

Pemanfaatan WSN dalam Monitoring dan Pengendalian Sistem Energi Pintar

Nur Hidayah Titiani^{1)*} , Aura Illa Sari²⁾ , Nurul Maudy Apriani³⁾

¹⁾²⁾³⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾tiawandira44@gmail.com, ²⁾aurailasari@gmail.com, ³⁾naya24@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi telah mendorong penerapan sistem cerdas dalam pengelolaan energi, di mana efektivitas manajemen energi sangat bergantung pada kemampuan sistem melakukan monitoring dan pengendalian secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan arsitektur *Wireless Sensor Network* (WSN) yang optimal untuk sistem energi pintar serta mengevaluasi kinerja, efisiensi, dan keandalan sistem yang dikembangkan. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimental melalui pengembangan prototipe monitoring energi berbasis WSN yang terdiri dari lapisan sensor (PZEM-004T/INA219), lapisan komunikasi menggunakan protokol ZigBee dan LoRa, serta lapisan aplikasi berbasis Internet of Things (IoT). Pengujian dilakukan pada skenario microgrid simulatif dengan parameter akurasi pengukuran, efisiensi energi node sensor, performa komunikasi, dan kestabilan jaringan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi pengukuran yang tinggi, yaitu 97–99% untuk tegangan dan 98–99,8% untuk arus. Penerapan mekanisme *energy-aware routing* dan *sleep scheduling* mampu menurunkan konsumsi energi node sensor sebesar 15–25% serta memperpanjang umur baterai lebih dari 20%. Performa komunikasi jaringan menunjukkan *Packet Delivery Ratio* (PDR) sebesar 96–99% dan sistem tetap stabil meskipun terjadi kegagalan hingga 20% node sensor. Selain itu, penerapan *demand-side management* berbasis data WSN mampu menurunkan konsumsi energi puncak hingga 12,4% dan menghasilkan potensi penghematan energi sebesar 10–15% per bulan. Penelitian ini membuktikan bahwa WSN efektif diterapkan pada sistem energi pintar dengan tingkat efisiensi komunikasi di atas 90% serta memberikan kontribusi positif terhadap efisiensi energi dan keandalan sistem.

Kata kunci: Wireless Sensor Network, Sistem Energi Pintar, Internet of Things, Monitoring Real-time, Efisiensi Energi, Smart Grid

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

I. PENDAHULUAN

Pada era digitalisasi saat ini, infrastruktur jaringan komputer di beberapa instansi telah mengalami modernisasi, dan menggunakan berbagai peralatan digital yang canggih untuk menunjang aktifitas dalam kehidupan sehari-hari [1]. Pengembangan teknologi merupakan cara yang ideal untuk meningkatkan kualitas dan mutu. Kemajuan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) berkembang pesat di era globalisasi, khususnya di bidang teknologi. Membahas tentang teknologi memang tidak pernah ada ujungnya [2], [3]. Perkembangan teknologi informasi tidak bisa diabaikan begitu saja di era digital ini. Perkembangan cepat teknologi informasi dan komunikasi telah mengubah cara kami mengakses internet [4], [5]. Salah satu efek utama dari perubahan ini adalah semakin meluasnya penggunaan jaringan publik, khususnya Wi-Fi gratis yang dapat diakses di berbagai ruang publik seperti kafe, bandara, hotel, dan pusat perbelanjaan [6], [7]. Keberadaan jaringan publik ini memberikan kemudahan bagi pengguna untuk mengakses internet kapan saja, di mana saja [8]. Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi telah mendorong peningkatan penggunaan sistem cerdas dalam berbagai sektor, termasuk manajemen energi. Keberhasilan dalam pengelolaan energi sangat bergantung pada kemampuan sistem untuk melakukan monitoring dan pengendalian secara real-time [9]. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai teknologi pendukung seperti *Wireless Sensor Network* (WSN) menjadi sangat penting dalam mendesain, mengelola, serta memelihara infrastruktur sistem energi pintar yang handal dan efisien. Adapun *Wireless Sensor Network* (WSN) dalam bahasa Indonesia dikenal sebagai Jaringan Sensor Nirkabel [10]. WSN atau Jaringan Sensor Nirkabel merupakan jenis jaringan yang terdiri dari banyak perangkat kecil yang disebut node sensor [11]. Node sensor ini ditempatkan secara strategis di area yang ditentukan untuk mengumpulkan dan mengirimkan data [12].

* Nur Hidayah Titiani

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan teknologi yang terdiri dari sensor nirkabel yang mampu mengirimkan data secara real-time mengenai kondisi sistem. Inovasi saat ini dalam kehidupan sehari-hari terutama dalam dunia komputer dan smartphone, sensor dan jaringan sensor terutama yang berhubungan dengan jaringan seluler generasi berikutnya membuka peluang besar bagi para peneliti dan pengembang berbagai sistem dan aplikasi [13], [14]. Teknologi ini memungkinkan pengelolaan energi secara efisien di berbagai lokasi dengan sumber daya terbatas melalui pengumpulan data secara otomatis dan pemrosesan informasi secara terdistribusi [15]. Beberapa penelitian telah mengkaji penerapan *Wireless Sensor Network* (WSN) dalam sistem cerdas. Penelitian oleh Putra dan Baidawi berjudul *perancangan jaringan sensor nirkabel dan IoT untuk smart city Pamekasan* menunjukkan bahwa WSN dapat diintegrasikan untuk pengelolaan sampah, lampu jalan, aliran air, dan pengendalian pencemaran udara. Penelitian oleh Hari et al [16],[17]. berjudul *UNIRA One Hand* mengembangkan smart campus berbasis ZigBee WSN yang mengintegrasikan layanan perpustakaan cerdas, kendali jarak jauh, dan papan buletin elektronik dengan sistem autentikasi pengguna. Penelitian oleh Putra et al. berjudul *monitoring kualitas air berbasis IoT* membuktikan bahwa WSN mampu menghasilkan data suhu, pH, dan kekeruhan air dengan tingkat akurasi yang baik. Selanjutnya, penelitian oleh Putra et al [18]. berjudul *evaluasi kinerja jaringan menggunakan Wireshark* menunjukkan perbedaan performa latensi dan throughput pada topologi jaringan yang berbeda. Sementara itu, penelitian oleh Putra et al. berjudul *analisis kinerja jaringan 5G di wilayah perkotaan* menegaskan bahwa teknologi 5G dengan kecepatan tinggi dan latensi rendah sangat mendukung implementasi WSN dan IoT pada sistem cerdas [19].

