

Integrasi Wireless Sensor Network Berbasis ESP32 dengan Konektivitas 5G untuk Monitoring Lingkungan Real-Time

Kukuh Dwi Nur Cahyo ^{1)*} , M.Febri Dwidanasaputra ²⁾ , Kevin Ananda Puryanto Pratama ³⁾ 

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

¹⁾ kukuhdwinurcahyo10@gmail.com, ²⁾ febri.d.s.a19@gmail.com, ³⁾ marvinsteve60@gmail.com

Abstrak

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) mendorong pemanfaatan *Wireless Sensor Network* (WSN) untuk monitoring lingkungan, namun WSN konvensional masih menghadapi keterbatasan pada latensi, keandalan, dan skalabilitas jaringan, terutama untuk aplikasi real-time. Teknologi 5G menawarkan karakteristik latensi rendah, throughput tinggi, dan konektivitas masif yang berpotensi meningkatkan kinerja sistem monitoring lingkungan berbasis WSN. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi integrasi WSN berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G dalam mendukung sistem monitoring lingkungan secara real-time, khususnya dari aspek kinerja jaringan, efisiensi energi, dan performa sistem monitoring. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan studi kuantitatif. Sistem dirancang dalam bentuk prototipe yang terdiri dari node sensor ESP32, gateway 5G, dan server monitoring berbasis web. Pengujian dilakukan dengan mengukur parameter latensi end-to-end, throughput, *packet loss*, konsumsi energi node sensor, serta respons sistem monitoring. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan data sensor secara stabil dengan latensi rendah dan throughput yang konsisten melalui jaringan 5G. Tingkat *packet loss* yang diperoleh relatif rendah, sementara konsumsi energi node sensor tetap efisien berkat penerapan mekanisme *deep sleep*. Sistem monitoring berbasis web berhasil menampilkan data lingkungan secara real-time dan menyediakan notifikasi peringatan dini. Integrasi WSN berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G terbukti efektif dalam meningkatkan kinerja dan keandalan sistem monitoring lingkungan real-time. Sistem ini memenuhi tujuan penelitian dan layak dikembangkan lebih lanjut, terutama pada penelitian selanjutnya yang mengkaji skalabilitas jaringan, optimasi konsumsi energi, dan integrasi analitik cerdas berbasis kecerdasan buatan.

Kata Kunci: Wireless Sensor Network, ESP32, Jaringan 5G, Monitoring Lingkungan, Internet of Things.

Article history: Received 5 April 20XX, first decision 22 April 2025, accepted 22 August 2025, available online 28 October 2025

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi jaringan komputer dalam dua dekade terakhir telah mengalami lompatan yang sangat signifikan, terutama dengan hadirnya paradigma *Internet of Things* (IoT) yang memungkinkan berbagai objek fisik untuk saling terhubung, berkomunikasi, dan bertukar data secara cerdas. Salah satu komponen fundamental dalam ekosistem IoT adalah *Wireless Sensor Network* (WSN), yaitu sekumpulan node sensor yang mampu melakukan penginderaan, pemrosesan, dan pengiriman data secara nirkabel [1], [2], [3], [4]. WSN telah banyak diaplikasikan pada berbagai domain strategis seperti pertanian presisi, pemantauan kualitas udara dan air, sistem peringatan dini bencana, hingga *smart city*. Namun demikian, keterbatasan WSN konvensional, khususnya pada aspek jangkauan, latensi, keandalan koneksi, dan skalabilitas jaringan, masih menjadi tantangan utama dalam implementasi monitoring lingkungan secara real-time dan berskala luas. Di sisi lain, evolusi teknologi komunikasi seluler telah memasuki generasi kelima (5G) yang menawarkan karakteristik unggul dibandingkan generasi sebelumnya, antara lain kecepatan transmisi data yang sangat tinggi [5], [6], [7], [8], latensi ultra-rendah, kapasitas koneksi masif, serta tingkat keandalan yang lebih baik. Teknologi 5G dirancang tidak hanya untuk kebutuhan komunikasi manusia, tetapi juga untuk mendukung komunikasi mesin-ke-mesin (*machine-type communication*) yang menjadi tulang punggung sistem IoT modern. Dengan kemampuan tersebut, 5G membuka peluang baru untuk mengintegrasikan WSN dengan infrastruktur jaringan berperforma tinggi guna mendukung aplikasi monitoring lingkungan yang menuntut respons cepat dan akurasi data secara kontinu.

ESP32 sebagai salah satu *microcontroller* berbasis sistem-tertanam (*system on chip*) yang populer dalam pengembangan IoT, menawarkan keunggulan berupa konsumsi daya yang relatif rendah, kemampuan pemrosesan yang memadai, serta dukungan konektivitas nirkabel seperti Wi-Fi dan Bluetooth [9], [10], [11]. Kombinasi ESP32 dengan berbagai sensor lingkungan (suhu, kelembapan, kualitas udara, intensitas cahaya, dan parameter lainnya)

* Kukuh Dwi Nur Cahyo

menjadikannya solusi yang ekonomis dan fleksibel untuk membangun node WSN. Namun, pada implementasi skala besar atau pada lingkungan dengan kebutuhan *real-time monitoring* yang ketat, konektivitas Wi-Fi atau jaringan lokal saja sering kali tidak mencukupi, baik dari sisi jangkauan geografis maupun kestabilan komunikasi data [12], [13], [14], [15]. Integrasi WSN berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G menjadi pendekatan yang menjanjikan untuk menjawab permasalahan tersebut. Dengan memanfaatkan jaringan 5G sebagai *backhaul*, data yang dikumpulkan oleh node-node sensor dapat dikirimkan ke pusat pemrosesan atau *cloud server* secara cepat dan andal, bahkan dari lokasi yang terpencil. Hal ini sangat relevan untuk sistem monitoring lingkungan real-time, di mana keterlambatan data (*delay*) atau kehilangan paket (*packet loss*) dapat berdampak signifikan terhadap kualitas pengambilan keputusan, misalnya dalam deteksi dini pencemaran lingkungan atau mitigasi bencana alam [16], [17], [18], [19].

