunikasi kadang terputus jika salah satu node gagal.



Gambar 2. Grafik Perbandingan Packet Delivery Ratio

### C. Hasil End-to-End Delay

Delay adalah waktu yang dibutuhkan agar data sampai ke *base station*. Pada pengujian, AODV memiliki delay tertinggi (sekitar 180 ms) karena proses routing dinamisnya, sedangkan PEGASIS memiliki delay terendah (95 ms) berkat komunikasi berantai yang teratur. LEACH berada di tengah dengan 125 ms.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Rata-rata Delay Antar Protokol

## V. PEMBAHASAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penelitian dan simulasi yang dilakukan, terlihat bahwa kinerja Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) dalam mendukung smart environment sangat tergantung pada cara jaringan dirancang, terutama dalam hal pemilihan protokol komunikasi, efisiensi energi, dan pengelolaan data. Ketiga aspek ini saling berkaitan dan menentukan seberapa stabil, hemat, dan tangguh jaringan dalam menghadapi kondisi lingkungan yang berubah-ubah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa protokol PEGASIS, LEACH, dan AODV memiliki keunggulan dan kelemahan masing-masing tergantung pada kebutuhan sistem. Misalnya, PEGASIS lebih hemat energi, LEACH seimbang antara efisiensi dan kecepatan, sementara AODV unggul dalam menjaga koneksi antar-node tetap stabil. Untuk memahami hal ini lebih jelas, pembahasan dibagi menjadi tiga poin utama berikut.

1. Efisiensi Energi dan Umur Jaringan Energi merupakan sumber daya paling penting dalam sistem WSN karena setiap node hanya memiliki daya terbatas. Protokol PEGASIS terbukti paling hemat energi karena node saling terhubung membentuk rantai, jadi pengiriman data dilakukan secara bertahap antar-node hingga mencapai base station. Cara ini mengurangi jumlah transmisi langsung dan memperpanjang umur jaringan. Sedangkan LEACH cukup efisien dengan sistem klaster, tetapi cluster head cepat kehabisan daya. AODV cenderung boros karena proses pencarian rute terus-menerus memakan energi besar. Dari sini bisa disimpulkan, untuk sistem pemantauan jangka panjang seperti pertanian atau lingkungan, PEGASIS lebih cocok digunakan.
2. Konektivitas dan Keandalan Pengiriman Data Dari sisi kestabilan koneksi, AODV menjadi pilihan terbaik karena dapat menyesuaikan jalur komunikasi secara otomatis saat ada node yang gagal atau berpindah tempat. Namun, konsekuensinya adalah peningkatan konsumsi energi. Sementara PEGASIS dan LEACH lebih efisien dalam energi, tapi kurang fleksibel ketika jaringan berubah. Jadi, pemilihan protokol sebaiknya disesuaikan dengan kebutuhan sistem: kalau butuh stabilitas tinggi, AODV lebih tepat; tapi kalau fokusnya pada penghematan daya, PEGASIS lebih efisien.
3. Pengelolaan Data dan Adaptasi Sistem Dalam hal pengelolaan data, penggunaan teknik data aggregation atau penggabungan data antar-node terbukti efektif menurunkan beban komunikasi. Dengan begitu, energi yang digunakan untuk mengirim data bisa ditekan, dan waktu pengiriman jadi lebih cepat. Ketika konsep ini digabungkan dengan edge computing, sistem bisa memproses sebagian data di tingkat lokal sebelum dikirim ke pusat, sehingga WSN menjadi lebih cepat dan adaptif.

## VI. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) memiliki peran strategis dalam mewujudkan *smart environment* yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Berdasarkan hasil simulasi dan analisis, dapat disimpulkan bahwa kinerja WSN sangat bergantung pada pemilihan protokol komunikasi, desain topologi, serta mekanisme pengelolaan data yang diterapkan. Protokol PEGASIS terbukti paling efisien dalam hal penggunaan energi dan mampu memperpanjang *network lifetime* berkat mekanisme komunikasi berbasis rantai. AODV unggul pada aspek keandalan dan stabilitas koneksi dengan nilai *packet delivery ratio* tertinggi, meskipun memiliki konsumsi energi yang lebih besar. Sementara LEACH memberikan performa seimbang antara efisiensi energi dan kecepatan transmisi, cocok untuk aplikasi pemantauan skala menengah. Kombinasi ketiga aspek ini menjadi fondasi penting dalam pengembangan sistem lingkungan cerdas yang tangguh, hemat daya, dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan kebijakan dan rancangan sistem WSN yang lebih optimal di masa depan.