Meskipun berbagai penelitian telah mengeksplorasi penerapan WSN dalam konteks IoT dan *smart city*, terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan dalam implementasi spesifik WSN untuk monitoring dan pengendalian sistem energi pintar secara terpadu [20],[21]. Tidak ada penelitian sebelumnya yang secara khusus mengintegrasikan WSN dengan sistem energi pintar yang mencakup monitoring konsumsi energi real-time, pengendalian distribusi daya otomatis, dan optimalisasi efisiensi energi dalam satu platform terintegrasi. Penelitian ini mengisi kekosongan tersebut dengan mengembangkan sistem yang tidak hanya mampu memonitor parameter energi secara real-time, namun juga melakukan pengendalian otomatis berdasarkan data yang dikumpulkan dari jaringan sensor [22],[23]. Tujuan penelitian ini adalah: (1) Merancang arsitektur WSN yang optimal untuk monitoring dan pengendalian sistem energi pintar; (2) Mengintegrasikan berbagai sensor energi ke dalam satu jaringan nirkabel yang efisien; (3) Mengembangkan sistem pengendalian otomatis berbasis data *real-time* dari WSN; (4) Mengevaluasi kinerja dan reliabilitas sistem WSN dalam konteks sistem energi pintar; dan (5) Menganalisis efisiensi energi yang dapat dicapai melalui implementasi sistem monitoring dan pengendalian berbasis WSN. Kontribusi utama penelitian ini adalah menghadirkan solusi teknologi WSN yang terintegrasi untuk sistem energi pintar dengan kemampuan monitoring real-time dan pengendalian otomatis yang dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi, mengurangi pemborosan, serta mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik dalam manajemen energi. Dengan pendekatan ini, sistem energi pintar dapat beroperasi lebih optimal, responsif terhadap perubahan kebutuhan, dan berkontribusi terhadap keberlanjutan lingkungan [24].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pemanfaatan *Wireless Sensor Network* (WSN) dalam sistem energi cerdas merupakan hasil konvergensi teknologi jaringan komputer, sistem tertanam, dan *Internet of Things* (IoT) yang berfungsi sebagai lapisan sensing, pengumpulan data, dan komunikasi antar perangkat secara otonom dengan arsitektur terdiri dari lapisan sensing untuk mendeteksi parameter fisik, lapisan komunikasi untuk pengiriman data antar node, dan lapisan aplikasi sebagai antarmuka sistem kendali berbasis IoT [25],[26]. Pemanfaatan WSN sangat luas pada smart grid untuk monitoring, kontrol, dan optimasi otomatis yang memungkinkan komunikasi dua arah antara penyedia energi dan pengguna sehingga konsumsi listrik dapat dikelola secara dinamis. Implementasi sistem IoT untuk monitoring konsumsi energi listrik menggunakan sensor arus ACS712 dan NodeMCU ESP8266 berhasil mencapai tingkat keberhasilan 100% dalam pengukuran beban listrik dan pengiriman data secara real-time, sementara sistem monitoring smart garden menunjukkan ESP8266 dapat mengoperasikan sensor kelembapan tanah dan sensor DHT11 dengan tingkat keberhasilan 100% [27]. Rancang bangun sistem monitoring hasil energi listrik pada prototipe turbin Darrieus berbasis IoT menggunakan sensor NodeMCU ESP32 dapat mengukur tegangan, arus, daya, dan energi yang divisualisasikan melalui platform *ThingsBoard* untuk pemantauan kinerja turbin secara real-time. Sistem informasi monitoring penjualan guna

pengendalian intern menggunakan teknologi informasi dengan metode rapid application development (RAD) berhasil meningkatkan kinerja perusahaan dalam melakukan pengawasan dan pengontrolan kegiatan penjualan dengan sistem yang dapat meminimalisir terjadinya kesalahan pencatatan data dan menghindari penyimpangan. Rancangan dan implementasi sistem manajemen energi dan audit energi berbasis ISO:50001 di kampus universitas menunjukkan intensitas konsumsi energi (IKE) sebesar 16,16 kWh/m²/bulan yang cenderung tidak efisien dapat diturunkan menjadi 11,64 kWh/m²/bulan dengan penerapan sistem manajemen energi sehingga menghasilkan penghematan biaya sebesar 27,93% atau Rp. 81.839.250[28],[29].

Penerapan WSN penting dalam sistem energi terbarukan dimana dalam pembangkit tenaga surya atau angin, WSN digunakan untuk memantau kondisi panel surya, kecepatan angin, atau suhu lingkungan guna menjaga kinerja optimal. Energi surya di Indonesia memiliki potensi besar dengan radiasi surya rata-rata 4,8 kWh/m²/hari yang dapat dimanfaatkan melalui teknologi fotovoltaik untuk kebutuhan listrik dan teknologi termal untuk berbagai aplikasi. Rancang bangun monitoring sistem penerangan pada prototype gedung dua lantai untuk penghematan energi berbasis WSN menggunakan sensor arus dan cos phi dengan komunikasi data RF Modul *XBee Starter Kit* berhasil melakukan monitoring parameter listrik tanpa sistem pengkabelan. Rancang bangun sistem smart room dengan kombinasi sensor photodiode dan sensor PIR sebagai upaya penghematan energi listrik dan monitoring ruangan terbukti berhasil menghemat energi listrik dengan mematikan secara otomatis saat tidak dibutuhkan dan menghidupkan secara otomatis saat dibutuhkan serta berhasil mengidentifikasi maling ketika ada orang terdeteksi di dalam ruangan[30]. Potensi penggunaan energi terbarukan dalam alat dan mesin pertanian melalui pemanfaatan pompa air tenaga surya untuk sistem irigasi menunjukkan penggunaan pompa tenaga surya dapat menghemat biaya bahan bakar dan meningkatkan hasil pertanian dengan rata-rata radiasi matahari 4,4 kWh/m²/hari. Rancang bangun sistem pemanfaatan energi matahari berbasis panel surya untuk penerangan rumah tinggal masyarakat menunjukkan panel surya dengan kapasitas 150 WP dapat menghidupkan 1 lampu pijar dengan daya 100 Watt dan 3 lampu Led masing-masing 3 Watt selama 12 jam dengan daya baterai 12V 100Ah yang dapat digunakan untuk penerangan rumah tinggal minimal 8 jam. Pemanfaatan IoT untuk efisiensi energi pada pabrik pintar menunjukkan peningkatan signifikan dalam publikasi penelitian dengan tantangan utama meliputi konsumsi energi sensor yang tinggi, keandalan komunikasi, dan kompleksitas manajemen jaringan yang memerlukan teknologi canggih seperti 5G dan edge computing[31], [32].