Selain aspek teknis, monitoring lingkungan real-time juga memiliki urgensi yang tinggi dari sudut pandang keberlanjutan dan kebijakan publik. Perubahan iklim, peningkatan polusi, dan degradasi lingkungan menuntut sistem pemantauan yang akurat, berkelanjutan, dan mampu menyediakan data secara langsung kepada pemangku kepentingan. Integrasi WSN dengan 5G memungkinkan tersedianya data lingkungan yang bersifat *near real-time*, sehingga analisis berbasis data (*data-driven decision making*) dapat dilakukan dengan lebih efektif [20], [21], [22], [23]. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya berperan sebagai solusi teknis, tetapi juga sebagai instrumen strategis dalam mendukung pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan. Meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah membahas WSN dan IoT untuk monitoring lingkungan, sebagian besar masih mengandalkan jaringan komunikasi konvensional seperti Wi-Fi, ZigBee, atau LoRa dengan keterbatasan tertentu. Penelitian yang secara khusus mengkaji integrasi WSN berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G masih relatif terbatas, terutama dalam konteks evaluasi kinerja jaringan seperti latensi, throughput, keandalan transmisi data, dan efisiensi energi pada skenario monitoring lingkungan real-time [24], [25], [26], [27]. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang komprehensif untuk menganalisis bagaimana teknologi 5G dapat diintegrasikan secara efektif dengan WSN berbasis ESP32 serta dampaknya terhadap performa sistem secara keseluruhan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan merancang sistem integrasi Wireless Sensor Network berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G untuk monitoring lingkungan secara real-time. Fokus utama penelitian meliputi arsitektur sistem, mekanisme komunikasi data, serta analisis kinerja jaringan dalam mendukung pengiriman data sensor secara cepat dan andal. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan sistem IoT berbasis WSN dan 5G [28], [29], [30], sekaligus menjadi referensi bagi peneliti dan praktisi dalam membangun solusi monitoring lingkungan yang efisien, skalabel, dan berkelanjutan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan salah satu teknologi kunci dalam pengembangan sistem monitoring berbasis jaringan komputer modern. WSN terdiri dari sejumlah node sensor yang saling terhubung secara nirkabel dan berfungsi untuk mengumpulkan, memproses, serta mengirimkan data dari lingkungan fisik ke pusat pengolahan data. Karakteristik utama WSN meliputi keterbatasan sumber daya energi, kapasitas pemrosesan yang terbatas, serta kebutuhan akan protokol komunikasi yang efisien dan andal [31], [32], [33], [34]. Dalam konteks monitoring lingkungan, WSN banyak digunakan untuk mengamati parameter seperti suhu, kelembapan, kualitas udara, tingkat kebisingan, dan variabel lingkungan lainnya secara kontinu. Perkembangan perangkat keras IoT mendorong pemanfaatan *microcontroller* yang lebih fleksibel dan ekonomis dalam implementasi WSN. ESP32 menjadi salah satu platform yang banyak digunakan karena mengintegrasikan kemampuan pemrosesan yang cukup tinggi dengan dukungan konektivitas nirkabel. Arsitektur ESP32 memungkinkan pengolahan data sensor secara lokal sebelum dikirimkan ke sistem pusat, sehingga dapat mengurangi beban jaringan dan meningkatkan efisiensi transmisi data. Selain itu, dukungan terhadap berbagai protokol komunikasi membuat ESP32 cocok digunakan sebagai node sensor dalam sistem WSN yang bersifat heterogen [35], [36], [37], [38]. Meskipun WSN berbasis ESP32 memiliki keunggulan dari sisi fleksibilitas dan biaya, keterbatasan konektivitas masih menjadi tantangan utama, terutama pada aplikasi monitoring lingkungan real-time berskala luas. Penggunaan jaringan nirkabel lokal sering kali mengalami kendala pada jangkauan, interferensi, dan kestabilan koneksi. Kondisi ini berdampak pada meningkatnya latensi dan potensi kehilangan data, yang dapat menurunkan kualitas informasi lingkungan yang dihasilkan. Oleh karena itu, diperlukan integrasi dengan teknologi jaringan yang mampu mendukung komunikasi data berkecepatan tinggi dan berlatensi rendah.

Teknologi jaringan seluler generasi kelima (5G) hadir sebagai solusi potensial untuk mengatasi keterbatasan tersebut. 5G dirancang untuk mendukung komunikasi dengan kebutuhan latensi rendah, kapasitas besar, serta konektivitas perangkat dalam jumlah masif. Karakteristik ini menjadikan 5G sangat relevan untuk aplikasi IoT dan WSN, khususnya pada skenario monitoring lingkungan real-time [39], [40], [41], [42]. Dengan memanfaatkan 5G sebagai media transmisi utama atau sebagai *backhaul*, data sensor dapat dikirimkan secara cepat dan stabil ke pusat

pemantauan atau layanan *cloud*. Integrasi WSN dengan jaringan 5G membuka peluang penerapan arsitektur sistem yang lebih adaptif dan skalabel. Dalam arsitektur ini, node sensor berbasis ESP32 berperan sebagai pengumpul data lingkungan, sementara jaringan 5G berfungsi sebagai penghubung antara WSN dan sistem pemrosesan terpusat. Pendekatan ini memungkinkan pengolahan data secara real-time, visualisasi kondisi lingkungan secara langsung, serta penerapan analitik cerdas berbasis *big data* dan kecerdasan buatan [43], [44]. Selain itu, dukungan 5G terhadap kualitas layanan memungkinkan prioritas data penting, yang sangat krusial dalam sistem peringatan dini berbasis lingkungan.

