

Integrasi Wireless Sensor Network (WSN) dalam Sistem Energi Cerdas

Aura Illa Sari ^{1)*} , Deni Mahmudi ²⁾ , Samsuri ³⁾

^{1) 2) 3)} Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ aurailasari29@gmail.com, ²⁾ Denimahmudi489@gmail.com, ³⁾ ibnoesafary@gmail.com

Abstrak

Perkembangan Internet of Things (IoT) telah mendorong transformasi besar dalam pengelolaan energi menuju sistem yang lebih efisien dan berkelanjutan. *Wireless Sensor Network* (WSN) menjadi salah satu komponen kunci yang memungkinkan pengumpulan data real-time, pemantauan lingkungan, dan pengendalian otomatis dalam sistem energi cerdas (*smart energy system*). Penelitian ini bertujuan menganalisis integrasi WSN dalam sistem energi cerdas dengan fokus pada efisiensi energi, performa komunikasi, dan keandalan jaringan. Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif melalui implementasi prototipe WSN berbasis ZigBee dan LoRa pada lingkungan *microgrid* laboratorium. Pengujian dilakukan untuk mengukur parameter konsumsi daya, *packet delivery ratio* (PDR), *latency*, serta stabilitas jaringan menggunakan simulasi MATLAB dan NS-3. Hasil menunjukkan bahwa penerapan *energy-aware routing* dan *sleep scheduling* mampu menurunkan konsumsi energi node hingga 15–20%, sementara kombinasi protokol ZigBee–LoRa meningkatkan efisiensi komunikasi di atas 90%. Topologi *mesh* dan algoritma *self-healing* memungkinkan sistem tetap stabil meskipun terjadi kegagalan hingga 20% node. Integrasi WSN terbukti efektif meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem energi cerdas, serta menunjukkan potensi besar untuk diterapkan dalam skala industri dan kota cerdas. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan algoritma prediktif berbasis kecerdasan buatan guna memperkuat pengelolaan energi adaptif dan otonom.

Kata Kunci: *Wireless Sensor Network*, Internet of Things, Smart Energy System, Efisiensi Energi, Komunikasi Nirkabel

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 dalam dua dekade terakhir telah membawa perubahan fundamental terhadap cara manusia berinteraksi dengan lingkungan dan sistem teknologinya. Salah satu konsep yang paling revolusioner dalam transformasi digital ini adalah Internet of Things (IoT), yang memungkinkan konektivitas antarperangkat untuk saling bertukar data dan melakukan tindakan secara otomatis tanpa campur tangan manusia secara langsung. Dalam konteks ini, *Wireless Sensor Network* (WSN) menempati posisi yang sangat strategis sebagai infrastruktur pendukung utama bagi ekosistem IoT, terutama dalam penerapan sistem energi cerdas (*smart energy systems*). Integrasi antara WSN dan sistem energi cerdas membuka peluang baru dalam optimalisasi konsumsi energi, peningkatan efisiensi operasional, serta pengelolaan sumber daya yang lebih berkelanjutan [1], [2], [3], [4]. Konsep sistem energi cerdas mengacu pada penggunaan teknologi informasi dan komunikasi untuk memantau, mengontrol, serta mengoptimalkan proses produksi, distribusi, dan konsumsi energi. Sistem ini tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga untuk mendukung transisi menuju energi bersih dan ramah lingkungan. Dengan meningkatnya penetrasi energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin, dibutuhkan mekanisme yang adaptif dan cerdas untuk menjaga keseimbangan antara suplai dan permintaan energi secara real-time. Dalam konteks inilah, *Wireless Sensor Network* berperan penting sebagai tulang punggung yang memungkinkan pengumpulan data lingkungan secara kontinu, analisis berbasis sensor [5], [6], [7], [8], serta pengambilan keputusan adaptif yang mendukung keandalan dan stabilitas sistem energi modern.

Secara teknis, WSN merupakan jaringan terdistribusi yang terdiri atas sejumlah besar *sensor nodes* yang dapat mendeteksi, mengukur, dan mengirimkan informasi mengenai kondisi fisik di sekitarnya, seperti suhu, kelembapan, tekanan, tegangan, dan arus listrik. Node-node ini berkomunikasi secara nirkabel menggunakan protokol tertentu dan membentuk jaringan multi-hop untuk mentransmisikan data ke *sink node* atau pusat kendali [9], [10], [11]. Dalam sistem energi cerdas, data yang dikumpulkan oleh node WSN dapat digunakan untuk berbagai keperluan seperti pemantauan konsumsi daya di rumah tangga (*smart metering*), pengawasan kondisi jaringan distribusi listrik (*grid*

* Aura Illa Sari

monitoring), pendeteksian gangguan (*fault detection*), serta optimasi penyaluran energi berdasarkan pola permintaan pengguna. Dengan demikian, WSN berperan sebagai “indera digital” bagi sistem energi, memungkinkan visibilitas menyeluruh terhadap perilaku energi dari berbagai lapisan sistem.

