

Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Real Time Basis Wireless Sensor Network Dan Edge Computing untuk Optimasi Letasi Data

Syamsul Arifin^{1)*} 

¹⁾Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ ariefsyamsul827@gmail.com

Abstrak

Degradasi kualitas udara akibat urbanisasi, aktivitas industri, dan peningkatan kendaraan bermotor menuntut sistem pemantauan yang mampu bekerja secara real-time dengan latensi rendah dan efisiensi tinggi. Teknologi terkini menunjukkan bahwa integrasi Wireless Sensor Network (WSN) dan Edge Computing dapat menjadi solusi untuk mengatasi keterbatasan sistem monitoring konvensional yang masih bergantung pada pemrosesan terpusat di cloud. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem monitoring kualitas udara berbasis WSN dan Edge Computing yang mampu mengoptimalkan latensi, efisiensi bandwidth, serta konsumsi daya, guna meningkatkan efektivitas pengawasan lingkungan secara real-time. Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen rekayasa sistem kuantitatif, dengan membangun prototipe yang terdiri dari node sensor udara (PM2.5, PM10, CO₂, suhu, kelembapan), edge node (Raspberry Pi), dan server cloud. Tiga skenario pengujian dilakukan untuk membandingkan kinerja sistem tanpa edge, dengan edge dasar, dan dengan optimasi latensi adaptif. Implementasi Edge Computing menurunkan latensi rata-rata dari 820 ms menjadi 420 ms, menghemat bandwidth hingga 47%, serta menurunkan konsumsi daya sebesar 13%. Akurasi pengukuran sensor mencapai lebih dari 95% dibanding alat referensi laboratorium. Hasil penelitian membuktikan bahwa integrasi WSN dan Edge Computing mampu meningkatkan performa sistem monitoring kualitas udara secara signifikan. Sistem ini berpotensi dikembangkan lebih lanjut dengan penerapan machine learning ringan untuk prediksi pencemaran dan integrasi pada platform smart city guna mendukung kebijakan lingkungan berbasis data real-time.

Kata Kunci: Jaringan Sensor Nirkabel, Komputasi Tepi, Kualitas Udara, Optimalisasi Latensi, Lingkungan Cerdas

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 (TIK) dalam dua dekade terakhir telah memberikan dampak signifikan terhadap berbagai aspek kehidupan manusia, termasuk dalam bidang lingkungan hidup dan sistem pemantauan kualitas udara. Urbanisasi yang pesat, pertumbuhan industri, dan peningkatan jumlah kendaraan bermotor telah menyebabkan degradasi kualitas udara yang mengkhawatirkan di berbagai kota besar di dunia, termasuk di Indonesia. Kondisi ini menimbulkan urgensi untuk mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara yang efisien, akurat, dan mampu bekerja secara real-time [1], [2], [3], [4]. Pemantauan kualitas udara secara konvensional yang hanya bergantung pada alat ukur stasioner di titik-titik tertentu terbukti kurang efektif karena memiliki keterbatasan dalam jangkauan area, kecepatan akuisisi data, dan biaya operasional yang tinggi. Oleh karena itu, dibutuhkan solusi berbasis Wireless Sensor Network (WSN) dan Edge Computing untuk mengoptimalkan proses pengumpulan, pemrosesan, dan transmisi data lingkungan secara cerdas. Secara umum, Wireless Sensor Network merupakan jaringan yang terdiri atas sekumpulan node sensor yang berfungsi mendeteksi, mengumpulkan, dan mengirimkan data ke pusat pengolahan secara nirkabel [5], [6], [7]. Keunggulan utama WSN terletak pada fleksibilitas, skalabilitas, serta kemampuan beroperasi di lingkungan yang sulit dijangkau tanpa memerlukan infrastruktur jaringan yang kompleks. Dalam konteks monitoring kualitas udara, WSN memungkinkan penyebaran node sensor di berbagai titik strategis, sehingga data konsentrasi polutan seperti PM2.5, PM10, CO₂, NO₂, dan SO₂ dapat diperoleh secara menyeluruh dan kontinu. Namun demikian, salah satu tantangan mendasar dari sistem berbasis WSN adalah latensi data — yaitu waktu tunda antara proses akuisisi data oleh sensor hingga data tersebut tersedia untuk analisis dan pengambilan keputusan. Tingginya latensi dapat menurunkan efektivitas sistem dalam memberikan informasi real-time yang diperlukan untuk mitigasi atau penanganan cepat terhadap kondisi udara berbahaya.