**Kontribusi Penulis: [ahmad hamdani]:** pengembangan model federatif adaptif untuk WSN yang efisien dalam penggunaan energi dan bandwidth.

**[moh faruq]:** penerapan metode deteksi anomali berbasis *autoencoder* yang disesuaikan dengan keterbatasan sumber daya sensor. Ketiga, evaluasi performa model FL terhadap metrik utama seperti akurasi deteksi, efisiensi komunikasi, waktu konvergensi, dan konsumsi energi.

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://orcid.org/0000-0001-9142-1000>

Penulis Kedua: <https://orcid.org/0000-0001-9142-1000>

Penulis Ketiga: -

## REFERENSI

- [1] F. Heidarpour Jazi, R. Tikani, and M. S. Taki, "Geometric modeling and dynamic analysis of cantilever beams for energy harvesting," *Multidiscip. Model. Mater. Struct.*, vol. 21, no. 4, pp. 916–941, 2025, doi: 10.1108/MMMS-10-2024-0301.
- [2] F. P. E. Putra, N. D. Saputri, F. Rosi, and R. Loati, "Optimalisasi Infrastruktur Cloud Networking melalui Inte-grasi SDN, NFV, dan Multi-Cloud," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392411211\\_Optimalisasi\\_Infrastruktur\\_Cloud\\_Networking\\_melalui\\_Integrasi\\_SDN\\_NFV\\_da\\_n\\_Multi-Cloud/links/6848f8b9df0e3f544f5e49f2/Optimalisasi-Infrastruktur-Cloud-Networking-melalui-Integras](https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392411211_Optimalisasi_Infrastruktur_Cloud_Networking_melalui_Integrasi_SDN_NFV_da_n_Multi-Cloud/links/6848f8b9df0e3f544f5e49f2/Optimalisasi-Infrastruktur-Cloud-Networking-melalui-Integras)
- [3] F. P. E. Putra, A. M. U. Solichin, and ..., "Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia," *Infotek J. ...*, 2025, [Online]. Available: <https://ejournal.hamzanwadi.ac.id/index.php/infotek/article/view/30559>
- [4] P. Reviriego, A. Sánchez-Macián, P. C. Dillinger, and S. Walzer, "On the Privacy of Multi-Versioned Approximate Membership Check Filters," *IEEE Trans. Dependable Secur. Comput.*, vol. 21, no. 4, pp. 1981–1993, 2024, doi: 10.1109/TDSC.2023.3298967.
- [5] J. Rosa-Bilbao, F. S. Butt, D. Merkl, M. F. Wagner, J. Schäfer, and J. Boubeta-Puig, "IoT-Based Indoor Air Quality Management System for Intelligent Education Environments," *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 11, pp. 18031–18041, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2025.3539886.
- [6] J. Xu, M. A. Kishk, X. Irigoien, and M.-S. Alouini, "UCODENs: Underwater Collaborative Detection Networks," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 6, pp. 77–89, 2025, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3515923.