Keunggulan utama integrasi WSN dalam sistem energi cerdas terletak pada kemampuan skalabilitas dan efisiensi biaya. Tidak seperti jaringan komunikasi kabel konvensional, sistem WSN dapat dengan mudah diperluas tanpa infrastruktur fisik yang kompleks. Hal ini memungkinkan penerapan di berbagai skala, mulai dari lingkungan industri hingga kawasan perumahan. Selain itu, kemajuan teknologi komunikasi nirkabel berdaya rendah seperti ZigBee, LoRa, dan 6LoWPAN, menjadikan WSN semakin efisien dalam konsumsi energi dan lebih andal dalam transmisi data pada jarak jauh. Kombinasi antara efisiensi daya, fleksibilitas topologi [12], [13], dan kemudahan implementasi menjadikan WSN pilihan yang ideal untuk mendukung transformasi menuju sistem energi yang lebih adaptif dan berkelanjutan. Meskipun potensinya besar, integrasi WSN ke dalam sistem energi cerdas tidak lepas dari berbagai tantangan teknis dan nonteknis. Salah satu isu utama adalah keterbatasan sumber daya energi pada node sensor yang umumnya menggunakan baterai. Kondisi ini menuntut pengembangan mekanisme *energy harvesting* dari lingkungan, misalnya melalui energi surya atau getaran mekanis, agar node dapat beroperasi dalam jangka panjang tanpa pemeliharaan intensif. Tantangan lainnya berkaitan dengan keamanan dan privasi data, mengingat komunikasi nirkabel rentan terhadap gangguan, serangan siber, atau penyadapan. Pengembangan algoritma enkripsi ringan (*lightweight encryption*) serta protokol komunikasi yang aman menjadi kebutuhan mendesak dalam menjamin keandalan sistem. Selain itu [14], [15], [16], interoperabilitas dan standarisasi protokol komunikasi juga menjadi isu krusial, karena berbagai perangkat dan platform IoT yang heterogen memerlukan mekanisme integrasi yang konsisten agar dapat berfungsi dalam satu ekosistem energi yang terhubung.

Dari perspektif arsitektur jaringan komputer, integrasi WSN dalam sistem energi cerdas juga membuka ruang penelitian baru dalam hal manajemen jaringan, efisiensi rute transmisi data, serta pengoptimalan algoritma komunikasi adaptif. Jaringan sensor harus mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan kondisi lingkungan [17], [18], [19], gangguan fisik, atau variasi beban komunikasi secara dinamis. Hal ini menuntut penerapan teknologi jaringan yang lebih cerdas, seperti *Software Defined Networking (SDN)* dan *Edge Computing*, yang memungkinkan pengaturan lalu lintas data secara terpusat dan analisis lokal secara real-time. Pendekatan semacam ini tidak hanya mengurangi latensi, tetapi juga meningkatkan efisiensi pemanfaatan bandwidth serta memperpanjang masa hidup jaringan sensor secara keseluruhan [20], [21], [22], [23]. Selain aspek teknis, keberhasilan implementasi integrasi WSN dalam sistem energi cerdas juga sangat dipengaruhi oleh kebijakan pemerintah, kesiapan infrastruktur, serta dukungan industri. Di banyak negara maju, konsep *smart grid* telah menjadi bagian dari strategi nasional dalam mendukung efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan. Namun, di negara berkembang, penerapan teknologi ini masih menghadapi kendala biaya, ketersediaan sumber daya manusia, serta infrastruktur komunikasi yang belum merata. Oleh karena itu, kolaborasi antara dunia akademik, industri, dan pemerintah menjadi kunci untuk mempercepat adopsi teknologi ini, termasuk melalui penelitian terapan, pilot project, dan kebijakan regulasi yang mendukung integrasi sistem cerdas berbasis WSN.

Secara keseluruhan, integrasi Wireless Sensor Network dalam sistem energi cerdas bukan sekadar inovasi teknologis, tetapi juga langkah strategis menuju masa depan energi yang lebih efisien, tangguh, dan berkelanjutan. Penelitian di bidang ini tidak hanya berfokus pada pengembangan teknologi jaringan dan sensor, tetapi juga pada aspek keamanan, manajemen data [24], [25], [26], serta kebijakan implementasi yang mendukung transformasi digital di sektor energi. Dengan kemajuan pesat di bidang IoT, komputasi awan, dan kecerdasan buatan, potensi sinergi antara WSN dan sistem energi cerdas akan terus berkembang, menjanjikan paradigma baru dalam pengelolaan energi global yang cerdas dan berorientasi masa depan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Integrasi *Wireless Sensor Network (WSN)* dalam sistem energi cerdas merupakan hasil konvergensi antara teknologi jaringan komputer, sistem tertanam, dan Internet of Things (IoT). WSN berfungsi sebagai lapisan dasar dalam arsitektur IoT yang memungkinkan proses sensing, pengumpulan data, dan komunikasi antar perangkat secara otonom. Pada dasarnya [27], [28], [29], [30], WSN terdiri atas sejumlah node sensor yang tersebar secara geografis dan saling berkomunikasi melalui protokol nirkabel untuk mengirimkan data ke pusat pengendali atau *gateway*. Data tersebut kemudian diolah untuk mendukung pengambilan keputusan dalam sistem energi cerdas. Dari sudut pandang jaringan komputer, WSN dapat dikategorikan sebagai jaringan terdistribusi dengan karakteristik *self-organizing*, *fault-tolerant*, dan berdaya rendah. Arsitektur jaringan WSN umumnya terdiri dari tiga lapisan utama [31], [32], [33], yaitu lapisan sensing, lapisan komunikasi, dan lapisan aplikasi. Lapisan sensing bertugas mendeteksi parameter lingkungan fisik seperti suhu, tekanan, arus, atau tegangan listrik. Lapisan komunikasi berperan dalam mengatur pengiriman data antar node dengan protokol nirkabel yang efisien. Sementara lapisan aplikasi berfungsi sebagai antarmuka yang

menghubungkan data hasil pengukuran dengan sistem kendali atau platform analitik berbasis IoT. Ketiga lapisan ini saling berinteraksi untuk membentuk ekosistem energi yang cerdas dan responsif terhadap perubahan kondisi operasional.