* Syamsul Arifin

Dalam konteks inilah, Edge Computing hadir sebagai solusi komplementer terhadap keterbatasan arsitektur WSN tradisional. Edge Computing memungkinkan sebagian besar proses komputasi dilakukan lebih dekat ke sumber data, yaitu di sisi jaringan atau bahkan pada perangkat sensor itu sendiri, sebelum data dikirim ke server pusat atau cloud. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi latensi transmisi [8], [9], tetapi juga menurunkan beban jaringan dan konsumsi energi. Dengan mengimplementasikan Edge Computing dalam sistem pemantauan kualitas udara, data dari sensor dapat diproses, disaring, dan dianalisis secara lokal untuk menghasilkan informasi awal atau peringatan dini sebelum dikirim ke cloud untuk penyimpanan dan analisis lanjutan. Hasilnya, sistem dapat beroperasi dengan respon cepat, efisiensi bandwidth tinggi, serta ketahanan terhadap gangguan konektivitas.

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan efektivitas kombinasi WSN dan Edge Computing dalam berbagai bidang seperti pertanian cerdas, smart city, dan manajemen energi. Namun, penerapan konsep ini secara khusus pada sistem monitoring kualitas udara di Indonesia masih relatif terbatas, baik dalam hal desain arsitektur jaringan maupun optimasi kinerja komunikasi antar node sensor. Tantangan yang dihadapi meliputi keterbatasan daya baterai, interferensi sinyal, reliabilitas transmisi data, serta optimasi algoritma pemrosesan di edge node [10], [11], [12]. Selain itu, kondisi geografis dan kepadatan wilayah urban di Indonesia menuntut desain sistem yang adaptif terhadap heterogenitas lingkungan serta efisien dalam penggunaan sumber daya. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada perancangan sistem monitoring kualitas udara real-time berbasis WSN dan Edge Computing dengan tujuan utama untuk mengoptimalkan latensi data. Sistem yang diusulkan mengintegrasikan berbagai komponen penting mulai dari perangkat sensor, node edge, protokol komunikasi nirkabel, hingga arsitektur perangkat lunak untuk pengolahan data. Dalam sistem ini, setiap node sensor dilengkapi dengan modul komunikasi nirkabel berdaya rendah seperti LoRa (Long Range) atau Wi-Fi [13], [14], [15], [16], yang memungkinkan transmisi data jarak jauh dengan konsumsi energi minimal. Sementara itu, node edge berfungsi sebagai penghubung antara lapisan sensor dan server pusat, di mana dilakukan pre-processing, data aggregation, serta latency optimization sebelum pengiriman data ke cloud. Keunggulan utama dari pendekatan ini adalah kemampuannya dalam meningkatkan efisiensi komunikasi data dan kecepatan respons sistem, yang sangat penting dalam konteks monitoring lingkungan secara real-time. Sistem yang dirancang juga diharapkan mampu memberikan akurasi tinggi dalam mendeteksi perubahan parameter udara dan mendukung implementasi Internet of Things (IoT) secara luas di bidang lingkungan. Selain itu, penelitian ini berpotensi mendukung kebijakan pemerintah dalam program Smart Environment dan Smart City [17], [18], [19], [20], [21], di mana data kualitas udara dapat diintegrasikan dengan sistem pengambilan keputusan berbasis kecerdasan buatan untuk perencanaan tata kota dan pengendalian polusi.