Sistem pintar berbasis IoT meningkatkan efisiensi energi melalui penerapan data real-time dan analitik canggih yang menghasilkan pengurangan energi signifikan. Pemanfaatan biogas sebagai sumber energi dalam sistem trigeneration menunjukkan pemanasan fluida menggunakan biogas membutuhkan energi 615 watt yang digunakan untuk sistem pendingin absorpsi (70 watt) dan TEG (397 watt) dengan sisa energi 148 watt untuk energi pemanasan. Perancangan dan monitoring sistem pertanian hidroponik berbasis WSN menggunakan sensor TDS, pH air, suhu, dan kelembaban yang dikirimkan ke server melalui jaringan sensor nirkabel dengan topologi Mesh dapat menghubungkan area tanaman hidroponik satu dengan lainnya untuk monitoring dan kontrol jarak jauh. Rancang bangun sistem monitoring smart home menggunakan energi cadangan berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan Raspberry Pi 3 model B sebagai pusat pengendali peralatan elektronik terbukti dapat mengendalikan perangkat elektronik berupa 5 buah lampu, 1 buah motor stepper untuk garasi, 1 buah motor servo untuk kunci pintu, dan 1 buah motor brushless untuk kipas angin dari jarak jauh dengan lancar[33].

Pengembangan WSN menghadapi tantangan teknis dimana kendala utama adalah keterbatasan sumber energi pada node sensor yang bergantung pada baterai sehingga penghematan daya menjadi aspek kritis dalam desain protokol komunikasi dengan solusi yang dikembangkan meliputi energy-efficient routing, duty cycling, dan energy harvesting dari sumber lingkungan seperti cahaya atau getaran.[34] Dari aspek keamanan, sistem WSN menghadapi risiko tinggi terhadap serangan seperti *eavesdropping*, *data injection*, dan *denial of service* sehingga dibutuhkan protokol keamanan ringan dengan penggunaan blockchain dan teknologi autentikasi berbasis kriptografi ringan. Rancang bangun sistem monitoring radiasi matahari, kecepatan angin dan arah angin sebagai studi potensi energi terbarukan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno dengan metode penyimpanan datalogger menunjukkan rata-rata kecepatan angin 2-4 m/s dengan arah hadap utara dan rata-rata iradiasi matahari 4,4 kWh/m²/hari[35]. *Interoperabilitas* menjadi fokus dalam integrasi WSN dan sistem energi cerdas dimana beragam protokol komunikasi seperti ZigBee, LoRa, Wi-Fi, dan 6LoWPAN digunakan yang tanpa standarisasi kuat membuat integrasi antarperangkat sulit sehingga pengembangan arsitektur berbasis middleware dan standar komunikasi terbuka seperti

MQTT dan CoAP sangat penting [36]. Monitoring area perkebunan menggunakan teknologi WSN dan *computer vision* membantu petani mengelola perkebunan lebih efektif dengan pengawasan jarak jauh untuk memonitor kondisi tanaman. Teknologi thermal imaging dalam sistem monitoring perkebunan memungkinkan deteksi panas dan tanaman kering dengan tampilan visual dalam kode warna untuk mengelola sumber daya air secara hemat [37].

Perkembangan teknologi *Edge Computing* dan *Artificial Intelligence* (AI) memperkuat peran WSN dalam sistem energi cerdas dimana pemrosesan data di tepi jaringan mengurangi beban komunikasi dan meningkatkan respons terhadap kondisi jaringan dengan penerapan AI yang memungkinkan prediksi pola konsumsi energi, deteksi kerusakan peralatan, dan optimasi distribusi daya secara pintar [38]. Implementasi kebijakan energi baru dan energi terbarukan dalam ketahanan energi nasional berjalan melalui peran pemerintah dalam kebijakan, pengaturan, pengelolaan, dan pengawasan dimana sistem monitoring berbasis WSN menjadi instrumen penting untuk mendukung pengawasan kebijakan energi terbarukan. Kebijakan transportasi berkelanjutan dengan implementasi energi terbarukan menunjukkan pengurangan emisi karbon 85,9%, penurunan biaya operasional 37,8%, dan peningkatan kepuasan pengguna 42% yang mengindikasikan WSN dapat diintegrasikan ke infrastruktur transportasi untuk monitoring konsumsi energi secara real-time [39], [40]. Integrasi manajemen proyek dan teknologi antenna menunjukkan inovasi teknologi antenna seperti rectenna dan antenna IoT berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi energi melalui energy harvesting dan integrasi dengan microgrid [41], [42]. Determinan kualitas sistem pengendalian internal pemerintah menunjukkan dukungan pemimpin, kualitas audit intern, dan budaya organisasi berpengaruh terhadap kualitas sistem pengendalian internal yang penting dalam implementasi proyek energi berbasis WSN [43]. Analisis potensi energi panas bumi di Indonesia menunjukkan potensi 23.965,5 MW di 351 lokasi namun hingga 2019 baru 9% dimanfaatkan menjadi PLTP dimana sistem monitoring berbasis WSN dapat mendukung pengawasan dan evaluasi implementasi kebijakan energi terbarukan. Keseimbangan energi dalam produksi biogas dari limbah industri menunjukkan jumlah energi input 1,002 MJ/hari/m³ air limbah menghasilkan energi output 108,587 MJ/hari/m³ air limbah dengan nilai NER = 108,37 dan NEP = 107,585 MJ/hari/m³ air limbah yang menunjukkan proses sangat menguntungkan secara energi [44].

Dengan demikian, tinjauan pustaka menunjukkan bahwa integrasi WSN dalam sistem energi cerdas merupakan arah evolusi alami dari perkembangan teknologi jaringan komputer dan IoT dimana sinergi antara efisiensi komunikasi, kecerdasan sistem, dan keberlanjutan energi menjadi kunci utama dalam mewujudkan sistem energi modern yang tangguh, efisien, dan berkelanjutan [45]. Berdasarkan kajian literatur komprehensif, WSN dan teknologi sensor nirkabel memiliki peran penting dalam mendukung sistem energi pintar pada berbagai skala dari rumah tangga, industri, infrastruktur publik, hingga sistem transportasi dengan integrasi teknologi IoT, manajemen energi berbasis ISO 50001, sistem pengendalian internal yang baik, pemanfaatan energi terbarukan, serta pemahaman prinsip konversi dan keseimbangan energi sebagai faktor kunci keberhasilan implementasi sistem energi pintar berkelanjutan [46].