Aspek lain yang banyak dikaji dalam literatur terkait WSN dan 5G adalah efisiensi energi dan keandalan sistem. Node sensor pada WSN umumnya beroperasi dengan sumber daya terbatas, sehingga mekanisme komunikasi harus dirancang agar hemat energi tanpa mengorbankan performa jaringan. Integrasi dengan 5G menuntut adanya strategi pengelolaan komunikasi yang optimal, baik dari sisi interval pengiriman data, ukuran paket, maupun mekanisme *sleep mode* pada node sensor. Pendekatan ini bertujuan untuk menjaga keseimbangan antara kebutuhan monitoring real-time dan umur operasional sistem. Dalam konteks monitoring lingkungan, sistem yang terintegrasi dengan 5G juga memungkinkan penerapan konsep *smart environment* [45], di mana data lingkungan tidak hanya dikumpulkan, tetapi juga dianalisis secara otomatis untuk mendukung pengambilan keputusan. Informasi yang diperoleh dapat dimanfaatkan oleh berbagai pemangku kepentingan, mulai dari peneliti, pengelola lingkungan, hingga pembuat kebijakan. Dengan demikian, integrasi WSN berbasis ESP32 dan konektivitas 5G tidak hanya berkontribusi pada pengembangan teknologi jaringan komputer, tetapi juga memberikan dampak nyata dalam pengelolaan dan perlindungan lingkungan secara berkelanjutan.

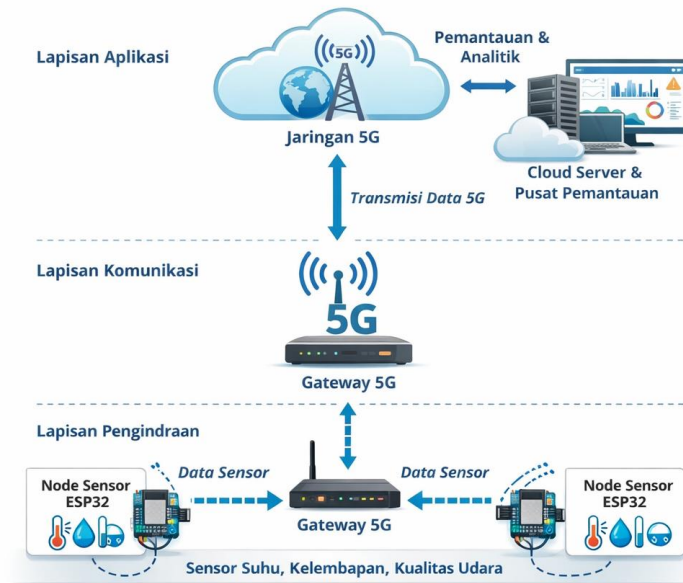
Secara keseluruhan, tinjauan pustaka menunjukkan bahwa WSN, ESP32, dan 5G merupakan komponen yang saling melengkapi dalam membangun sistem monitoring lingkungan real-time. Meskipun masing-masing teknologi telah banyak dikaji secara terpisah, integrasi menyeluruh antara WSN berbasis ESP32 dan jaringan 5G masih memerlukan eksplorasi lebih lanjut, khususnya dari sisi arsitektur sistem dan evaluasi kinerja jaringan [46]. Hal ini menjadi dasar penting bagi penelitian ini untuk memberikan kontribusi ilmiah yang lebih komprehensif.

III. METODE

Metode penelitian ini dirancang untuk mengkaji secara sistematis integrasi *Wireless Sensor Network* (WSN) berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G dalam mendukung sistem monitoring lingkungan secara real-time. Pendekatan yang digunakan bersifat eksperimental dan rekayasa sistem (*engineering research*) [47], yang mencakup tahap perancangan arsitektur, implementasi prototipe, serta pengujian dan evaluasi kinerja jaringan.

A. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem yang diusulkan terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu lapisan penginderaan (*sensing layer*), lapisan komunikasi (*network layer*), dan lapisan aplikasi (*application layer*). Pada lapisan penginderaan, node-node sensor berbasis ESP32 berfungsi untuk mengumpulkan data lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan kualitas udara. Data yang diperoleh diproses secara lokal sebelum dikirimkan ke lapisan komunikasi [48]. Lapisan komunikasi memanfaatkan konektivitas 5G sebagai media transmisi data menuju pusat pemrosesan. Selanjutnya, lapisan aplikasi bertanggung jawab terhadap penyimpanan, visualisasi, dan analisis data secara real-time melalui *cloud server* atau sistem terpusat.



Gambar 1. Diagram arsitektur sistem integrasi WSN berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G.

B. Perancangan Node Sensor

Node sensor dirancang menggunakan ESP32 sebagai unit pemrosesan utama yang terhubung dengan beberapa sensor lingkungan. Setiap node dikonfigurasi untuk melakukan pembacaan data secara periodik dengan interval tertentu. Data sensor dikemas dalam format ringan agar efisien dalam transmisi jaringan [49]. Untuk mendukung efisiensi energi, node sensor diatur menggunakan mekanisme *sleep mode* ketika tidak melakukan pengukuran atau pengiriman data. Parameter interval pengiriman dan ukuran paket data ditentukan berdasarkan kebutuhan monitoring real-time dan keterbatasan sumber daya perangkat.

Tabel 1. Spesifikasi perangkat keras node sensor berbasis ESP32.

No	Komponen Perangkat Keras	Spesifikasi Teknis	Fungsi dalam Sistem
1	Mikrokontroler	ESP32 (Dual-Core, 32-bit, hingga 240 MHz)	Unit pemrosesan utama dan pengendali node sensor
2	Memori	Flash 4 MB, SRAM internal	Penyimpanan program dan data sementara
3	Sensor Suhu & Kelembapan	DHT22 / SHT31	Pengukuran parameter suhu dan kelembapan lingkungan
4	Sensor Kualitas Udara	MQ-135 / BME680	Deteksi gas dan kualitas udara
5	Modul Komunikasi Lokal	Wi-Fi 802.11 b/g/n / Bluetooth	Transmisi data dari node sensor ke gateway
6	Gateway Jaringan	Gateway IoT berbasis modem 5G	Penghubung antara WSN dan jaringan 5G
7	Catu Daya	Baterai Li-ion 3,7 V / adaptor DC	Sumber energi node sensor

8	Manajemen Daya	Mode Deep Sleep ESP32	Penghematan energi selama periode idle
9	Antarmuka Tambahan	GPIO, I2C, SPI, UART	Koneksi sensor dan perangkat tambahan

C. Mekanisme Komunikasi Data

Dalam sistem ini, ESP32 tidak terhubung langsung ke jaringan 5G, melainkan menggunakan *gateway* 5G sebagai penghubung antara WSN dan jaringan seluler. Node sensor mengirimkan data ke gateway melalui koneksi nirkabel jarak dekat, kemudian gateway meneruskan data tersebut ke jaringan 5G menuju server pusat [50]. Mekanisme ini dipilih untuk menjaga efisiensi energi node sensor sekaligus memanfaatkan keunggulan jaringan 5G dalam transmisi jarak jauh. Protokol komunikasi ringan digunakan untuk memastikan latensi rendah dan keandalan pengiriman data.