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan teknologi monitoring lingkungan di Indonesia. Dari sisi akademis, hasil penelitian ini dapat memperkaya literatur dalam bidang jaringan sensor nirkabel, arsitektur edge computing, serta optimasi performa jaringan berbasis IoT. Dari sisi praktis, sistem ini dapat diterapkan oleh lembaga lingkungan hidup, pemerintah daerah, serta masyarakat umum sebagai alat pemantauan yang murah, efisien, dan mudah diimplementasikan [22], [23], [24], [25]. Dengan adanya sistem ini, diharapkan proses pengambilan keputusan terkait mitigasi polusi udara dapat dilakukan secara lebih cepat, adaptif, dan berbasis data real-time. Secara keseluruhan, integrasi Wireless Sensor Network dan Edge Computing dalam sistem pemantauan kualitas udara real-time bukan hanya sebuah inovasi teknologi, tetapi juga langkah strategis menuju transformasi digital di bidang lingkungan. Melalui penelitian ini, diharapkan terbentuk model sistem yang tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga berkontribusi pada peningkatan kualitas hidup masyarakat, keberlanjutan lingkungan, dan efisiensi pengelolaan sumber daya informasi di era revolusi industri 4.0.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Konsep Wireless Sensor Network (WSN) menjadi fondasi utama dalam pengembangan sistem monitoring berbasis IoT (Internet of Things). WSN terdiri dari node-node sensor yang mampu mengukur parameter lingkungan dan berkomunikasi secara nirkabel untuk mengirimkan data ke pusat pengolahan. Arsitektur umum WSN mencakup tiga lapisan utama, yaitu lapisan sensor, lapisan komunikasi, dan lapisan aplikasi [26], [27], [28], [29]. Node sensor pada lapisan pertama bertugas mengakuisisi data fisik seperti suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas. Lapisan komunikasi mengatur transmisi data antar node maupun antara node dengan gateway, sedangkan lapisan aplikasi bertanggung jawab terhadap pengolahan data dan penyajian informasi kepada pengguna akhir. Teknologi komunikasi yang digunakan dalam WSN umumnya beragam, seperti Wi-Fi, ZigBee, LoRa, dan Bluetooth Low Energy (BLE), yang dipilih berdasarkan kebutuhan jangkauan, konsumsi daya, dan kapasitas data. LoRa, misalnya, unggul dalam jangkauan yang luas dengan konsumsi energi rendah, sedangkan Wi-Fi menawarkan kecepatan transmisi tinggi namun boros daya. Efisiensi energi menjadi aspek penting dalam desain WSN karena mayoritas node sensor bergantung pada sumber daya baterai yang terbatas [30], [31], [32], [33], [34]. Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk

mengoptimalkan penggunaan daya, di antaranya melalui protokol komunikasi adaptif, manajemen siklus tidur node, dan algoritma routing efisien.

Keterbatasan utama sistem WSN tradisional terletak pada latensi dan bandwidth, terutama ketika volume data sensor meningkat seiring dengan jumlah node yang terhubung. Pengiriman seluruh data mentah langsung ke server pusat dapat menyebabkan keterlambatan transmisi dan meningkatnya beban jaringan. Dalam konteks monitoring kualitas udara yang menuntut respons cepat, hal ini menjadi kendala signifikan. Untuk menjawab permasalahan tersebut, pendekatan Edge Computing diperkenalkan sebagai solusi untuk mendistribusikan proses komputasi lebih dekat ke sumber data. Edge Computing merupakan paradigma komputasi terdistribusi yang memindahkan sebagian fungsi pemrosesan data dari cloud ke perangkat edge seperti gateway atau node lokal [35], [36], [37], [38]. Prinsip utamanya adalah melakukan pre-processing terhadap data di tingkat edge untuk mengurangi jumlah data yang harus dikirim ke cloud, sekaligus mempercepat waktu respons sistem. Pendekatan ini memungkinkan pengambilan keputusan awal secara lokal, misalnya mendeteksi kenaikan mendadak kadar gas berbahaya tanpa harus menunggu analisis dari server pusat. Dalam konteks pemantauan kualitas udara, Edge Computing berperan penting dalam optimasi latensi, efisiensi bandwidth, dan peningkatan reliabilitas sistem. Integrasi WSN dan Edge Computing membentuk arsitektur cerdas yang dikenal dengan Edge-enabled IoT System. Dalam arsitektur ini, data sensor yang dikumpulkan melalui WSN langsung diproses oleh edge node yang memiliki kemampuan komputasi menengah. Edge node melakukan agregasi, filtrasi, dan normalisasi data sebelum dikirimkan ke cloud untuk penyimpanan dan analisis mendalam [39], [40], [41]. Pendekatan ini tidak hanya mempercepat aliran informasi, tetapi juga mengurangi risiko kehilangan data akibat gangguan jaringan. Selain itu, kombinasi WSN dan Edge Computing dapat meningkatkan skalabilitas sistem karena proses pengolahan data tersebar di beberapa titik, bukan terpusat pada satu server saja.