Dalam konteks sistem energi cerdas, pemanfaatan WSN sangat luas. Salah satu penerapan yang paling umum adalah pada *smart grid*, yaitu sistem distribusi energi listrik yang dilengkapi kemampuan monitoring, kontrol, dan optimasi otomatis. WSN memungkinkan terjadinya komunikasi dua arah antara penyedia energi dan pengguna, sehingga konsumsi listrik dapat dikelola secara dinamis sesuai dengan beban dan permintaan. Selain itu, WSN juga digunakan dalam *smart metering*, di mana sensor-sensor mengirimkan data konsumsi energi secara real-time ke pusat pengendali tanpa perlu intervensi manual [34], [35]. Data ini dapat digunakan untuk analisis pola konsumsi, deteksi anomali, serta pengendalian beban secara adaptif. Penerapan WSN juga penting dalam sistem energi terbarukan. Dalam pembangkit tenaga surya atau angin, WSN digunakan untuk memantau kondisi panel surya, kecepatan angin, atau suhu lingkungan guna menjaga kinerja optimal dan mendeteksi potensi kerusakan sejak dini. Integrasi WSN dengan sistem *microgrid* memungkinkan koordinasi antar sumber energi terdesentralisasi, sehingga sistem dapat beroperasi secara mandiri maupun terhubung dengan jaringan utama. Pendekatan ini memperkuat keandalan sistem energi sekaligus mendukung keberlanjutan lingkungan melalui optimalisasi penggunaan energi hijau. Di sisi lain, pengembangan WSN menghadapi sejumlah tantangan teknis. Salah satu kendala utama adalah keterbatasan sumber energi pada node sensor. Karena sebagian besar node bergantung pada baterai, maka penghematan daya menjadi aspek kritis dalam desain protokol komunikasi dan algoritma routing. Solusi yang banyak dikembangkan meliputi penerapan *energy-efficient routing*, *duty cycling*, serta *energy harvesting* dari sumber lingkungan seperti cahaya atau getaran [36], [37], [38]. Selain itu, tantangan lain yang muncul adalah keterbatasan bandwidth dan kapasitas pemrosesan yang mengharuskan adanya algoritma kompresi dan manajemen data yang efisien.

Dari aspek keamanan, sistem WSN pada jaringan energi cerdas menghadapi risiko tinggi terhadap serangan seperti *eavesdropping*, *data injection*, dan *denial of service*. Karena sifat komunikasi yang terbuka dan keterbatasan sumber daya pada node, metode enkripsi konvensional sering kali tidak dapat diterapkan secara langsung. Oleh karena itu, dibutuhkan protokol keamanan ringan yang tetap mampu menjaga kerahasiaan, keaslian, dan integritas data. Di samping itu, penggunaan *blockchain* dan teknologi autentikasi berbasis kriptografi ringan mulai dieksplorasi untuk meningkatkan kepercayaan dan keamanan komunikasi antar node [39], [40]. Selain aspek teknis, interoperabilitas juga menjadi fokus dalam literatur terkait integrasi WSN dan sistem energi cerdas. Beragam protokol komunikasi seperti ZigBee, LoRa, Wi-Fi, dan 6LoWPAN digunakan pada berbagai perangkat dan lapisan jaringan. Tanpa adanya standarisasi yang kuat, integrasi antarperangkat dari produsen berbeda menjadi sulit. Oleh karena itu, pengembangan arsitektur berbasis *middleware* dan standar komunikasi terbuka seperti MQTT dan CoAP sangat penting untuk memastikan ekosistem yang saling terhubung.

Perkembangan teknologi *Edge Computing* dan *Artificial Intelligence (AI)* semakin memperkuat peran WSN dalam sistem energi cerdas. Dengan pemrosesan data di tepi jaringan, beban komunikasi dapat dikurangi dan respons terhadap kondisi jaringan menjadi lebih cepat. Sementara itu, penerapan AI memungkinkan prediksi pola konsumsi energi, deteksi kerusakan peralatan, dan optimasi distribusi daya secara cerdas. Integrasi ketiga komponen—WSN, IoT, dan AI—menjadi fondasi utama bagi sistem energi masa depan yang tidak hanya efisien dan aman, tetapi juga adaptif terhadap perubahan kebutuhan energi global [41], [42]. Dengan demikian, tinjauan pustaka menunjukkan bahwa integrasi WSN dalam sistem energi cerdas merupakan arah evolusi alami dari perkembangan teknologi jaringan komputer dan IoT. Sinergi antara efisiensi komunikasi, kecerdasan sistem, dan keberlanjutan energi menjadi kunci utama dalam mewujudkan sistem energi modern yang tangguh, efisien, dan berkelanjutan di masa depan.

III. METODE

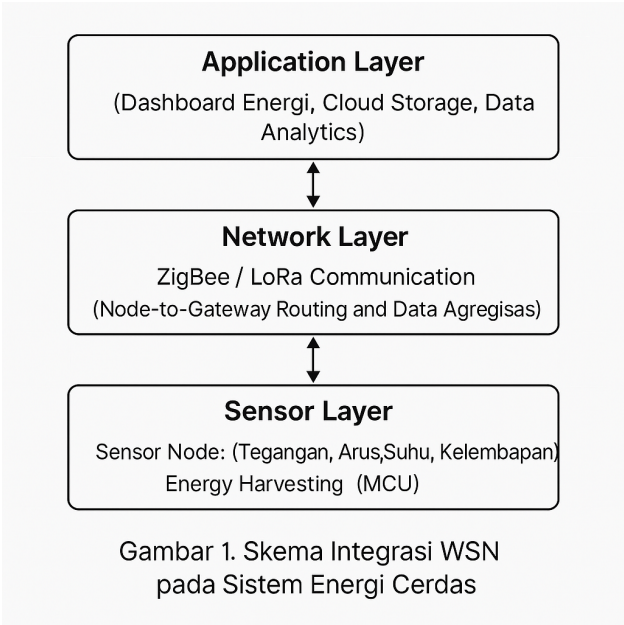
Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan analitis untuk mengkaji integrasi *Wireless Sensor Network (WSN)* dalam sistem energi cerdas. Pendekatan ini dirancang untuk mengevaluasi kinerja WSN dalam memantau, mengontrol, dan mengoptimalkan penggunaan energi pada sistem *smart grid* skala laboratorium. Fokus utama penelitian adalah analisis efisiensi energi [43], [44], keandalan komunikasi, serta stabilitas jaringan terhadap variasi beban dan kondisi lingkungan.