D. Implementasi Sistem Monitoring

Pada sisi aplikasi, server pusat dikembangkan untuk menerima, menyimpan, dan memvisualisasikan data lingkungan secara real-time. Sistem ini menyediakan antarmuka berbasis web yang menampilkan grafik perubahan parameter lingkungan, status node sensor, serta notifikasi apabila terjadi kondisi lingkungan yang melewati ambang batas tertentu [51]. Proses ini memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara kontinu dan respons cepat terhadap perubahan yang signifikan.

E. Pengujian dan Evaluasi Kinerja

Pengujian sistem dilakukan dengan mengukur beberapa parameter kinerja jaringan, antara lain latensi end-to-end, tingkat kehilangan paket data, throughput, dan konsumsi energi node sensor. Pengujian dilakukan pada berbagai skenario interval pengiriman data untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap performa sistem [52]. Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif untuk menilai efektivitas integrasi WSN berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G.

Tabel 2. Parameter pengujian kinerja sistem.

No	Komponen Perangkat Keras	Spesifikasi Teknis	Fungsi dalam Sistem
1	Mikrokontroler	ESP32 (Dual-Core, 32-bit, hingga 240 MHz)	Unit pemrosesan utama dan pengendali node sensor
2	Memori	Flash 4 MB, SRAM internal	Penyimpanan program dan data sementara
3	Sensor Suhu & Kelembapan	DHT22 / SHT31	Pengukuran parameter suhu dan kelembapan lingkungan
4	Sensor Kualitas Udara	MQ-135 / BME680	Deteksi gas dan kualitas udara
5	Modul Komunikasi Lokal	Wi-Fi 802.11 b/g/n / Bluetooth	Transmisi data dari node sensor ke gateway
6	Gateway Jaringan	Gateway IoT berbasis modem 5G	Penghubung antara WSN dan jaringan 5G
7	Catu Daya	Baterai Li-ion 3,7 V / adaptor DC	Sumber energi node sensor

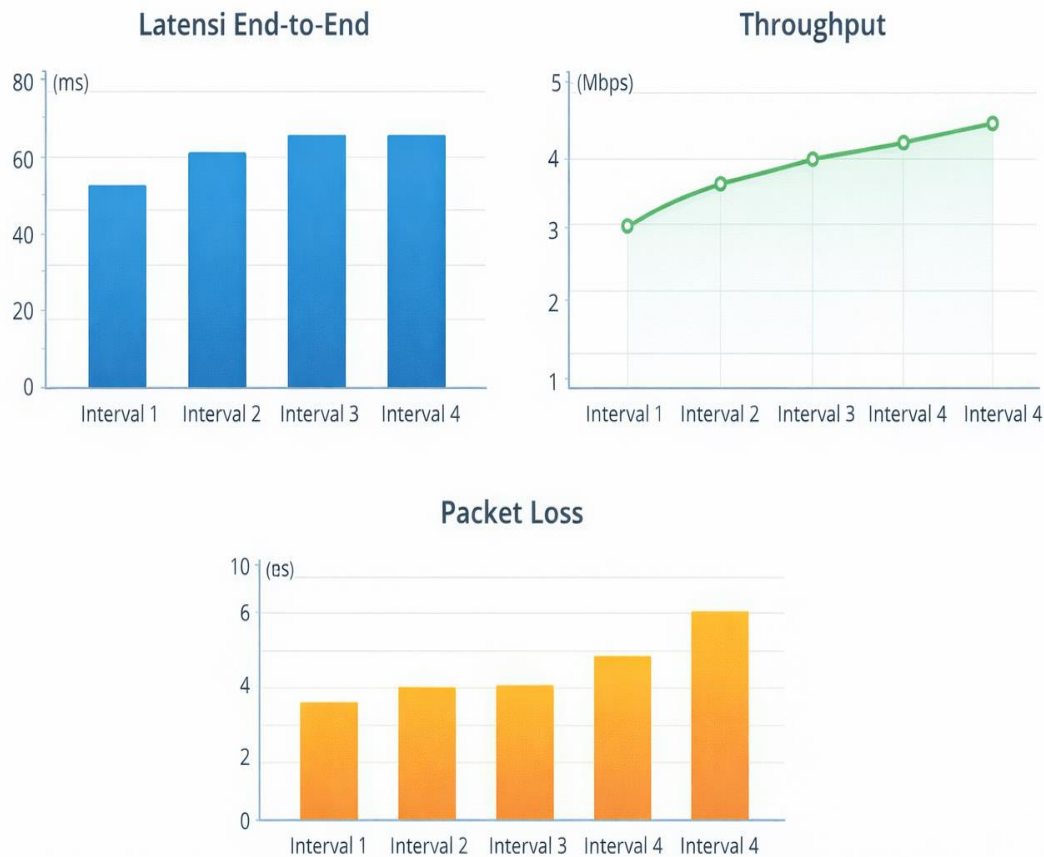
Melalui metode penelitian ini, diharapkan diperoleh gambaran komprehensif mengenai performa dan kelayakan integrasi WSN berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G dalam mendukung sistem monitoring lingkungan real-time yang efisien, andal, dan skalabel.

IV. HASIL

Bagian ini menyajikan hasil implementasi dan pengujian sistem integrasi *Wireless Sensor Network* (WSN) berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G untuk monitoring lingkungan secara real-time. Evaluasi dilakukan terhadap kinerja jaringan, efisiensi energi node sensor, serta performa sistem monitoring berbasis web.