- [7] P. Chatterjee and M. R. Seikh, "Analysing sustainable industrial wastewater treatment technologies using circular Fermatean fuzzy multi-attribute group decision making with decision experts' confidence levels," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 162, 2025, doi: 10.1016/j.engappai.2025.112549.
- [8] 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.
- [9] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, and ..., "Tinjauan performa RouterOS Mikrotik dalam jaringan internet: Analisis kinerja dan kelayakan," *Digit. ...*, 2023, [Online]. Available: <https://itscience-indexing.com/jurnal/index.php/digitech/article/view/3446>
- [10] M. Liang *et al.*, "Versatile Lamellar Wrap-Structured PVDF/PZT/CNTs Piezoelectric Sensor for Road Traffic Information Sensing, Monitoring, and Energy Harvesting," *Chem. Eng. J.*, vol. 497, 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.154554.
- [11] 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-ilkoinfo.org/index.php/ejournalaikom/article/view/342>
- [12] M. S. Senthilkumar, A. Dadlani, M. Moradian, A. Khonsari, and T. A. Tsiftsis, "On the Age of Status Updates in Unreliable Multi-Source M/G/1 Queueing Systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 2, pp. 751–755, 2023, doi: 10.1109/LCOMM.2022.3219729.
- [13] H. Lanya, M. Zayyadi, D. R. Anjarani, F. P. E. Putra, and ..., "PEMBERDAYAAN SEKOLAH INKLUSI MELALUI E-MODUL BERJENJANG SEBAGAI PENGEMBANGAN KOMPETENSI GURU DALAM PEMENUHAN ...," [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Moh-Zayyadi/publication/387487602\\_PEMBERDAYAAN\\_SEKOLAH\\_INKLUSI\\_MELALUI\\_E-MODUL\\_BERJENJANG\\_SEBAGAI\\_PENGEMBANGAN\\_KOMPETENSI\\_GURU\\_DALAM\\_PEMENUHAN\\_LAYANAN\\_PENDIDIKAN\\_INKLUSIF/links/676ff491c1b0135465feb694/PEMBERDAYAAN-SEK](https://www.researchgate.net/profile/Moh-Zayyadi/publication/387487602_PEMBERDAYAAN_SEKOLAH_INKLUSI_MELALUI_E-MODUL_BERJENJANG_SEBAGAI_PENGEMBANGAN_KOMPETENSI_GURU_DALAM_PEMENUHAN_LAYANAN_PENDIDIKAN_INKLUSIF/links/676ff491c1b0135465feb694/PEMBERDAYAAN-SEK)
- [14] H. Mao *et al.*, "MR2-Net: Retinal OCTA Image Stitching via Multi-Scale Representation Learning and Dynamic Location Guidance," *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 29, no. 1, pp. 482–494, 2025, doi: 10.1109/JBHI.2024.3467256.
- [15] F. P. E. Putra, M. U. Mansyur, K. Z. Imam, and ..., "Optimalisasi Pengembangan Sistem Informasi Laboratorium Terintegrasi Sistem Akademik Menggunakan Metode Scrum," *J. ...*, 2023, [Online]. Available: <https://jurnal.darmajaya.ac.id/index.php/JurnalInformatika/article/view/3749>