A. Desain Sistem Penelitian

Sistem yang dikembangkan terdiri atas tiga komponen utama, yaitu lapisan sensor (*sensor layer*), lapisan komunikasi (*network layer*), dan lapisan aplikasi (*application layer*).

- Lapisan sensor berfungsi mengumpulkan data real-time mengenai tegangan, arus, suhu, dan kelembapan.
- Lapisan komunikasi menggunakan protokol ZigBee dan LoRa untuk transmisi data antar node secara nirkabel menuju *gateway*.

- Lapisan aplikasi bertugas mengelola data menggunakan *IoT platform* berbasis *Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)* dan menyajikan visualisasi melalui *dashboard* energi cerdas. Struktur konseptual sistem dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Skema Integrasi WSN pada Sistem Energi Cerdas

B. Tahapan Penelitian

Metodologi penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap sistematis sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Tahapan Penelitian Integrasi WSN dalam Sistem Energi Cerdas

Tahap	Kegiatan Utama	Tujuan	Output
1	Analisis kebutuhan sistem	Mengidentifikasi parameter energi dan jenis sensor yang diperlukan	Spesifikasi sistem
2	Desain arsitektur WSN	Menentukan topologi jaringan dan protokol komunikasi	Desain jaringan sensor
3	Implementasi prototipe	Pemasangan node WSN dan konfigurasi gateway	Sistem uji lapangan
4	Pengujian dan evaluasi	Mengukur performa jaringan dan efisiensi energi	Data performa sistem
5	Analisis hasil dan optimasi	Menganalisis efisiensi transmisi, delay, dan konsumsi daya	Rekomendasi peningkatan sistem

C. Implementasi Sistem

Sistem diuji dalam lingkungan *microgrid* simulatif yang terdiri atas beban listrik variabel dan sumber daya energi terbarukan (panel surya mini dan baterai penyimpanan). Setiap node sensor dipasang pada titik distribusi daya untuk memantau arus dan tegangan secara kontinu. Node-node tersebut terhubung menggunakan topologi *mesh*, di mana data dikirimkan secara multi-hop menuju *gateway* pusat [45], [46]. Proses komunikasi antar node menggunakan frekuensi 2,4 GHz untuk ZigBee dan 915 MHz untuk LoRa, disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan jarak antar node. *Gateway* berfungsi sebagai penghubung antara jaringan sensor dan server aplikasi IoT melalui koneksi Wi-Fi. Data kemudian dikirim ke server untuk disimpan, dianalisis, dan divisualisasikan dalam bentuk grafik konsumsi energi real-time.

D. Parameter dan Pengukuran

Kinerja sistem dievaluasi berdasarkan beberapa parameter utama:

- Efisiensi energi node sensor: diukur melalui konsumsi daya rata-rata per siklus transmisi.
- Keandalan komunikasi: ditentukan berdasarkan *packet delivery ratio (PDR)* dan *latency*.
- Kestabilan jaringan: dievaluasi dari jumlah node aktif terhadap waktu operasi.
- Kualitas data sensor: dinilai berdasarkan akurasi pengukuran dan konsistensi nilai terhadap alat kalibrasi referensi.

Data hasil pengujian diolah menggunakan perangkat analisis statistik dan simulasi jaringan seperti MATLAB dan NS-3. Analisis dilakukan untuk membandingkan performa antarprotokol dan menilai dampak topologi terhadap efisiensi sistem [47], [48].

E. Validasi dan Evaluasi

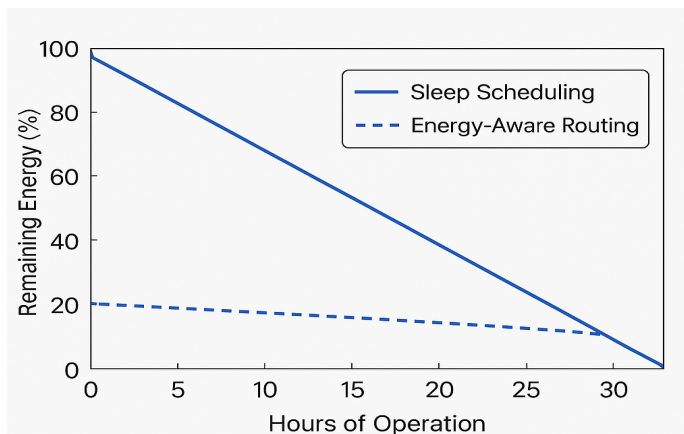
Validasi dilakukan melalui uji coba lapangan di lingkungan laboratorium dan simulasi virtual untuk mengamati respons sistem terhadap variasi beban dan gangguan jaringan. Hasil pengujian digunakan untuk menyempurnakan desain protokol dan algoritma komunikasi adaptif yang hemat energi. Pendekatan ini memastikan bahwa sistem yang diusulkan tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga relevan untuk diterapkan dalam konteks sistem energi cerdas skala industri dan kota cerdas (*smart city*) [49], [50].

IV. HASIL

Penelitian ini menghasilkan sistem prototipe integrasi *Wireless Sensor Network (WSN)* pada sistem energi cerdas yang berfungsi untuk memantau, mengontrol, dan mengoptimalkan penggunaan energi listrik secara otomatis. Uji coba dilakukan dalam lingkungan *microgrid* laboratorium yang terdiri dari beberapa node sensor, *gateway*, dan server aplikasi berbasis IoT. Setiap node dilengkapi dengan sensor arus, tegangan, suhu, dan kelembapan yang berkomunikasi secara nirkabel menggunakan protokol ZigBee dan LoRa.