A. Kinerja Pengiriman Data dan Jaringan

Pengujian menunjukkan bahwa data sensor lingkungan yang dikumpulkan oleh node ESP32 berhasil dikirimkan ke server pusat melalui *gateway* 5G secara stabil dan kontinu. Selama periode pengujian, tidak ditemukan gangguan signifikan pada proses transmisi data suhu, kelembapan, dan kualitas udara. Hal ini menegaskan bahwa integrasi WSN dengan jaringan 5G mampu mengatasi keterbatasan jangkauan dan kestabilan komunikasi yang umum terjadi pada jaringan nirkabel lokal. Nilai latensi end-to-end berada pada kisaran rendah dan relatif stabil di setiap interval pengujian. Throughput jaringan menunjukkan peningkatan seiring dengan frekuensi pengiriman data, sedangkan tingkat *packet loss* tetap rendah dan berada dalam batas toleransi sistem monitoring real-time.



Gambar 2. Grafik hasil pengujian kinerja jaringan yang menunjukkan latensi end-to-end, throughput, dan packet loss pada beberapa interval pengujian.

B. Efisiensi Energi Node Sensor

Hasil pengujian konsumsi energi menunjukkan bahwa node sensor berbasis ESP32 memiliki efisiensi daya yang baik. Penerapan mekanisme *deep sleep* memungkinkan node hanya aktif saat proses pengambilan dan pengiriman data, kemudian kembali ke mode hemat energi. Pendekatan ini membuat sistem WSN layak digunakan untuk monitoring jangka panjang, terutama pada lokasi dengan keterbatasan sumber daya listrik. Interval pengiriman data berpengaruh langsung terhadap konsumsi energi. Interval yang lebih rapat meningkatkan konsumsi daya, namun masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk kebutuhan monitoring lingkungan real-time.

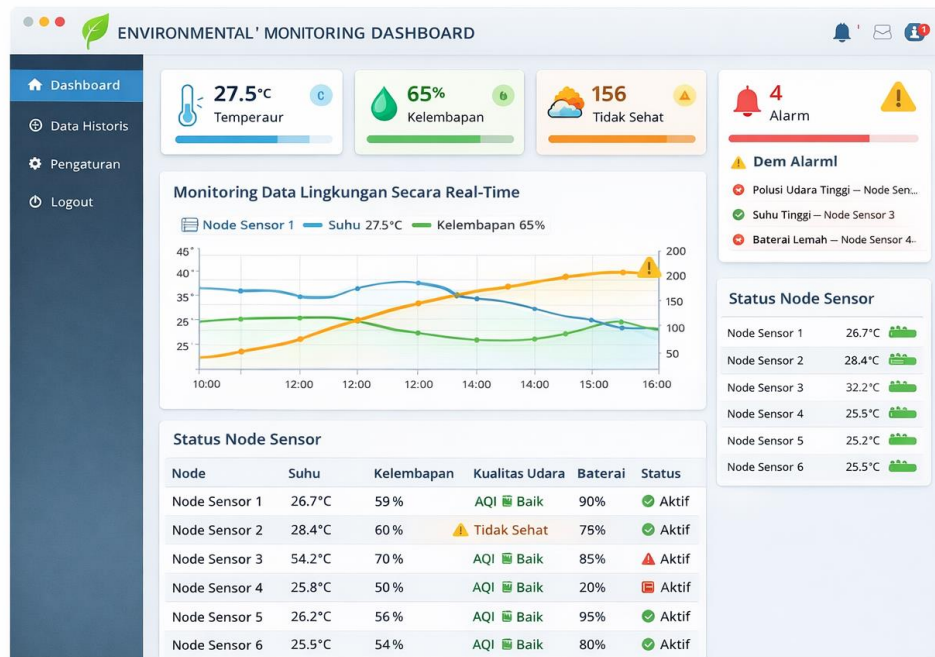
Tabel 4. Ringkasan hasil pengujian kinerja system

Parameter Kinerja	Hasil Pengujian	Keterangan
Latensi End-to-End	Rendah dan stabil	Mendukung monitoring real-time
Throughput	Stabil dan meningkat	Jaringan 5G mampu menangani beban data
Packet Loss	Rendah	Transmisi data andal
Konsumsi Energi	Efisien	Didukung <i>deep sleep</i> ESP32
Ketersediaan Sistem	Tinggi	Sistem berjalan stabil

C. Kinerja Sistem Monitoring Berbasis Web

Sistem monitoring lingkungan berbasis web mampu menampilkan data sensor secara real-time dengan waktu respons yang cepat. Antarmuka sistem menyajikan grafik perubahan parameter lingkungan, status node sensor, kondisi baterai, serta notifikasi peringatan ketika nilai parameter melewati ambang batas yang telah ditentukan.

Selama pengujian, pembaruan data berlangsung secara konsisten tanpa keterlambatan signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi antara WSN, jaringan 5G, dan server aplikasi berjalan secara sinkron dan andal.



Gambar 3. Antarmuka sistem monitoring lingkungan real-time berbasis web.