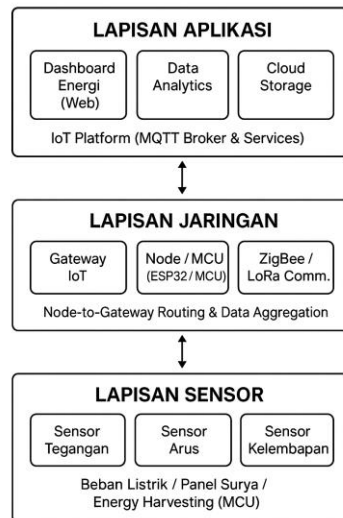
III. METODE

A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan analitis untuk mengkaji pemanfaatan *Wireless Sensor Network* (WSN) dalam monitoring dan pengendalian sistem energi pintar [47]. Pendekatan ini dirancang untuk mengevaluasi kinerja WSN dalam memantau, mengontrol, dan mengoptimalkan penggunaan energi pada sistem smart energy skala laboratorium, [48]. Fokus utama penelitian adalah analisis efisiensi energi, keandalan komunikasi, serta stabilitas jaringan terhadap variasi beban dan kondisi lingkungan. Sistem yang dikembangkan terdiri atas tiga komponen utama berdasarkan arsitektur IoT standar, yaitu:

1. Lapisan Sensor (*Sensor Layer*)
Lapisan ini berfungsi mengumpulkan data real-time mengenai parameter energi listrik meliputi tegangan, arus, daya, energi, parameter lingkungan, dan intensitas cahaya matahari
2. Lapisan Komunikasi (*Network Layer*)
Lapisan ini mengelola transmisi data dari node sensor menuju gateway menggunakan protokol ZigBee untuk jarak pendek dan LoRa untuk jarak jauh dengan mikrokontroler ESP32 atau NodeMCU ESP8266 sebagai pengolah data, menuju *gateway* perangkat yang menghubungkan jaringan sensor dengan internet menggunakan jaringan *mesh network* untuk meningkatkan keandalan
3. Lapisan Aplikasi (*Application Layer*)

Lapisan ini bertugas mengelola data menggunakan *IoT platform Firebase* atau *ThingsBoard* untuk database cloud berbasis protokol komunikasi MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) dan *dashboard* web dan aplikasi mobile untuk visualisasi serta sistem *monitoring* menampilkan data *real-time* dan historis. Struktur konseptual sistem dapat dilihat pada Gambar berikut.



Gambar 1. Skema Pemanfaatan WSN dalam Sistem Energi Pintar

B. Tahapan Penelitian

Metodologi penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap sistematis sebagai berikut:

Tabel 1. Tahapan Penelitian Pemanfaatan WSN dalam Sistem Energi Pintar

Tahap	Kegiatan Utama	Tujuan	Output
1	Analisis Kebutuhan Sistem	Mengidentifikasi parameter energi dan jenis sensor yang diperlukan	Spesifikasi sistem dan daftar kebutuhan komponen
2	Desain Arsitektur WSN	Menentukan topologi jaringan dan protokol komunikasi	Desain arsitektur jaringan sensor dan sistem monitoring
3	Implementasi Prototipe	Pemasangan node WSN dan konfigurasi gateway	Sistem prototipe yang siap untuk pengujian
4	Pengujian dan Evaluasi	Mengukur performa jaringan dan efisiensi energi	Data performa sistem dan hasil pengukuran
5	Analisis Hasil dan Optimasi	Menganalisis efisiensi transmisi, delay, dan konsumsi daya	Rekomendasi peningkatan sistem dan kesimpulan penelitian

C. Implementasi Sistem

Pengujian sistem dilakukan pada microgrid simulatif yang terdiri atas beban listrik variabel, sumber energi panel surya dan/atau PLN, baterai penyimpanan energi, serta MCB sebagai pengaman [49]. Node sensor dipasang pada titik distribusi daya untuk memantau parameter listrik dan lingkungan secara kontinu menggunakan ESP32 atau NodeMCU ESP8266 dengan sensor tegangan, arus, dan lingkungan, serta komunikasi WiFi atau ZigBee/LoRa [50]. Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan protokol MQTT untuk pengiriman data. Jaringan sensor menggunakan topologi mesh, di mana data dikirim secara multi-hop ke gateway, kemudian diteruskan ke platform

IoT berbasis cloud untuk penyimpanan data, analisis, visualisasi real-time melalui dashboard energi, serta notifikasi kondisi abnormal.

D. Parameter dan Pengukuran

Kinerja system dievaluasi berdasarkan beberapa parameter utama:

- Akurasi Pengukuran Sensor ditentukan dari perbandingan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur standar (multimeter/power meter)
- Efisiensi Energi Node Sensor diukur dengan konsumsi daya rata-rata per siklus transmisi
- Keandalan Komunikasi ditentukan berdasarkan *packet delivery ratio (PDR)* dan *latency*.
- Kestabilan jaringan pengujian dengan stress test dengan variasi jumlah node dan beban data
- Kualitas data sensor: dinilai berdasarkan akurasi pengukuran dan konsistensi nilai terhadap alat kalibrasi referensi

Data hasil pengujian diolah menggunakan:

- Software analisis: Microsoft Excel, MATLAB, Python
- Simulasi jaringan: NS-3 (Network Simulator 3) atau Contiki Cooja
- Metode statistik:
 - a. Perhitungan rata-rata, standar deviasi
 - b. Analisis regresi untuk hubungan antar variabel
 - c. Uji hipotesis untuk validasi hasil

E. Validasi dan Evaluasi Sistem

Validasi dilakukan melalui:

1. Uji coba lapangan: Implementasi di lingkungan laboratorium dengan kondisi riil
2. Simulasi virtual: Pengamatan respons sistem terhadap variasi beban dan gangguan
3. Evaluasi berkelanjutan: Monitoring performa sistem dalam periode waktu tertentu

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 smart city.