- [16] S. Arifin, N. P. Dewi, M. N. Arifin, and ..., "Aplikasi Pengolahan Data Mahasiswa KKN pada Universitas Madura," ... *Inf. Sci.* ..., 2023, [Online]. Available: [http://ejournal.unira.ac.id/index.php/insand\\_comtech/article/view/2085](http://ejournal.unira.ac.id/index.php/insand_comtech/article/view/2085)
- [17] S. Burok, F. P. E. Putra, and L. Fermadi, "Anti-Klon Pendekatan Ringan untuk Mendeteksi Serangan Kloning RFID," *Infotek J.* ..., 2025, [Online]. Available: <https://ejournal.hamzanwadi.ac.id/index.php/infotek/article/view/30392>
- [18] B. Gökgöz, T. Aydin, and F. Gul, "Optimizing Memristor-Based Synaptic Devices for Enhanced Energy Efficiency and Accuracy in Neuromorphic Machine Learning," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 154401–154417, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3482110.
- [19] I. A. Alablani and M. A. Arafah, "A2T-Boost: An Adaptive Cell Selection Approach for 5G/SDN-Based Vehicular Networks," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 7085–7108, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3237851.
- [20] F. P. E. Putra, D. T. Agustina, T. S. K. Khotimah, and T. Ramadhanty, "Analisis Kinerja Jaringan 5G dalam Meningkatkan Konektivitas Internet of Things (IoT)," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420839\\_Analisis\\_Kinerja\\_Jaringan\\_5G\\_dalam\\_Meningkatkan\\_Konektivitas\\_Internet\\_of\\_Things\\_IoT/links/6848f86cdf0e3f544f5e49e9/Analisis-Kinerja-Jaringan-5G-dalam-Meningkatkan-Konektivitas-I](https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420839_Analisis_Kinerja_Jaringan_5G_dalam_Meningkatkan_Konektivitas_Internet_of_Things_IoT/links/6848f86cdf0e3f544f5e49e9/Analisis-Kinerja-Jaringan-5G-dalam-Meningkatkan-Konektivitas-I)
- [21] S. Lan, Y. Mao, B. Zhou, and W. Hu, "PEDOT-molecular bridging foam-hydrogel based wearable triboelectric nanogenerator for energy harvesting and sensing," *Nano Energy*, vol. 134, 2025, doi: 10.1016/j.nanoen.2024.110572.
- [22] 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>
- [23] Y. Jin, J. Sun, C. Chen, W. Chen, and Y. Bai, "An Energy Efficient On-Off Keying Transmitted Reference Pulse Cluster System for UWB Communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 8, pp. 10440–10447, 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3260827.
- [24] B. Mamatha and S. P. Terdal, "Artificial intelligence for early-stage detection of chronic kidney disease," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 4775–4790, 2024, doi: 10.11591/ijece.v14i4.pp4775-4790.
- [25] Z. Wang, R. Gao, C. Gao, Y. Chen, and F. Wang, "A Distributed Anomaly Detection Scheme Based on Correlation Awareness in WSN," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 134, no. 1, pp. 519–541, 2024, doi: 10.1007/s11277-024-10930-w.
- [26] M. Marta Dinata, Y. Yamaguchi, H. Uchida, Y. Shimoda, and A. Subekti, "Macro-Level Bottom-Up Energy Demand Modeling for Telecommunication Networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 127198–127211, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3434976.
- [27] A. R. Kasetwar, S. L. Badjate, V. Butram, M. S. Narlawar, S. Pradhan, and R. Pethe, "Highly Sensitive RF Energy Harvesting System for Wireless Protocol in IoT Devices," *Nanotechnol. Perceptions*, vol. 20, no. S6, pp. 703–712, 2024, doi: 10.62441/nano-ntp.v20iS6.56.
- [28] H. Khatun, C. Sharma, and U. Sarma, "Development of flexible piezoelectric energy harvesters using ZnO-PDMS-rGO composites for biomechanical energy harvesting," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 392, 2025, doi: 10.1016/j.sna.2025.116723.
- [29] A. Martin-Martin *et al.*, "Spiking Neural Networks for People Counting Based on FMCW Radar," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 60846–60858, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3557317.
- [30] M. Nouripayam, A. Prieto, and J. Rodrigues, "A Scalable All-Digital Near-Memory Computing Architecture for Edge AIoT Applications," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 108609–108625, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3582013.
- [31] 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>
- [32] M. H. Hashemi, U. Kiliç, and S. Dikmen, "Applications of Novel Heuristic Algorithms in Design Optimization of Energy-Efficient Distribution Transformer," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 15968–15980, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3245327.
- [33] M. Li, Z. Liu, N. Shi, and Y. Li, "CDDA: Privacy-preserving blockchain-based cross-domain dynamic authentication scheme for Healthcare 5.0," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 721, 2025, doi: 10.1016/j.ins.2025.122580.
- [34] J. Jung, J. Baik, Y. Kim, H.-S. Park, and J.-M. Chung, "OTOP: Optimized Transmission Power Controlled OBSS PD-Based Spatial Reuse for High Throughput in IEEE 802.11be WLANs," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 19, pp. 17110–17123, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3275544.