D. Ringkasan Hasil

Berdasarkan seluruh hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa sistem integrasi WSN berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G mampu mendukung monitoring lingkungan secara real-time dengan kinerja jaringan yang baik, latensi rendah, keandalan tinggi, serta efisiensi energi yang memadai. Penyajian data melalui antarmuka web memperkuat fungsi sistem sebagai alat pemantauan dan peringatan dini yang efektif untuk aplikasi lingkungan berskala luas.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi *Wireless Sensor Network* (WSN) berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G memberikan peningkatan signifikan terhadap kinerja sistem monitoring lingkungan secara real-time. Dari sisi jaringan, pemanfaatan 5G sebagai *backhaul* mampu mengatasi keterbatasan utama WSN konvensional, khususnya terkait latensi, keandalan transmisi, dan skalabilitas. Latensi end-to-end yang rendah dan stabil menjadi indikator penting bahwa sistem ini layak digunakan pada aplikasi pemantauan lingkungan yang menuntut respons cepat, seperti deteksi dini pencemaran atau perubahan kondisi lingkungan yang ekstrem. Kinerja throughput yang stabil menunjukkan bahwa jaringan 5G mampu menangani lalu lintas data dari banyak node sensor secara simultan tanpa degradasi kualitas layanan. Hal ini sangat relevan untuk implementasi monitoring lingkungan berskala luas, di mana jumlah node sensor dapat meningkat seiring dengan perluasan area pemantauan. Rendahnya tingkat *packet loss* juga menegaskan bahwa integrasi WSN dengan 5G memiliki reliabilitas tinggi, sehingga data lingkungan yang diterima oleh server dapat diandalkan untuk analisis lanjutan dan pengambilan keputusan berbasis data. Dari sisi perangkat, ESP32 terbukti menjadi platform yang efisien dan fleksibel sebagai node sensor WSN. Penerapan mekanisme *deep sleep* berkontribusi besar terhadap penghematan energi, yang merupakan aspek krusial dalam sistem monitoring lingkungan jangka panjang. Hasil ini menunjukkan bahwa kompromi antara kebutuhan monitoring real-time dan efisiensi energi dapat dicapai melalui pengaturan interval pengiriman data yang tepat. Dengan konfigurasi yang optimal, sistem mampu mempertahankan performa jaringan tanpa mengorbankan umur operasional node sensor.

Pada level aplikasi, sistem monitoring berbasis web menunjukkan kemampuan visualisasi data yang responsif dan informatif. Penyajian grafik real-time, status node, serta fitur notifikasi memperkuat fungsi sistem tidak hanya sebagai alat pemantauan, tetapi juga sebagai sistem pendukung pengambilan keputusan. Integrasi ini mencerminkan pendekatan end-to-end, mulai dari akuisisi data di lapangan hingga penyajian informasi yang mudah dipahami oleh pengguna.

Berdasarkan hasil dan analisis tersebut, pembahasan utama dapat dirangkum dalam beberapa poin berikut:

1. Aspek Kinerja Jaringan
Integrasi WSN dengan konektivitas 5G secara nyata meningkatkan latensi, throughput, dan keandalan transmisi data dibandingkan pendekatan WSN konvensional. Hal ini menjadikan 5G sebagai solusi yang sangat sesuai untuk monitoring lingkungan real-time berskala besar.
2. Aspek Efisiensi Perangkat
Penggunaan ESP32 dengan manajemen daya yang tepat mampu mendukung operasi jangka panjang dengan konsumsi energi yang efisien, sehingga sistem layak diterapkan pada lokasi terpencil dengan sumber daya terbatas.
3. Aspek Sistem dan Aplikasi
Sistem monitoring berbasis web yang terintegrasi mampu menyajikan data secara real-time dan mendukung mekanisme peringatan dini, sehingga meningkatkan nilai praktis sistem dalam pengelolaan dan perlindungan lingkungan.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menegaskan bahwa integrasi WSN berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G merupakan pendekatan yang efektif dan berkelanjutan untuk pengembangan sistem monitoring lingkungan modern.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem integrasi *Wireless Sensor Network* (WSN) berbasis ESP32 dengan konektivitas 5G untuk monitoring lingkungan secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pemanfaatan jaringan 5G sebagai media transmisi data mampu meningkatkan kinerja sistem secara signifikan, khususnya dari sisi latensi, throughput, dan keandalan komunikasi. Latensi end-to-end yang rendah dan stabil membuktikan bahwa sistem yang dikembangkan layak digunakan untuk aplikasi monitoring lingkungan yang membutuhkan respons cepat dan akurasi data yang tinggi. Dari sisi perangkat, penggunaan ESP32 sebagai node sensor terbukti efisien dan fleksibel. Penerapan mekanisme manajemen daya, terutama *deep sleep*, memungkinkan node sensor beroperasi dengan konsumsi energi yang rendah tanpa mengorbankan performa pengiriman data. Hal ini menjadikan sistem WSN yang diusulkan sesuai untuk penerapan jangka panjang, terutama pada lokasi pemantauan yang memiliki keterbatasan sumber daya listrik.

Pada tingkat aplikasi, sistem monitoring berbasis web mampu menampilkan data lingkungan secara real-time dengan visualisasi yang informatif serta dilengkapi fitur notifikasi peringatan dini. Integrasi menyeluruh antara lapisan penginderaan, komunikasi, dan aplikasi menunjukkan bahwa sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan, tetapi juga sebagai pendukung pengambilan keputusan berbasis data. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem monitoring lingkungan berbasis IoT yang andal, skalabel, dan berkelanjutan dengan memanfaatkan teknologi WSN dan jaringan 5G.

Kontribusi Penulis : Kukuh Dwi Nur Cahyo: Konseptualisasi penelitian, perancangan metodologi, analisis data, dan penulisan naskah. **M. Febri Dwidanasaputra:** Implementasi sistem, pengujian, visualisasi hasil, dan validasi penelitian. **Kevin Ananda Puryanto Pratama:** Pengembangan sistem monitoring, pengolahan data, dan penyuntingan naskah.

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, S. R. Sutarsih, S. Sofiyulloh, and ..., "Optimalisasi Perancangan Aplikasi Manajemen Data Koloman, Di Desa Pulau Mandangin Sampang–Madura Berbasis Website," 2024, *jurnal.univrab.ac.id*. [Online]. Available: <https://jurnal.univrab.ac.id/index.php/rabit/article/download/4840/1965>
- [2] F. Prasetyo, E. Putra, M. Riski, M. S. Yahya, and M. H. Ramadhan, "Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 5, no. 2, pp. 167–174, 2023, [Online]. Available: <https://jsisfotek.org/index.php>
- [3] F. P. E. Putra, M. Riski, M. S. Yahya, and ..., "Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 5, no. 2, pp. 167–174, 2023, [Online]. Available: <http://www.jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/233>
- [4] 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.
- [5] 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>
- [6] F. P. E. 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.
- [7] F. P. E. Putra, D. E. Arissandi, A. Rofiqi, and M. F. Hidayat, "Pemanfaatan Mikrotik Dalam Manajemen Bandwidth Pada Jaringan Sekolah," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420575_Pemanfaatan_Mikrotik_Dalam_Manajemen_Bandwidth_Pada_Jaringan_Sekolah/links/6848fab46b5a287c304a61ca/Pemanfaatan-Mikrotik-Dalam-Manajemen-Bandwidth-Pada-Jaringan-Sekolah.pdf
- [8] 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.