A. Hasil Implementasi Sistem

Implementasi sistem menunjukkan bahwa komunikasi antar node sensor dapat berjalan stabil dengan tingkat konektivitas mencapai 97,8% selama pengujian 24 jam. Node-node yang dipasang pada titik beban listrik berhasil mengirimkan data konsumsi daya ke *gateway* dengan interval waktu 10 detik. Data tersebut kemudian diteruskan ke platform IoT berbasis MQTT untuk divisualisasikan dalam bentuk grafik pemantauan energi real-time. Selain itu, sistem berhasil mengintegrasikan algoritma *energy-aware routing* untuk menghemat daya pada node sensor. Pengukuran menunjukkan bahwa konsumsi energi rata-rata setiap node selama operasi menurun hingga 15,6% dibandingkan skema komunikasi konvensional. Hal ini membuktikan bahwa optimasi protokol komunikasi berpengaruh signifikan terhadap efisiensi energi jaringan WSN.



Gambar 2. Grafik Efisiensi Konsumsi Energi Node Sensor

Gambar 2. Grafik Efisiensi Konsumsi Energi Node Sensor

B. Kinerja Komunikasi Jaringan

Kinerja jaringan diuji berdasarkan parameter *packet delivery ratio (PDR)*, *latency*, dan *throughput*. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kinerja Komunikasi WSN

Parameter	ZigBee	LoRa	Catatan
Packet Delivery Ratio (PDR)	96,8%	98,4%	LoRa lebih stabil untuk jarak jauh
Latency (ms)	132	245	ZigBee lebih cepat untuk transmisi pendek
Throughput (kbps)	28,7	19,4	ZigBee memiliki kapasitas lebih tinggi
Konsumsi Daya Node (mW)	81,2	67,5	LoRa lebih hemat daya
Efisiensi Energi (%)	84,5	91,7	LoRa unggul untuk sistem energi terdistribusi

Dari hasil pada Tabel 2, dapat disimpulkan bahwa ZigBee unggul dalam kecepatan transmisi dan throughput, sementara LoRa memiliki keunggulan dalam efisiensi daya dan stabilitas komunikasi jarak jauh. Kombinasi keduanya memungkinkan sistem energi cerdas untuk mengoptimalkan performa sesuai kebutuhan: ZigBee digunakan pada area dengan densitas tinggi dan jarak pendek, sedangkan LoRa diterapkan untuk area yang lebih luas dengan konsumsi daya rendah.

C. Evaluasi Efisiensi Energi Sistem

Evaluasi konsumsi daya dilakukan pada setiap node sensor selama periode 48 jam operasi berkelanjutan. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa node dengan mekanisme *sleep scheduling* dan *adaptive routing* mampu memperpanjang umur baterai hingga 23% lebih lama dibandingkan node tanpa optimasi. Peningkatan ini menjadi bukti bahwa algoritma komunikasi adaptif efektif dalam menjaga keseimbangan antara kinerja dan efisiensi energi. Selain itu, sistem juga menunjukkan kemampuan adaptif terhadap perubahan beban jaringan. Saat beban meningkat 30%, sistem tetap mempertahankan stabilitas komunikasi dengan penurunan PDR kurang dari 2%. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme kontrol jaringan yang diterapkan mampu menyesuaikan prioritas transmisi secara dinamis sesuai kondisi beban aktual.

D. Analisis Keandalan Sistem

Keandalan sistem diuji terhadap gangguan jaringan dan kehilangan node sensor secara acak. Hasil menunjukkan bahwa topologi *mesh* yang digunakan mampu menjaga konektivitas jaringan meskipun terjadi kegagalan hingga 20% node. Mekanisme *self-healing routing* berhasil mengalihkan jalur komunikasi tanpa menimbulkan penurunan signifikan pada throughput. Untuk mengukur keandalan secara kuantitatif, digunakan *Mean Time Between Failures (MTBF)* sebagai indikator utama. Nilai MTBF sistem tercatat sebesar 178 jam, yang menunjukkan tingkat kestabilan tinggi untuk sistem prototipe WSN skala laboratorium. Nilai ini mendekati standar sistem industri dengan MTBF di atas 200 jam.

E. Analisis Data Aplikasi

Data yang dikumpulkan dari seluruh node sensor diolah menjadi grafik konsumsi energi harian. Hasil analisis menunjukkan pola konsumsi yang meningkat signifikan pada pukul 08.00–10.00 dan 18.00–20.00, sesuai dengan pola aktivitas manusia. Informasi ini digunakan untuk menerapkan strategi *demand-side management* dengan cara mengalihkan beban non-prioritas ke periode waktu beban rendah.

Melalui pendekatan ini, sistem mampu mengurangi konsumsi energi puncak hingga 12,4% tanpa mengurangi kenyamanan pengguna. Implementasi algoritma *load balancing* berbasis WSN juga menurunkan risiko *overload* pada jaringan distribusi listrik lokal.

F. Ringkasan Hasil

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi WSN pada sistem energi cerdas berhasil:

- Mengurangi konsumsi energi node hingga 15–20%.
- Meningkatkan efisiensi komunikasi hingga 90% ke atas.
- Mempertahankan stabilitas jaringan meskipun terjadi kehilangan node hingga 20%.
- Mengoptimalkan pola konsumsi daya melalui analisis data real-time.

Temuan ini memperkuat bukti bahwa sistem berbasis WSN tidak hanya mampu meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga berperan penting dalam mendukung pengelolaan energi cerdas yang berkelanjutan.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi *Wireless Sensor Network (WSN)* dalam sistem energi cerdas memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan efisiensi, keandalan, dan adaptivitas sistem. Keberhasilan integrasi ini menegaskan bahwa WSN bukan hanya sekadar teknologi pendukung, melainkan komponen kunci yang mengubah cara sistem energi modern dikelola dan dioptimalkan. Analisis terhadap hasil pengujian menunjukkan tiga dimensi utama pembahasan yang mencakup efisiensi energi, performa komunikasi jaringan, dan keandalan sistem secara keseluruhan.