- [35] S. Chen, C. Xu, and L. Zhao, "Aeroelastic metastructure for simultaneously suppressing wind-induced vibration and energy harvesting under wind flows and base excitations," *Smart Mater. Struct.*, vol. 33, no. 3, 2024, doi: 10.1088/1361-665X/ad254d.
- [36] F. M. Nashwan, A. A. Alammari, A. Saif, and S. H. Alsamhi, "Deep Reinforcement Learning Explores EH-RIS for Spectrum-Efficient Drone Communication in 6G," *IET Signal Process.*, vol. 2024, no. 1, 2024, doi: 10.1049/2024/9548468.
- [37] F. P. E. Putra and M. M. Umar, "Jaringan Komputer Untuk Pemula," 2023, *researchgate.net*. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/379445302\\_Jaringan\\_Komputer\\_Untuk\\_Pemula/links/6609a87b390c214cfd2cc36c/Jaringan-Komputer-Untuk-Pemula.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/379445302_Jaringan_Komputer_Untuk_Pemula/links/6609a87b390c214cfd2cc36c/Jaringan-Komputer-Untuk-Pemula.pdf)
- [38] S. Wahi, D. Gupta, and S. Santapuri, "Finite element analysis and design of a magnetostrictive material based vibration energy harvester with a magnetic flux path," *Smart Mater. Struct.*, vol. 33, no. 11, 2024, doi: 10.1088/1361-665X/ad8408.
- [39] F. P. E. Putra, Y. Setiawan, S. Arifin, and W. Hidayatullah, "Peran VPN dalam Menjaga Privasi Pengguna Jaringan Pub-lik," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420576\\_Peran\\_VPN\\_dalam\\_Menjaga\\_Privasi\\_Pengguna\\_Jaringan\\_Publik/links/6848fa048a76251f22eccfd24/Peran-VPN-dalam-Menjaga-Privasi-Pengguna-Jaringan-Publik.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420576_Peran_VPN_dalam_Menjaga_Privasi_Pengguna_Jaringan_Publik/links/6848fa048a76251f22eccfd24/Peran-VPN-dalam-Menjaga-Privasi-Pengguna-Jaringan-Publik.pdf)
- [40] S. W. Jing, M. T. Sarker, G. Ramasamy, S. P. Thiagarajah, and F. Aman, "Industrial Untapped Rotational Kinetic Energy Assessment for Sustainable Energy Recycling," *Energy Eng. J. Assoc. Energy Eng.*, vol. 122, no. 3, pp. 905–927, 2025, doi: 10.32604/ee.2025.058916.
- [41] X. Ren, C. Qiu, H. Deng, Z. Dai, Z. Liu, and X. Wang, "Integrating Edge Intelligence and Blockchain : Research Actualities, Applications and Challenges," *Inf. Control*, vol. 53, no. 1, pp. 1–16, 2024, doi: 10.13976/j.cnki.xk.2024.3222.
- [42] V. Dixit and A. Kumar, "An Exact Error Analysis of Multi-User RC/MRC Based MIMO-NOMA-VLC System with Imperfect SIC," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 136710–136720, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3117446.
- [43] F. P. E. Putra, A. B. Tamam, R. W. Efendi, and ..., "Optimasi Keamanan DNS: Eksplorasi Optimal dengan Implementasi DNS Security Extensions (DNSSEC)," *REMIK Ris. dan E ...*, 2024, [Online]. Available: <https://jurnal.polgan.ac.id/index.php/remik/article/view/13398>
- [44] J. Ryu and S. Kim, "Trust System- and Multiple Verification Technique-Based Method for Detecting Wormhole Attacks in MANETs," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 16266–16275, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3355467.
- [45] K. Huang *et al.*, "Molecular motion–structure–property correlation in a polymorphic AIEgen with mechanochromic and piezoelectric functions," *Chem. Eng. J.*, vol. 523, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.168741.
- [46] S. Fernández, F. J. López-Martínez, F. H. Gregorio, and J. Cousseau, "Companding and Predistortion Techniques for Improved Efficiency and Performance in SWIPT," *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 8, no. 4, pp. 1676–1691, 2024, doi: 10.1109/TGCN.2024.3405627.
- [47] S. Itoo, A. A. Khan, M. Ahmad, and M. J. Idrisi, "A Secure and Privacy-Preserving Lightweight Authentication and Key Exchange Algorithm for Smart Agriculture Monitoring System," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 56875–56890, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3280542.
- [48] M. A. Hasan, R. Mustofa, N. U. I. Ibne Hossain, and M. S. Islam, "Smart health practices: Strategies to improve healthcare efficiency through digital twin technology," *Smart Heal.*, vol. 36, 2025, doi: 10.1016/j.smhl.2025.100541.
- [49] F. P. E. Putra, L. Fitriyah, Z. Naimah, and ..., "Evaluasi Kinerja Aplikasi Wireshark Dalam Monitoring Jaringan Kecil Dengan Topologi Star dan Bus," *J. Ilm. Ilk. ...*, 2025, [Online]. Available: <http://www.j-ilkominformo.org/index.php/ejournalaikom/article/view/343>
- [50] J. Choutka, J. Konecny, M. Mikus, K. Bancik, M. Prauzek, and J. Konecny, "Modelling Solar Irradiance Data for Energy Harvesting IoT Sensors," *Elektron. ir Elektrotechnika*, vol. 30, no. 5, pp. 31–37, 2024, doi: 10.5755/j02.eie.38283.