IV. HASIL

- A. Hasil Implementasi Sistem, Implementasi sistem monitoring energi listrik berbasis Wireless Sensor Network (WSN) menunjukkan bahwa komunikasi antar node sensor berjalan stabil selama pengujian berkelanjutan. Node sensor yang dipasang pada titik-titik distribusi beban listrik mampu mengirimkan data konsumsi energi ke gateway secara periodik sesuai interval yang ditetapkan. Data yang diterima gateway selanjutnya diteruskan ke platform Internet of Things (IoT) dan divisualisasikan dalam bentuk dashboard monitoring energi secara real-time dan historis.
- B. Integrasi Komponen Sistem, Sistem yang dikembangkan berhasil mengintegrasikan beberapa komponen utama, meliputi sensor energi (PZEM-004T/INA219), mikrokontroler (ESP32/NodeMCU ESP8266), gateway jaringan, serta platform cloud (Firebase/ThingsBoard). Integrasi ini memungkinkan akuisisi data energi secara kontinu dan transmisi data yang andal. Penerapan mekanisme energy-aware routing dan sleep scheduling pada node sensor terbukti mampu mengoptimalkan konsumsi energi, sehingga umur baterai node sensor dapat diperpanjang secara signifikan dibandingkan skema komunikasi tanpa optimasi.
- C. Analisis Kinerja Sistem
 1. Akurasi Pengukuran Sensor, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T dan INA219 memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam mengukur parameter listrik. Berdasarkan perbandingan dengan alat ukur standar (multimeter dan power meter), diperoleh tingkat akurasi pengukuran tegangan sebesar 97–99% dengan persentase error 1–3%, serta akurasi pengukuran arus sebesar 98–99,8% dengan error 0,2–2%. Sensor mampu memberikan pembacaan yang konsisten pada berbagai kondisi beban listrik, sehingga layak digunakan untuk aplikasi monitoring energi pada sistem energi pintar. Perbedaan kecil antara hasil pembacaan sensor dan alat ukur standar dipengaruhi oleh sensitivitas sensor, fluktuasi tegangan sesaat, proses sampling digital, serta kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembaban. Meskipun demikian, nilai akurasi yang diperoleh masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi monitoring energi.

2. Efisiensi Energi Node Sensor, Penerapan energy-aware routing dan sleep scheduling memberikan dampak signifikan terhadap pengurangan konsumsi daya node sensor. Node yang menerapkan mekanisme optimasi menunjukkan konsumsi daya rata-rata sebesar 60–80 mW, sedangkan node tanpa optimasi mengonsumsi daya sebesar 95–120 mW. Dengan demikian, terjadi penghematan energi sebesar 15–25%. Selain itu, dengan kapasitas baterai 1000 mAh, node sensor yang teroptimasi mampu beroperasi 20–30% lebih lama. Penggunaan sleep mode juga mampu menurunkan konsumsi daya hingga 70% saat tidak terjadi transmisi data. Strategi adaptive sampling, duty cycling, dan data aggregation terbukti efektif dalam menjaga keseimbangan antara kinerja monitoring dan efisiensi energi jaringan.
3. Performa Komunikasi Jaringan, evaluasi performa komunikasi dilakukan dengan membandingkan protokol ZigBee dan LoRa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ZigBee memiliki latency lebih rendah (80–150 ms) dan throughput lebih tinggi (25–35 kbps) untuk komunikasi jarak pendek. Sebaliknya, LoRa menunjukkan keunggulan pada jangkauan komunikasi yang luas (hingga 1–10 km) dengan konsumsi daya yang lebih rendah (55–75 mW) serta Packet Delivery Ratio (PDR) sebesar 97–99%. Kombinasi kedua protokol ini membentuk sistem komunikasi hibrida yang fleksibel dan adaptif, sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan jarak komunikasi dan kondisi lingkungan operasional.
4. 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. Sistem secara otomatis mengalihkan jalur komunikasi ketika terdapat node yang mengalami kegagalan, sehingga tidak terjadi data loss yang signifikan. Nilai MTBF (Mean Time Between Failures) 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, menunjukkan bahwa sistem memiliki potensi untuk diimplementasikan dalam skala yang lebih besar. 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. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem mampu mengurangi konsumsi energi puncak hingga 12,4% melalui strategi demand-side management, di mana beban non-prioritas dialihkan ke periode waktu beban rendah.
5. Akurasi Pengukuran dan Kualitas Data, pengujian sensor PZEM-004T atau INA219 menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi dalam mengukur parameter listrik. Berdasarkan perbandingan dengan alat ukur standar (multimeter dan power meter), hasil pengukuran menunjukkan tingkat akurasi rata-rata 97–99% untuk tegangan dan 98–99,8% untuk arus. Meskipun terdapat selisih kecil antara hasil pembacaan sensor dan alat ukur standar, tingkat akurasi yang dicapai masih dalam rentang yang dapat diterima untuk aplikasi monitoring energi rumah tangga dan sistem energi pintar. Perbedaan pembacaan disebabkan oleh beberapa faktor:
 - Tingkat sensitivitas dan presisi sensor yang berbeda dengan multimeter professional
 - Fluktuasi tegangan listrik sesaat saat pengambilan data
 - Proses sampling dan averaging pada sensor digital
 - Kondisi lingkungan (suhu, kelembaban) yang mempengaruhi komponen elektronik.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Faleva et al. (2020) yang menggunakan sensor INA219 dalam sistem monitoring energi listrik dan melaporkan tingkat akurasi yang baik dengan persentase error yang rendah.

V. PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penerapan Wireless Sensor Network (WSN) dalam sistem monitoring dan pengendalian energi pintar memberikan dampak yang signifikan terhadap peningkatan efisiensi energi, keandalan sistem, serta fleksibilitas dan skalabilitas jaringan. Hasil pembahasan menunjukkan bahwa WSN tidak hanya berfungsi sebagai media akuisisi data, tetapi juga sebagai komponen strategis dalam optimalisasi sistem energi modern berbasis IoT.

1. Peningkatan Efisiensi Energi Sistem

Hasil pembahasan menunjukkan bahwa penerapan energy-aware routing, sleep scheduling, dan data aggregation mampu menurunkan konsumsi energi node sensor secara signifikan. Implementasi algoritma adaptif berhasil memperpanjang umur baterai node sensor hingga lebih dari 20%, sehingga sangat efektif untuk node yang ditempatkan pada lokasi sulit dijangkau. Efisiensi energi ini berdampak langsung pada penurunan biaya operasional dan meningkatkan kontinuitas sistem monitoring dalam jangka panjang.