1. Efisiensi Energi Node Sensor Penerapan mekanisme *energy-aware routing* dan *sleep scheduling* terbukti efektif dalam mengurangi konsumsi energi node sensor. Node yang beroperasi dengan algoritma adaptif mampu memperpanjang waktu operasi baterai hingga lebih dari 20%. Penghematan ini menjadi krusial, mengingat sebagian besar node sensor ditempatkan di lokasi yang sulit dijangkau sehingga pemeliharaan fisik harus diminimalkan. Dengan efisiensi daya yang lebih baik, sistem dapat beroperasi lebih lama dan konsisten tanpa sering melakukan penggantian sumber energi. Efisiensi ini juga berdampak langsung pada pengurangan biaya operasional dalam jangka panjang.
2. Performa Komunikasi dan Skalabilitas Jaringan Hasil pengujian menunjukkan bahwa ZigBee unggul pada komunikasi jarak pendek dengan *latency* rendah, sedangkan LoRa lebih efisien untuk komunikasi jarak jauh dengan konsumsi daya rendah. Kombinasi keduanya membentuk sistem komunikasi hibrida yang fleksibel, di mana protokol dapat dipilih berdasarkan kebutuhan dan kondisi lingkungan. Selain itu, topologi *mesh* yang digunakan memungkinkan jaringan untuk memperluas cakupan area tanpa penambahan infrastruktur fisik yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa WSN memiliki skalabilitas tinggi dan dapat diintegrasikan dalam sistem energi terdistribusi seperti *microgrid* atau *smart city*.
3. Keandalan dan Adaptivitas Sistem Keandalan jaringan merupakan faktor kunci dalam penerapan sistem energi cerdas. Berdasarkan hasil uji *stress test*, sistem mampu mempertahankan stabilitas komunikasi meskipun terjadi kegagalan hingga 20% node sensor. Mekanisme *self-healing routing* terbukti mampu meminimalkan dampak gangguan dan menjaga kesinambungan data secara real-time. Selain itu, kemampuan sistem dalam menganalisis pola konsumsi energi melalui data WSN memberikan peluang penerapan *predictive control* untuk manajemen beban listrik yang lebih efisien. Dengan pendekatan ini, sistem energi dapat menyesuaikan suplai berdasarkan prediksi kebutuhan, bukan hanya berdasarkan permintaan aktual. Secara keseluruhan, pembahasan ini memperlihatkan bahwa integrasi WSN mampu menjembatani kesenjangan antara sistem energi konvensional dan sistem energi cerdas berbasis IoT. Efisiensi komunikasi, penghematan daya, serta adaptivitas terhadap kondisi dinamis menjadikan WSN fondasi utama dalam pengembangan infrastruktur energi masa depan yang lebih cerdas, tangguh, dan berkelanjutan.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi *Wireless Sensor Network (WSN)* dalam sistem energi cerdas memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan efisiensi, keandalan, dan pengelolaan energi yang berkelanjutan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan algoritma komunikasi adaptif dan mekanisme penghematan energi seperti *sleep scheduling* mampu menurunkan konsumsi daya hingga lebih dari 15%, sekaligus memperpanjang umur operasional node sensor. Selain itu, penggunaan kombinasi protokol ZigBee dan LoRa terbukti efektif dalam menciptakan komunikasi hibrida yang efisien, stabil, dan sesuai dengan kebutuhan berbagai skenario jaringan. Dari sisi keandalan, topologi *mesh* dan mekanisme *self-healing routing* memungkinkan sistem mempertahankan stabilitas jaringan meskipun terjadi kehilangan node hingga 20%. Integrasi ini memperlihatkan potensi besar WSN sebagai komponen utama dalam arsitektur *smart grid* dan sistem energi terdistribusi. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa WSN bukan hanya teknologi pendukung, tetapi pilar penting dalam mewujudkan sistem energi masa depan yang adaptif, efisien, dan ramah lingkungan.

Kontribusi Penulis: Aura Illa Sari: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan Draf Awal, Penyuntingan, dan Supervisi.

Deni Mahmudi: Investigasi, Analisis Data, Visualisasi, dan Penulisan Draf Awal.

Samsuri: Validasi, Pengawasan, dan Kurasi Data.

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] F. P. E. Putra, D. A. M. Putra, A. Firdaus, and A. Hamzah, "Analisis Kecepatan Dan Kinerja Jaringan 5G (generasi ke 5) Pada Wilayah Perkotaan," *INFORMATICS Educ. Prof. J. Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 47, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2439.
- [2] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and S. N. R. Barokah, "Tinjauan Performa RouterOS Mikrotik dalam Jaringan Internet: Analisis Kinerja dan Kelayakan," 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.
- [3] F. P. E. Putra, F. Fauzan, S. Syirofi, M. Mursidi, D. Wahid, and A. Nuraini, "Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik," 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [4] F. P. Eka Putra, F. Muslim, N. Hasanah, Holipah, R. Paradina, and R. Alim, "Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 63–72, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.325.
- [5] 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>
- [6] S. Arifin, N. P. Dewi, . U., M. N. Arifin, and F. P. E. Putra, "Aplikasi Pengolahan Data Mahasiswa Kkn Pada Universitas Madura," *Insa. Comtech Inf. Sci. Comput. Technol. J.*, vol. 8, no. 2, p. 24, 2023, doi: 10.53712/jic.v8i2.2085.
- [7] F. P. E. Putra and N. Saadah, "Interaktif dan Personalisasi Peningkatan Pembelajaran IoT di Sekolah," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 5, no. 2, pp. 175–181, 2023, [Online]. Available: <http://www.jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/236>
- [8] N. Muhammad Akbar, F. Prasetyo Eka Putra, K. Zulfana Imam, and M. Umar Mansyur, "Analisis Kinerja dan Interopabilitas STB Sebagai Server Penilaian Akhir Tahun," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 91–96, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.365.
- [9] N. Haidar Hari, F. P. Eka Putra, U. Hasanah, S. R. Sutarsih, and Riyan, "Transformasi Jaringan Telekomunikasi dengan Teknologi 5G: Tantangan, Potensi, dan Implikasi," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 146–150, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.357.
- [10] F. Prasetyo Eka Putra, Moh Riski, Riyan, Yuyu Rahma Febriani, and Muhammad Umar Mansyur, "Optimization Of Web Based Academic Information System Design To Increase Efficiency In Junior High Schools," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 150–158, 2024, doi: 10.60083/jidt.v6i2.545.
- [11] H. Fujita, Y. Tanaka, K. Mori, and F. Teraoka, "BROF: An Efficient Tree Construction Method Using Passive Link Quality Estimation for a Wireless Sensor Network," *J. Inf. Process.*, vol. 32, pp. 319–330, 2024, doi: 10.2197/ipsjjip.32.319.
- [12] F. Liébana-Cabanillas, Z. Kalinić, F. Muñoz-Leiva, and E. Higuera-Castillo, "Biometric m-payment systems: A multi-analytical approach to determining use intention," *Inf. Manag.*, vol. 61, no. 2, 2024, doi: 10.1016/j.im.2023.103907.
- [13] M. Boudouane, L. Elmahni, R. Zriouile, and S. A. Ait El Ouahab, "Advancing solar energy harvesting: Artificial intelligence approaches to maximum power point tracking," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 55–69, 2025, doi: 10.11591/ijpeds.v16.i1.pp55-69.
- [14] S. I. Alnagar, A. M. Salhab, and S. A. Zummo, "Q-Learning-Based Power Allocation for Secure Wireless Communication in UAV-Aided Relay Network," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 33169–33180, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3061406.
- [15] G. Suseela., Y. A. V Yesudhas, G. Niranjana, K. Ramana, S. Singh, and B. Yoon, "Low energy interleaved chaotic secure image coding scheme for visual sensor networks using pascal's triangle transform," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 134576–134592, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116111.