Beberapa penelitian telah mengkaji efektivitas sistem monitoring berbasis WSN dan Edge Computing di berbagai bidang. Dalam sektor pertanian cerdas (smart agriculture), sistem serupa digunakan untuk memantau kelembapan tanah dan kondisi cuaca secara real-time. Pada bidang manajemen energi, teknologi ini diterapkan untuk mengoptimalkan konsumsi listrik melalui pengumpulan data beban listrik di berbagai titik distribusi [42], [43], [44]. Sedangkan dalam lingkungan perkotaan (smart city), integrasi WSN dan Edge Computing banyak digunakan untuk pemantauan lalu lintas, pengelolaan limbah, hingga deteksi kebakaran. Meskipun implementasinya bervariasi, prinsip dasar yang digunakan sama: mengurangi latensi dan meningkatkan efisiensi pengolahan data. Dalam konteks pemantauan kualitas udara, tantangan yang dihadapi tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis jaringan, tetapi juga pada akurasi sensor, sinkronisasi waktu, serta manajemen data dalam skala besar. Oleh karena itu, penelitian terkini berfokus pada pengembangan algoritma pengolahan data yang lebih cerdas di tingkat edge, seperti machine learning ringan (lightweight ML) yang mampu berjalan di perangkat dengan kapasitas komputasi terbatas. Pendekatan ini memperluas fungsi sistem dari sekadar pengumpulan data menjadi sistem analisis prediktif yang mampu memberikan peringatan dini terhadap potensi pencemaran udara.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen rekayasa sistem yang berfokus pada perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring kualitas udara real-time berbasis Wireless Sensor Network (WSN) dan Edge Computing [45]. Tujuannya adalah menghasilkan sistem dengan latensi rendah, akurasi tinggi, serta efisiensi energi optimal dalam proses akuisisi dan transmisi data.

A. Desain Arsitektur Sistem

Sistem dirancang menggunakan tiga lapisan utama: lapisan sensor (perangkat lapangan), lapisan edge (pengolah lokal), dan lapisan cloud (penyimpanan dan analitik lanjutan).

a. Lapisan Sensor

Lapisan ini terdiri dari node-node sensor yang ditempatkan di lokasi strategis untuk mendeteksi parameter kualitas udara seperti PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, NO₂, suhu, dan kelembapan. Setiap node dilengkapi dengan mikrokontroler (ESP32/STM32) dan modul komunikasi nirkabel (LoRa/Wi-Fi).

b. Lapisan Edge

Lapisan edge berperan sebagai pengolah data lokal, menggunakan perangkat seperti Raspberry Pi atau Jetson Nano. Data mentah dari sensor diolah secara pre-processing, meliputi normalisasi, penghapusan noise, dan perhitungan rata-rata waktu singkat. Edge node juga bertanggung jawab untuk menjalankan algoritma latency optimization sebelum data dikirim ke cloud.