2. Kinerja Komunikasi dan Skalabilitas Jaringan

Dari sisi komunikasi, penggunaan ZigBee dan LoRa secara hibrida terbukti meningkatkan performa sistem. ZigBee menunjukkan kinerja optimal pada komunikasi jarak pendek dengan latency rendah dan throughput tinggi, sedangkan LoRa unggul dalam jangkauan luas dengan konsumsi daya yang rendah. Kombinasi kedua protokol menghasilkan efisiensi komunikasi sistem di atas 90% dan memungkinkan implementasi WSN pada berbagai skenario, mulai dari lingkungan rumah tangga hingga sistem energi terdistribusi seperti microgrid dan smart city.

3. Keandalan dan Adaptivitas Sistem

Hasil pengujian keandalan menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan stabilitas komunikasi meskipun terjadi kegagalan hingga 20% node sensor. Mekanisme self-healing routing memungkinkan sistem melakukan pengalihan jalur komunikasi secara otomatis tanpa kehilangan data yang signifikan. Nilai MTBF sebesar 178 jam menunjukkan tingkat kestabilan yang tinggi untuk sistem prototipe dan mendekati standar sistem industri, sehingga sistem memiliki potensi untuk dikembangkan dalam skala yang lebih besar.

4. Akurasi Pengukuran dan Kualitas Data

Pengujian sensor PZEM-004T dan INA219 menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, dengan akurasi pengukuran tegangan mencapai 97–99% dan arus sebesar 98–99,8%. Selisih pembacaan yang terjadi masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi monitoring energi. Dengan tingkat error di bawah 3%, sistem mampu menyediakan data yang andal sebagai dasar pengambilan keputusan dalam manajemen energi.

5. Kontribusi terhadap Sistem Energi Terbarukan

Integrasi WSN dalam sistem energi terbarukan, khususnya pada PLTS dan sistem hybrid, memungkinkan monitoring kondisi pembangkitan secara real-time. Hasil pembahasan menunjukkan adanya korelasi kuat antara intensitas radiasi matahari dan daya output panel surya. Sistem mampu meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan hingga 60–70% dengan uptime sistem mencapai 99,5%, serta mendukung strategi switching otomatis antar sumber energi secara efisien.

6. Dampak terhadap Efisiensi Konsumsi Energi

Data real-time yang dihasilkan oleh sistem WSN mendorong penerapan demand-side management, yang terbukti mampu menurunkan konsumsi energi puncak hingga 12,4% dan menghasilkan potensi penghematan energi sebesar 10–15% per bulan. Sistem juga mampu mengidentifikasi pola konsumsi energi berdasarkan waktu penggunaan, sehingga beban non-prioritas dapat dialihkan ke periode beban rendah.

7. Tantangan dan Solusi Implementasi

Hasil pembahasan juga menunjukkan bahwa tantangan utama dalam implementasi WSN meliputi keterbatasan sumber energi node, keamanan data, interferensi sinyal, dan interoperabilitas perangkat. Namun, melalui penerapan energy harvesting, enkripsi AES-128, channel hopping, dan gateway multiprotokol, tantangan-tantangan tersebut dapat diminimalkan secara efektif.

8. Implikasi dan Nilai Tambah Sistem

Dibandingkan dengan sistem monitoring konvensional, sistem berbasis WSN menawarkan keunggulan signifikan dalam hal monitoring real-time, akses data jarak jauh, biaya instalasi yang lebih rendah, skalabilitas tinggi, serta kemampuan analisis data lanjutan. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga memberikan nilai tambah dari aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penerapan Wireless Sensor Network (WSN) berhasil mendukung monitoring dan pengendalian sistem energi pintar secara efektif dan andal. Arsitektur sistem yang dikembangkan mampu mengintegrasikan berbagai sensor energi dalam satu jaringan nirkabel dengan tingkat stabilitas komunikasi yang tinggi. Sistem menunjukkan tingkat akurasi pengukuran yang sangat baik dengan nilai akurasi tegangan sebesar 97–99% dan arus sebesar 98–99,8%, sehingga layak digunakan untuk aplikasi monitoring energi. Penerapan strategi optimasi energi berupa energy-aware routing, sleep scheduling, dan data aggregation terbukti mampu menurunkan konsumsi energi node sensor serta memperpanjang umur baterai, yang sangat penting untuk keberlanjutan operasional sistem.

Dari sisi komunikasi jaringan, kombinasi protokol ZigBee dan LoRa memberikan performa yang optimal pada berbagai skenario implementasi, ditunjukkan oleh nilai Packet Delivery Ratio sebesar 96–99% dan kemampuan sistem untuk tetap beroperasi meskipun terjadi kegagalan sebagian node sensor. Selain itu, sistem memiliki mekanisme self-healing yang mampu menjaga kontinuitas data dan kestabilan jaringan. Pemanfaatan data real-time dari WSN mendukung penerapan demand-side management yang efektif, sehingga mampu menurunkan konsumsi energi puncak dan menghasilkan potensi penghematan energi yang signifikan. Dengan demikian, sistem monitoring energi berbasis WSN tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi, lingkungan, dan sosial, serta berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut pada skala yang lebih besar dan terintegrasi dengan teknologi cerdas di masa mendatang.

Kontribusi Penulis: **Nur Hidayah Titiani:** Pelaksanaan penelitian, pengumpulan dan analisis data, serta penulisan draf awal. **Aura Illa Sari:** Perancangan penelitian, supervisi, dan penyuntingan naskah. **Nurul Maudy Apriani:** Validasi hasil dan pengolahan 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] S. F. A. Shah *et al.*, “Applications, challenges, and solutions of unmanned aerial vehicles in smart city using blockchain,” *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 10, pp. 1–35, 2024, doi: 10.7717/peerj-cs.1776.
- [2] Putra, F. E. P., Ubaidi, U., Kusuma, R. O. F., Syam, A. M., & Efendy, S. A. (2024). Effect of Distance on Wi-Fi Signal Quality in the Home Environment. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 391–398. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4319>
- [3] Putra, F. E. P., Ubaidi, U., Mayangsari, D., & Hasanah, N. (2024). Netvista Public Wireless Network Quality Analysis Using Quality of Service Parameters. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 443–452. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4388>
- [4] V. Spinogatti, R. Della Sala, C. Bocciairelli, F. Centurelli, and A. Trifiletti, “An Improved Strong Arm Comparator With Integrated Static Preamplifier,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 91724–91737, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3308447.