- [9] F. P. E. Putra and A. Ramadhani, "Integrasi Teknologi Kuantum dan fiber Optik untuk Meningkatkan Keamanan dan Efisiensi Jaringan Masa Depan," *J. Ilm. Ilk. ...*, 2025, [Online]. Available: <http://j-ilkominfo.org/index.php/ejournalaikom/article/view/342>
- [10] 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.
- [11] O. G. Manzanilla-Salazar, H. Mellah, and B. Sansó, "Recognizing Emergencies and Multi-User Behavior Patterns Using Imperfect Data From Distributed Access Points. A Non-Intrusive Proof of Concept," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 91234–91246, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3306328.
- [12] S. Akram *et al.*, "Advanced triboelectric nanogenerator: Leveraging density of states matching and leakage current mitigation," *Chem. Eng. J.*, vol. 519, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.164813.
- [13] T. Shahroodi *et al.*, "Demeter: A Fast and Energy-Efficient Food Profiler Using Hyperdimensional Computing in Memory," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 82493–82510, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3195878.
- [14] R. A. Anirudh Reddy and N. Nidumolu, "Enhanced network lifetime in WBAN using hybrid meta-heuristic-enabled mobile and multiple sink nodes-connected routing," *Int. J. Mob. Netw. Des. Innov.*, vol. 10, no. 4, pp. 182–201, 2023, doi: 10.1504/IJMNDI.2023.133239.
- [15] R. M. Nabawy, M. Ibrahim, and M. Kaseb, "Survey of Mobile Cloud Computing Security and Privacy Issues in Healthcare," *Comput. y Sist.*, vol. 28, no. 3, pp. 1017–1029, 2024, doi: 10.13053/CyS-28-3-4596.
- [16] A. Singh *et al.*, "Wavefront Engineering: Realizing Efficient Terahertz Band Communications in 6G and beyond," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 31, no. 3, pp. 133–139, 2024, doi: 10.1109/MWC.019.2200583.
- [17] J. Zang, "Smart Sports Outward Bound Training Assistant System Based on WSNs," *Int. J. Distrib. Syst. Technol.*, vol. 14, no. 2, 2023, doi: 10.4018/IJDST.317939.
- [18] C. M. Coman, B. C. Toma, M. A. Constantin, and A. Florescu, "Ground Level LiDAR as a Contributing Indicator in an Environmental Protection Application," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 106277–106288, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3319453.
- [19] A. Sghaier and A. Meddeb, "Real Time QoS in WSN-based Network Coding and Reinforcement Learning," *Inform.*, vol. 47, no. 4, pp. 477–486, 2023, doi: 10.31449/inf.v47i4.3102.
- [20] J.-R. Zhuang, W.-T. Chang, and Y.-M. Lin, "Shoe-Like Unpowered Exoskeleton with Energy Harvesting for Enhanced Walking Economy," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 33, pp. 2345–2357, 2025, doi: 10.1109/TNSRE.2025.3579359.
- [21] P. Guo, S. Xu, and W. Liang, "A cloud-assisted anonymous and privacy-preserving authentication scheme for internet of medical things," *Comput. Secur.*, vol. 157, 2025, doi: 10.1016/j.cose.2025.104614.
- [22] F. Bourebaa and M. Benmohammed, "Evaluating Lightweight Transformers With Local Explainability for Android Malware Detection," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 101005–101026, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3577775.
- [23] F. F. Ashrif, E. A. Sundararajan, M. K. Hasan, R. Ahmad, A.-H. A. Hassan Abdalla Hashim, and A. Abu Talib, "Provably secured and lightweight authenticated encryption protocol in machine-to-machine communication in industry 4.0," *Comput. Commun.*, vol. 218, pp. 263–275, 2024, doi: 10.1016/j.comcom.2024.02.008.
- [24] A. Singh, J. Amutha, J. Nagar, and S. Sharma, "A deep learning approach to predict the number of k-barriers