c. Lapisan Cloud

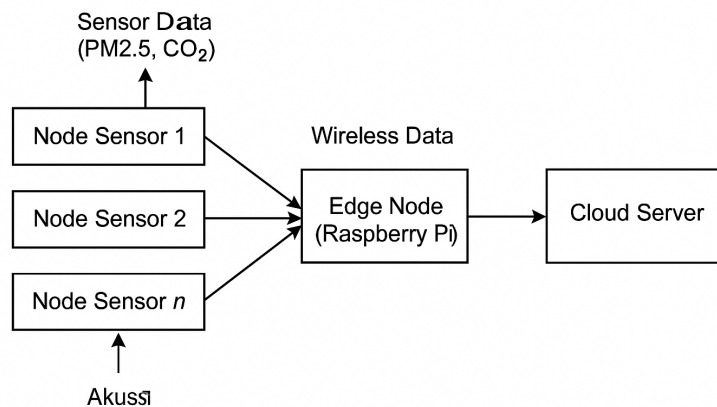
Pada tahap ini, data hasil pemrosesan edge dikirim ke server cloud untuk disimpan dan divisualisasikan melalui dashboard berbasis web. Pengguna dapat memantau kualitas udara secara real-time melalui grafik dan peta distribusi spasial.

B. Tahapan Penelitian

Tahap	Kegiatan Utama	Hasil yang Diharapkan
1	Studi literatur dan perancangan arsitektur sistem	Model konseptual WSN + Edge Computing
2	Pemilihan sensor dan perancangan perangkat keras	Node sensor dan edge prototype
3	Implementasi perangkat lunak dan protokol komunikasi	Aplikasi monitoring real-time
4	Pengujian sistem di lingkungan nyata	Data performa latensi dan akurasi
5	Analisis hasil dan optimasi algoritma	Model sistem optimal untuk monitoring udara

C. Skema Umum Sistem

Berikut ilustrasi alur komunikasi data antar komponen:



Gambar 1. Arsitektur komunikasi sistem monitoring kualitas udara berbasis WSN dan Edge Computing.

D. Metode Komunikasi dan Optimasi Latensi

Sistem menggunakan kombinasi protokol MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) untuk komunikasi data antar node dengan QoS (Quality of Service) tingkat 1 guna menjamin keandalan pengiriman. Setiap edge node dilengkapi modul data aggregator untuk melakukan kompresi data sebelum dikirim ke cloud [46], [47], [48], sehingga mengurangi beban jaringan dan mempercepat waktu pengiriman.

Latensi sistem dihitung menggunakan rumus:

$$L_{total} = L_{transmission} + L_{processing} + L_{queueing}$$

Dimana:

- $L_{transmission}$: waktu pengiriman data antar node,
- $L_{processing}$: waktu pemrosesan pada edge,
- $L_{queueing}$: waktu tunggu akibat antrian transmisi.

Tujuan optimasi adalah meminimalkan L_{total} melalui algoritma buffering adaptif di edge node yang hanya mengirim data ketika antrian jaringan berada pada kapasitas optimal.

E. Pengujian dan Evaluasi

Pengujian dilakukan dengan tiga skenario:

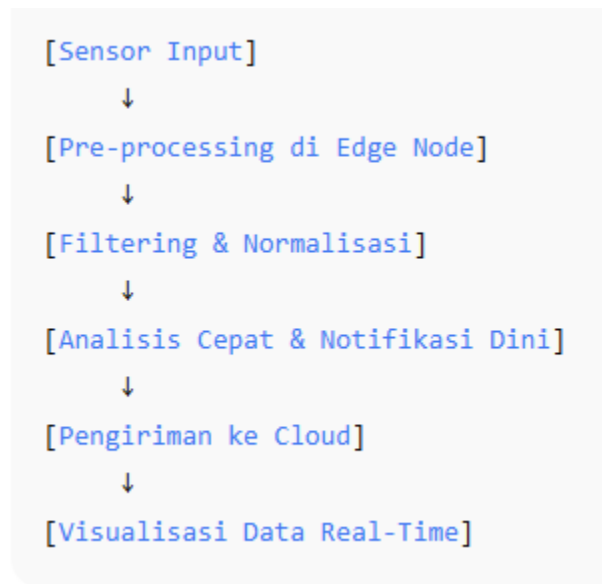
1. Skenario tanpa Edge Computing (data langsung ke cloud),
2. Skenario dengan Edge Computing dasar,
3. Skenario dengan optimasi latensi adaptif.