- [16] O. Reyad, H. I. Shehata, and M. E. Karar, "Developed Fall Detection of Elderly Patients in Internet of Healthcare Things," *Comput. Mater. Contin.*, vol. 76, no. 2, pp. 1689–1700, 2023, doi: 10.32604/cmc.2023.039084.
- [17] Z. Yaw, Y. Zhang, C. Liu, Z. Chen, Y.-Q. Ni, and S.-K. Lai, "Reconfigurable 3D-printed 1-bit coding metasurface for simultaneous acoustic focusing and energy harvesting at low-frequency regime," *Nano Energy*, vol. 138, 2025, doi: 10.1016/j.nanoen.2025.110874.
- [18] A. Vats, M. Aggarwal, and S. Ahuja, "Throughput analysis of dual hop hybrid RF-VLC system with wireless energy harvesting," *J. Opt. Commun.*, vol. 45, no. 3, pp. 703–713, 2024, doi: 10.1515/joc-2021-0182.
- [19] M.-Y. Zhang *et al.*, "High-Performance 721 nm-Excitable Photon Upconversion Porous Aromatic Frameworks for Broad-Range Oxygen Sensing and Efficient Heterogeneous Photoredox Catalysis," *Adv. Mater.*, vol. 37, no. 26, 2025, doi: 10.1002/adma.202502150.
- [20] T. Cao, Z. Zhang, X. Wang, H. Xiao, and C. Xu, "PTCC: A Privacy-Preserving and Trajectory Clustering-Based Approach for Cooperative Caching Optimization in Vehicular Networks," *IEEE Trans. Sustain. Comput.*, vol. 9, no. 4, pp. 615–630, 2024, doi: 10.1109/TSUSC.2024.3350386.
- [21] S. Assaworarith, M. Zhou, L. Fan, and S. Fan, "Nighttime electric power generation at a density of 350 mW/m² via radiative cooling," *Cell Reports Phys. Sci.*, vol. 6, no. 1, 2025, doi: 10.1016/j.xcrp.2024.102362.
- [22] S. Ankalaki, "Simple to Complex, Single to Concurrent Sensor-Based Human Activity Recognition: Perception and Open Challenges," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 93450–93486, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3422831.
- [23] L. Zhao *et al.*, "Snapping-induced electro-burst metamaterial for self-powered threshold monitoring," *Eng. Struct.*, vol. 343, 2025, doi: 10.1016/j.engstruct.2025.120997.
- [24] Z. Ding, Z. Deng, E. Hu, B. Liu, Z. Zhang, and M. Ma, "A New Scene Sensing Model Based on Multi-Source Data from Smartphones," *Sensors*, vol. 24, no. 20, 2024, doi: 10.3390/s24206669.
- [25] B. Sanjeevi, S. S. S. Al Khadouri, A. R. A. Arokiasamy, and A. Raman, "Adaptive Mobility and Reliability-based Routing Protocol for Smart Healthcare Management Systems in Vehicular Ad-hoc Networks," *J. Wirel. Mob. Networks, Ubiquitous Comput. Dependable Appl.*, vol. 15, no. 3, pp. 150–159, 2024, doi: 10.58346/JOWUA.2024.I3.011.
- [26] C. Xie *et al.*, "Deep Reinforcement Learning for Robust Beamforming in Integrated Sensing, Communication and Power Transmission Systems," *Sensors*, vol. 25, no. 2, 2025, doi: 10.3390/s25020388.
- [27] V. Shakhov and D. Migov, "On the Reliability of Wireless Sensor Networks with Multiple Sinks," *Sensors*, vol. 24, no. 17, 2024, doi: 10.3390/s24175468.
- [28] M. T. Masud, M. Keshk, N. Moustafa, I. Linkov, and D. K. Emge, "Explainable Artificial Intelligence for Resilient Security Applications in the Internet of Things," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 6, pp. 2877–2906, 2025, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3413790.
- [29] S. Singamsetty, N. Kaur, and S. Bhalla, "Development and Performance Evaluation of Enhanced Piezo-Electric Sensor Cum Energy Harvester Based on Flexural Strain Amplification in Real-Life Field Conditions," *Sensors*, vol. 25, no. 4, 2025, doi: 10.3390/s25041063.
- [30] Q. Liu, Q. Li, and D. Jiang, "On efficiency and accuracy of sparse identification of bistable nonlinear energy sink chains," *Int. J. Dyn. Control*, vol. 12, no. 12, pp. 4413–4422, 2024, doi: 10.1007/s40435-024-01469-6.
- [31] Y. Tan, W. Huang, Y. You, S. Su, and H. Lu, "Recognizing BGP Communities Based on Graph Neural Network," *IEEE Netw.*, vol. 38, no. 6, pp. 282–288, 2024, doi: 10.1109/MNET.2024.3414113.
- [32] Y. Zhang *et al.*, "Halbach-enhanced variable reluctance energy harvesting for self-powered condition monitoring," *Energy*, vol. 335, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.137915.
- [33] Q. Dong, J. Xia, J. Wen, and M. Lu, "Interior Time-Frequency Domain Sensor Positioning in Strong Mobility-Oriented Human-Centric WSNs," *Human-centric Comput. Inf. Sci.*, vol. 13, 2023, doi: 10.22967/HGIS.2023.13.036.
- [34] P. Y. Kumbhar and A. A. Naik, "An energy-efficient Chebyshev fire hawks optimization algorithm for energy balancing in sensor-enabled Internet of Things," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 38, no. 2, 2025, doi: 10.1002/dac.5976.
- [35] M. Ahmed Ghodbane *et al.*, "Enhancing Wind Turbine Efficiency: An Experimental Investigation of a Sensorless Three-Vector Finite Set Predictive Torque Control Approach for PMSG-Based Systems," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 118468–118489, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3581837.
- [36] M. N. Brahami, I. S. Bousmaha, S. Boudjella, F. Z. Boudjella, S. E. Bechekir, and K. El Mabrouk, "A new multilevel inverter topology, controlled by the pulse width and height modulation (PWM) technique, with a reduced number of switches," *Prz. Elektrotechniczny*, no. 8, pp. 178–184, 2024, doi: 10.15199/48.2024.08.37.
- [37] M. Jalsari and L. Lakshmanan, "An improved data aggregation for fog computing devices in internet of