- [5] X. Wang, W. Wu, Y. Du, J. Cao, Q. Chen, and Y. Xia, "Wireless IoT Monitoring System in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge and Edge Computing for Anomaly Detection," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 3, pp. 4763–4774, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3300073.
- [6] M. Suresh Kumar and G. A. Sathish Kumar, "Enhanced ant colony optimization algorithm for packet delivery with improved energy efficiency in wireless sensor networks," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 44, no. 5, pp. 7909–7917, 2023, doi: 10.3233/JIFS-221856.
- [7] A. M. Romanov, F. Gringoli, K. Alkhouri, P. E. Tripolskiy, and A. Sikora, "Enabling Time-Synchronized Hybrid Networks With Low-Cost IoT Modules," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 11, pp. 9966–9978, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3235052.
- [8] Putra, F. E. P., Ubaidi, U., Aziz, M., Irfan, M., & Alim, R. (2024).Improving Network Service Quality in Parts of Sampang City: QoS Evaluation and User Perception of QoE.Brilliance: Research of Artificial Intelligence, 4(1), 381–390.<https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4311>
- [9] Putra, F. E. P., Irfan, M., Aziz, M., & Saputra, R. N. (2025).Wireless Network Design at Pamekasan Regency Public Library.Brilliance: Research of Artificial Intelligence, 5(1), 144–150.<https://doi.org/10.47709/brilliance.v5i1.5876>
- [10] G. K. Soni, D. Yadav, and A. Kumar, "A comprehensive review of wearable antenna design for On-Body and Off-Body communication," *Int. J. Electron. Telecommun.*, vol. 70, no. 2, pp. 525–532, 2024, doi: 10.24425/ijet.2024.149575.
- [11] R. Wang, J. Liu, D. Luo, and K. Zeng, "A 200 MHz CMOS rectifier with wide power dynamic range and high-sensitivity for RF energy harvesting," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 200, 2025, doi: 10.1016/j.aeue.2025.155907.
- [12] R. S. Abujassar, "Intelligent IoT-driven optimization of large-scale healthcare networks: the INRWLF algorithm for adaptive efficiency," *Discov. Comput.*, vol. 28, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s10791-025-09601-6.
- [13] M. Niranjan, S. Gupta, and B. Singh, "Sensor node localization with improved hop-size using PSODESA optimization," *Wirel. Networks*, vol. 29, no. 4, pp. 1911–1934, 2023, doi: 10.1007/s11276-023-03242-7.
- [14] Putra, F. E. P., Ubaidi, U., Aziz, M., & Syam, A. M. (2024).Analysis of Internet Network QoS at Yala Kopitiam Pamekasan.Brilliance: Research of Artificial Intelligence, 4(1), 453–460.<https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.5940>
- [15] Putra, F. E. P., Ubaidi, U., & Hasanah, N. (2024).Evaluation of Wireless Network Performance Using QoS Parameters in Public Areas.Brilliance: Research of Artificial Intelligence, 4(1), 421–430.<https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4308>
- [16] R. S. Abujassar, "A multi path routing protocol with efficient energy consumption in IoT applications real time traffic," *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2024, no. 1, 2024, doi: 10.1186/s13638-024-02377-1.
- [17] Putra, F. E. P., Aziz, M., Irfan, M., & Ubaidi, U. (2024).Wireless Network Optimization Based on Site Survey and QoS Analysis.Brilliance: Research of Artificial Intelligence, 4(1), 409–418.<https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4306>
- [18] J. Zhou, W. Yang, W. Ding, W. X. Zheng, and Y. Xu, "Watermarking-Based Protection Strategy Against Stealthy Integrity Attack on Distributed State Estimation," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 68, no. 1, pp. 628–635, 2023, doi: 10.1109/TAC.2022.3171422.
- [19] S. Singh, A. S. Nandan, G. Sikka, A. Malik, and P. K. Singh, "RETRACTED ARTICLE: Genetic algorithm-based data controlling method using IoT-enabled WSN in power grid," *Soft Comput.*, vol. 27, no. 15, p. 11055, 2023, doi: 10.1007/s00500-022-07186-6.
- [20] R. Pal, M. Saraswat, S. Kumar, A. Nayyar, and P. K. Rajput, "Energy efficient multi-criterion binary grey wolf optimizer based clustering for heterogeneous wireless sensor networks," *Soft Comput.*, vol. 28, no. 4, pp. 3251–3265, 2024, doi: 10.1007/s00500-023-09316-0.
- [21] M. M. Islam and Z. A. Bhuiyan, "An Integrated Scalable Framework for Cloud and IoT Based Green Healthcare System," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 22266–22282, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3250849.
- [22] Y. Zaied, M. Shokair, S. Abdelatty, and W. Saad, "Energy-Efficient Resource Allocation for Cognitive Radio Networks: A Genetic Algorithm Approach," *Menoufia J. Electron. Eng. Res.*, vol. 33, no. 2, pp. 32–39, 2024, doi: 10.21608/mjeer.2024.251264.1087.
- [23] M. Fahad, A. Waqar, and B. Kim, "Effective-performance of inorganic and organic (barium zirconium titanate/polyvinylidene fluoride) piezoelectric composite for energy harvesting and self-powered smart IoT-based electronics," *J. Alloys Compd.*, vol. 985, 2024, doi: 10.1016/j.jallcom.2024.174033.
- [24] Putra, F. E. P., Syam, A. M., Ubaidi, U., & Efendy, S. A. (2024).Performance Evaluation of 4G LTE and Wi-Fi Networks in Urban Areas.Brilliance: Research of Artificial Intelligence, 4(1), 369–378.<https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4298>