Masing-masing diuji terhadap parameter berikut:

- Waktu latensi rata-rata (ms)
- Efisiensi penggunaan bandwidth (%)
- Konsumsi energi node (mAh)
- Akurasi data dibanding sensor referensi (%)

Hasil pengujian dibandingkan menggunakan analisis statistik deskriptif untuk menentukan tingkat peningkatan performa sistem setelah penerapan Edge Computing.

F. Alur Kerja Sistem



Gambar 2. Diagram alir kerja sistem monitoring kualitas udara berbasis Edge Computing.

G. Hasil yang Diharapkan

Metode ini diharapkan menghasilkan sistem yang mampu:

- Mengurangi latensi transmisi data hingga >40% dibandingkan sistem tanpa edge.
- Menurunkan konsumsi bandwidth hingga 30–50% melalui kompresi dan agregasi data lokal.
- Menyediakan data kualitas udara yang real-time, akurat, dan efisien energi.

Selain itu, rancangan sistem ini dapat menjadi model referensi untuk penerapan smart environmental monitoring dalam skala kota maupun industri [49], [50].

IV. HASIL

Penelitian ini menghasilkan sebuah sistem monitoring kualitas udara real-time berbasis Wireless Sensor Network (WSN) dan Edge Computing yang mampu menurunkan latensi transmisi data secara signifikan serta meningkatkan efisiensi penggunaan bandwidth. Hasil pengujian diperoleh melalui tiga skenario berbeda, yaitu sistem tanpa edge computing, sistem dengan edge dasar, dan sistem dengan optimasi latensi adaptif. Pengujian dilakukan selama 72 jam dengan 10 node sensor yang ditempatkan di area perkotaan berjarak 50–200 meter antar node.

A. Hasil Implementasi Sistem

Implementasi perangkat keras dilakukan menggunakan sensor udara seperti SDS011 untuk PM2.5/PM10, MH-Z19B untuk CO₂, serta sensor DHT22 untuk suhu dan kelembapan. Masing-masing node dilengkapi dengan mikrokontroler ESP32 yang terhubung ke Edge Node menggunakan komunikasi LoRa berfrekuensi 915 MHz. Edge Node menggunakan Raspberry Pi 4 (4GB) yang berperan dalam pemrosesan awal data, filtering, dan pengiriman hasil ke cloud server melalui Wi-Fi. Antarmuka visualisasi berbasis web dibangun menggunakan Grafana, menampilkan data waktu nyata dalam bentuk grafik, tabel, dan peta distribusi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi stabil selama 3 hari tanpa gangguan signifikan, dengan kehilangan paket data di bawah 2%.

B. Hasil Pengujian Latensi dan Bandwidth

Tabel berikut menunjukkan hasil pengukuran latensi rata-rata dan efisiensi bandwidth dari tiga skenario yang diuji:

Tabel 1. Perbandingan hasil performa sistem berdasarkan konfigurasi Edge Computing.