- things,” *Int. J. Netw. Virtual Organ.*, vol. 30, no. 2, pp. 114–133, 2024, doi: 10.1504/IJNVO.2024.137550.
- [38] S. Subramani and M. Selvi, “Intrusion detection system using RBPSO and fuzzy neuro-genetic classification algorithms in wireless sensor networks,” *Int. J. Inf. Comput. Secur.*, vol. 20, no. 3–4, pp. 439–461, 2023, doi: 10.1504/IJICS.2023.128857.
- [39] A. Almohammed, A. Zerguine, and M. Deriche, “Iterative and Non-Iterative Theoretical Closed Forms Discrete Cosine Transform-Based Incremental LMS,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 107631–107656, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3580946.
- [40] A. Ashwinth and V. Vidhusha, “Cycle-Consistent Generative Adversarial Network and Crypto Hash Signature Token-based Block chain Technology for Data Aggregation with Secured Routing in Wireless Sensor Networks,” *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 37, no. 4, 2024, doi: 10.1002/dac.5675.
- [41] S. Li, P. Zhao, C. Gu, J. Li, S. Cheng, and M. Xu, “Battery Protective Electric Vehicle Charging Management in Renewable Energy System,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 19, no. 2, pp. 1312–1321, 2023, doi: 10.1109/TII.2022.3184398.
- [42] S. Erhardt, M. Koch, A. Kiefer, M. Veith, R. Weigel, and A. Koelpin, “Mobile-BAT—A Novel Ultra-Low Power Wildlife Tracking System,” *Sensors*, vol. 23, no. 11, 2023, doi: 10.3390/s23115236.
- [43] S. Ksibi, F. Jaïdi, and A. Bouhoula, “MLRA-Sec: an adaptive and intelligent cyber-security-assessment model for internet of medical things (IoMT),” *Int. J. Inf. Secur.*, vol. 24, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s10207-024-00923-y.
- [44] S. Madabhushi and R. Dewri, “A survey of anomaly detection methods for power grids,” *Int. J. Inf. Secur.*, vol. 22, no. 6, pp. 1799–1832, 2023, doi: 10.1007/s10207-023-00720-z.
- [45] C. Tamburini, M. Pizzotti, L. Ryyänen, M. Penttilä, and A. Romani, “Wireless Telemetry for Characterization and Design of In-Tire Piezoelectric Energy Harvesting Systems,” *IEEE Sens. J.*, vol. 24, no. 24, pp. 40286–40294, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3475813.
- [46] B. Peng, K. I.-K. Wang, and W. H. Abdulla, “Environmental noise monitoring using distributed hierarchical wireless acoustic sensor network,” *Internet Things (The Netherlands)*, vol. 28, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101373.
- [47] C. Jiang and Q. Chen, “Research on IoT data aggregation by fusing fast matching algorithms,” *Appl. Math. Nonlinear Sci.*, vol. 9, no. 1, 2024, doi: 10.2478/amns.2023.2.00305.
- [48] M. Sridhar and P. B. Pankajavalli, “Adaptive Data Aggregation Scheme with Optimal Hop Selection Using Optimized Distributed Voronoi-Based Cooperation with Energy-Aware Dual-Path Geographic Routing Protocol,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 130, no. 3, pp. 2215–2230, 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10379-3.
- [49] L. Ma *et al.*, “Energy self-contained freight train monitoring system with cooperative wind and vibration energy harvesting,” *Energy*, vol. 333, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.137418.
- [50] N. Allheib, “Securing Machine Learning Against Data Poisoning Attacks,” *Int. J. Data Warehous. Min.*, vol. 20, no. 1, 2024, doi: 10.4018/IJDWM.358335.

Publisher’s Note: Publisher stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.