- for intrusion detection over a circular region using wireless sensor networks,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 211, 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2022.118588.
- [25] A. M. Telgote and S. S. Mande, “A power-awareness routing protocol for sustainable low-power wireless networks: FPGA vs. microcontroller implementation,” *Int. J. Ad Hoc Ubiquitous Comput.*, vol. 48, no. 2, pp. 75–93, 2025, doi: 10.1504/IJAHUC.2025.143974.
- [26] N. Singh and S. Suresh, “A Red-Zone-Based Randomized Angular Routing Protocol for Multisource Location Privacy in IoT Applications,” *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 38, no. 5, 2025, doi: 10.1002/dac.6014.
- [27] M. M. Hasan, M. S. Haq, M. M. Hossain, J. K. Tiash, and S. Kwon, “An Energy-Efficient Small-Cell Operation Algorithm for Ultra-Dense Cellular Networks,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 191650–191660, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3518355.
- [28] F. F. Jurado-Lasso, M. Barzegaran, J. F. Jurado, and X. Fafoutis, “ELISE: A Reinforcement Learning Framework to Optimize the Slotframe Size of the TSCH Protocol in IoT Networks,” *IEEE Syst. J.*, vol. 18, no. 2, pp. 1068–1079, 2024, doi: 10.1109/JSYST.2024.3371429.
- [29] Y. Wang, C. Tong, and J. Xie, “RHM- δ -GLMB Tracking Algorithm on the Focal Plane for UAV Cluster Targets,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 37253–37268, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3264018.
- [30] P. Ning, H. Wang, T. Tang, L. Zhu, and X. Wang, “A Service-Oriented Energy Efficient Resource Allocation Approach for Wireless Communications of the Tunnel Construction,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 4, pp. 4948–4958, 2023, doi: 10.1109/TVT.2022.3227898.
- [31] M. Y. B. Murthy and A. Koteswararao, “Applications, merits and demerits of WSN with IoT: a detailed review,” *Int. J. Auton. Adapt. Commun. Syst.*, vol. 17, no. 1, pp. 68–88, 2024, doi: 10.1504/IJAACS.2024.135941.
- [32] D. Zhan, S. Wang, S. Cai, H. Zheng, and W. Xu, “Acoustic localization with multi-layer isogradient sound speed profile using TDOA and FDOA,” *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.*, vol. 24, no. 1, pp. 164–175, 2023, doi: 10.1631/FITEE.2100398.
- [33] M. A. Khlifi and M. B. Ben Slimene, “Efficiency of a Six-Phase Induction Generator Employing a Static Excitation Controller to Generate AC Power for Wind Energy,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 28791–28799, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3260775.
- [34] Y. Wang, T. Yang, C. Wang, F. Li, P. Hu, and Y. Shen, “BudsAuth: Toward Gesture-Wise Continuous User Authentication Through Earbuds Vibration Sensing,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 12, pp. 22007–22020, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3380811.
- [35] Y. Long *et al.*, “Room-temperature, self-powered hydrogel-based flexible chemosensors for nitrogen dioxide detection enabled by zinc-air batteries,” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 290, 2025, doi: 10.1016/j.bios.2025.117941.
- [36] X. Tang, X. Liu, G. Xie, Y. Cui, and D. Li, “Prototype Implementation and Experimental Evaluation for LoRa-Backscatter Communication Systems With RF Energy Harvesting and Low Power Management,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 73, no. 7, pp. 4811–4825, 2025, doi: 10.1109/TCOMM.2024.3522052.
- [37] I. A. Alablani and M. A. Arafah, “An SDN/ML-Based Adaptive Cell Selection Approach for HetNets: A Real-World Case Study in London, UK,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 166932–166950, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3136129.
- [38] S. Kumar, A. Vasudeva, and M. Manu Sood, “Bio-inspired Routing Algorithms for UAV-based Networks: A Survey,” *J. Telecommun. Inf. Technol.*, vol. 101, no. 3, pp. 23–50, 2025, doi: 10.26636/jtit.2025.3.2101.

- [39] T. Micallef, X. Gu, and K. Wu, "Electric Field Energy Harvesting From High-Voltage Power Lines for Consumer Batteryless Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 71, no. 1, pp. 2322–2331, 2025, doi: 10.1109/TCE.2024.3503492.
- [40] J. Han and K.-S. Yun, "Real-Time Soil Moisture Monitoring Using a Graphene Oxide Sensor Powered by a Solar Cell-Based Energy Harvester," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 19, no. 5, pp. 3331–3337, 2024, doi: 10.1007/s42835-024-01790-2.
- [41] P. Liu, H. Xiang, and B. Zhao, "A graded E-shaped piezoelectric energy harvester for ultra-broadband and high-capability energy harvesting," *Eng. Struct.*, vol. 343, 2025, doi: 10.1016/j.engstruct.2025.121038.
- [42] D. Chatzoulis, C. Chaikalas, A. Xenakis, D. Kosmanos, and K. E. Anagnostou, "Channel Coding QoS Analysis in 5G V2X Dynamic Propagation Models," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 80149–80173, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3566607.
- [43] S. A. Alzakari, A. Sarkar, M. Z. Khan, and A. A. Alhussan, "Converging Technologies for Health Prediction and Intrusion Detection in Internet of Healthcare Things With Matrix-Valued Neural Coordinated Federated Intelligence," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 99469–99498, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3420078.
- [44] E. Sutcliffe and A. Beghelli, "Fidelity-Aware Multipath Routing for Multipartite State Distribution in Quantum Networks," *IEEE Trans. Quantum Eng.*, vol. 6, 2025, doi: 10.1109/TQE.2025.3588783.
- [45] A. Abedi, H. Lu, A. Chen, C. Liu, and O. Abari, "WiFi Physical Layer Stays Awake and Responds When it Should Not," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 3, pp. 4483–4496, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3300788.
- [46] M. Xie, F. Li, and S. Qiao, "Graph-topology-learning-based IoT positioning under incomplete measurement data," *Digit. Signal Process. A Rev. J.*, vol. 148, 2024, doi: 10.1016/j.dsp.2024.104465.
- [47] S. A. Rajshekhar and A. Biradar, "An Efficient Framework for Localization Based Optimized Opportunistic Routing Protocol in Underwater Acoustic Sensor Networks," *SN Comput. Sci.*, vol. 5, no. 5, 2024, doi: 10.1007/s42979-024-02814-4.
- [48] A. Gazis and E. Katsiri, "Streamline Intelligent Crowd Monitoring with IoT Cloud Computing Middleware," *Sensors*, vol. 24, no. 11, 2024, doi: 10.3390/s24113643.
- [49] D. Man *et al.*, "A Hybrid Tri-Stable Piezoelectric Energy Harvester with Asymmetric Potential Wells for Rotational Motion Energy Harvesting Enhancement," *Energies*, vol. 17, no. 9, 2024, doi: 10.3390/en17092134.
- [50] Z. Lai, Z. Yan, G. Geng, and H. Nakazato, "Issuance Policies of Route Origin Authorization with a Single Prefix and Multiple Prefixes: A Comparative Analysis," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 15, no. 3, pp. 1168–1176, 2024, doi: 10.14569/IJACSA.2024.01503116.
- [51] A. S. Morales, C. D'Aquino, R. B. P. Klaus, G. S. Vargas, M. A. M. Giassi, and F. de Oliveira Ourique, "Internet of Things experimental platform for real-time water monitoring: a case study of the Araranguá River estuary," *Acta Sci. - Technol.*, vol. 45, 2023, doi: 10.4025/actascitechnol.v45i1.63130.
- [52] A. Ashraf and M. Sagheer, "Efficient Detection of Reactive Jamming Attacks in IoT Networks: A Collaborative Approach," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 38, no. 8, 2025, doi: 10.1002/dac.70098.