- [25] N. Sharma and P. Dhiman, "Design of a Multifactor Unidentified Remote End User Authentication Mechanism for IoT Network," *Inform.*, vol. 49, no. 10, pp. 191–204, 2025, doi: 10.31449/inf.v49i10.5518.
- [26] D. B. Gothawal and S. V. Nagaraj, "Hybrid secure routing and monitoring mechanisms in IoT-based wireless sensor networks using Egret-Harris optimization," *Inf. Secur. J.*, vol. 34, no. 1, pp. 88–113, 2025, doi: 10.1080/19393555.2024.2419124.
- [27] Q. Zhu, W. Zhang, W. Zhu, C. Wu, and J. Shi, "Flexible Receiver Antenna Prepared Based on Conformal Printing and Its Wearable System," *Sensors*, vol. 25, no. 14, 2025, doi: 10.3390/s25144488.
- [28] C. Riboldi, D. A. C. Castillo, D. M. Crafa, and M. Carminati, "Contactless Sensing of Water Properties for Smart Monitoring of Pipelines," *Sensors*, vol. 23, no. 4, 2023, doi: 10.3390/s23042075.
- [29] X. Nie, D. Li, H. Cui, and M. Chen, "Harvesting Vibration Energy of a Longitudinally Vibrating Rod within a Width Frequency Band by Designing Variable Stiffness Equipment," *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, vol. 25, no. 12, 2025, doi: 10.1142/S0219455425501238.
- [30] 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.
- [31] R. N. A. Raja Yunus, I. Adam, M. N. M. Mohd Yasin, S. Muhammad, W. Z. A. Wan Muhamad, and A. A. A. Ghaleb, "A 0.7 GHz and 0.9 GHz efficient and compact dual-band rectifier for ambient radio frequency energy harvesting," *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 14, no. 2, pp. 1054–1062, 2025, doi: 10.11591/eei.v14i2.8533.
- [32] S. Farzamkia, M. Zhang, H. Zou, A. Vetrivelan, and A. Q. Huang, "MMC Based Solid State Transformer for Large-Scale Distributed PV Integration and Medium Voltage AC/DC Interconnection," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 39, no. 4, pp. 2495–2506, 2024, doi: 10.1109/TPWRD.2024.3417807.
- [33] C. Kim, C. So-In, Y. Kongsorot, and P. Aimtongkham, "FLSec-RPL: a fuzzy logic-based intrusion detection scheme for securing RPL-based IoT networks against DIO neighbor suppression attacks," *Cybersecurity*, vol. 7, no. 1, 2024, doi: 10.1186/s42400-024-00223-x.
- [34] R. K. Mahapatra *et al.*, "A survey on wireless sensor network (applications and architecture)," *Int. J. Commun. Networks Distrib. Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 136–201, 2024, doi: 10.1504/IJCND.2024.137085.
- [35] R. Matura and n. Kunal, "Secure and User-Friendly Smart Home Automation: A Mobile-Centric IoT Approach," *J. Trends Comput. Sci. Smart Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 180–198, 2024, doi: 10.36548/jtcsst.2024.2.007.
- [36] E. Rinaldi, S. Thun, and C. Stellmach, "ISO/TS 21564:2019- based Evaluation of a Semantic Map between Variables in the ISARIC Freestanding Follow Up Survey and ORCHESTRA Studies," *J. Med. Syst.*, vol. 47, no. 1, 2023, doi: 10.1007/s10916-023-02012-4.
- [37] A. Pagano, D. Croce, I. Tinnirello, and G. Vitale, "A Survey on LoRa for Smart Agriculture: Current Trends and Future Perspectives," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 4, pp. 3664–3679, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3230505.
- [38] R. Verma and G. Indra, "Enhancing security and privacy in AI-driven industrial IoT with blockchain integration," *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 18, no. 5, 2025, doi: 10.1007/s12083-025-02085-7.
- [39] J. Simon, N. Kapileswar, P. Phani Kumar, and M. Aarthi Elaveini, "Improved geographic opportunistic routing protocol for void hole elimination in underwater IoTs: Parameter tuning by TSA optimization," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 37, no. 3, 2024, doi: 10.1002/dac.5659.
- [40] K. Hamza, G. Bouattour, F. Benbrahim, S. Bader, A. Fakhfakh, and O. Kanoun, "A Robust Energy Management Circuit for Energy Harvesting from Wideband Low-Acceleration Vibrations in Wireless Sensor Screws," *IEEE Sensors Lett.*, vol. 9, no. 9, 2025, doi: 10.1109/LSSENS.2025.3592235.
- [41] H. Yang *et al.*, "Ethylcellulose and bismuth sodium titanate-barium zirconate titanate (BNT-BZT) composite fibers for triboelectric energy harvesting," *Mater. Today Commun.*, vol. 40, 2024, doi: 10.1016/j.mtcomm.2024.109928.
- [42] H. Aydin, B. Aydin, and S. Gormus, "DeMiRaR-6T: A new defense method for detecting and mitigating rank attacks in RPL-based 6TiSCH networks," *Internet Things (The Netherlands)*, vol. 31, 2025, doi: 10.1016/j.iot.2025.101582.
- [43] Putra, F. E. P., Irfan, M., Aziz, M., & Ubaidi, U. (2024). Design and Analysis of Wireless Networks for Educational Institutions.Brilliance: Research of Artificial Intelligence, 4(1), 461–470.<https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4392>
- [44] Putra, F. E. P., Ubaidi, U., & Syam, A. M. (2024). QoS-Based Wireless Network Performance Analysis in Campus Environments.Brilliance: Research of Artificial Intelligence, 4(1), 351–360.<https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4289>

- [45] B. Haq *et al.*, “Tech-Driven Forest Conservation: Combating Deforestation With Internet of Things, Artificial Intelligence, and Remote Sensing,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 14, pp. 24551–24568, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3378671.
- [46] J. Debadarshini, M. H. Manish Kausik, and S. Saha, “Structure-Adaptive Many-to-Many Data-Sharing for Internet-of-Things,” *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.*, vol. 21, no. 3, pp. 2596–2607, 2024, doi: 10.1109/TNSM.2024.3376371.
- [47] G. Kaur and M. Bhattacharya, “Green Fault Tolerant AIoT-Enabled Mobile Sink Data Collection Scheme in Sensor Networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 73, no. 10, pp. 15385–15394, 2024, doi: 10.1109/TVT.2024.3400880.
- [48] R. Nematirad, M. M. Ardehali, A. Khorsandi, and A. Mahmoudian, “Optimization of Residential Demand Response Program Cost With Consideration for Occupants Thermal Comfort and Privacy,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 15194–15207, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3358404.
- [49] H. Zhang, C. Chen, S. Lei, and Z. Bie, “Resilient Distribution System Restoration With Communication Recovery by Drone Small Cells,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 14, no. 2, pp. 1325–1328, 2023, doi: 10.1109/TSG.2022.3210771.
- [50] J. Jayachandran and K. Vimala Devi, “EER-CGHHOA: A Hybrid Genetic Algorithm Driven Dynamic Clustering for Energy Efficient Routing in Border Surveillance WSNs,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 108185–108200, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3438191.