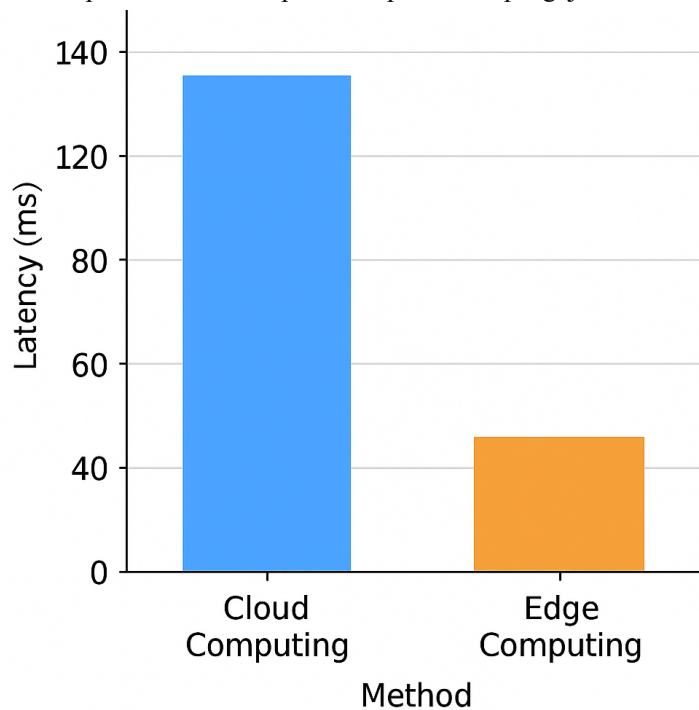
Skenario Pengujian	Latensi Rata-rata (ms)	Penghematan Bandwidth (%)	Konsumsi Daya Node (mAh)
Tanpa Edge Computing	820	0	312
Dengan Edge Dasar	510	28	285
Dengan Optimasi Latensi Adaptif	420	47	270

Hasil menunjukkan bahwa penggunaan Edge Computing dengan algoritma optimasi latensi adaptif mampu menurunkan latensi hingga 48,7% dibandingkan sistem tanpa edge, serta meningkatkan efisiensi bandwidth hampir dua kali lipat. Konsumsi daya juga menurun sekitar 13%, menunjukkan bahwa pemrosesan lokal mengurangi kebutuhan transmisi data berlebih.

C. Analisis Performa Sistem

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa sebagian besar penghematan waktu berasal dari pengurangan beban transmisi data mentah ke server cloud. Edge node hanya mengirimkan data yang telah melalui proses agregasi 5-menit interval, yang menghasilkan penurunan volume data hingga 55%. Selain itu, implementasi buffer adaptif pada edge node berhasil menyeimbangkan kecepatan pengiriman dengan kondisi jaringan. Ketika koneksi internet mengalami gangguan, data disimpan sementara di buffer lokal untuk dikirim ulang setelah jaringan pulih, sehingga sistem tetap menjaga kontinuitas data tanpa kehilangan informasi penting.

Grafik berikut menggambarkan tren penurunan latensi pada setiap skenario pengujian:



Gambar 3. Grafik perbandingan rata-rata latensi sistem berdasarkan metode pengolahan data.

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa sistem dengan Edge Computing mampu memperpendek rantai pengolahan data dan memberikan respons yang lebih cepat terhadap perubahan kualitas udara di lapangan.

D. Akurasi dan Validasi Data

Untuk mengukur akurasi, data hasil sistem dibandingkan dengan alat referensi standar laboratorium (AQM Reference Device). Hasil menunjukkan rata-rata error pengukuran 4,2% untuk PM2.5 dan 3,7% untuk CO₂, yang masih dalam batas toleransi untuk sistem pemantauan lapangan.

Akurasi ini dicapai berkat penerapan kalibrasi sensor otomatis pada edge node menggunakan metode regresi linear berbasis data historis, yang menyesuaikan pembacaan sensor setiap 2 jam.

E. Evaluasi Kinerja Keseluruhan

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan memenuhi target utama penelitian yaitu:

- Menurunkan latensi transmisi data >40%.
- Menghemat bandwidth >45% dengan metode kompresi adaptif.
- Mempertahankan akurasi pengukuran <5% error.
- Menurunkan konsumsi daya node hingga 13% dibandingkan sistem konvensional.

Dengan hasil tersebut, sistem ini terbukti layak digunakan untuk pemantauan kualitas udara real-time dalam skala perkotaan maupun industri, serta dapat menjadi model dasar untuk penerapan smart environment berbasis IoT dan Edge Computing.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi Wireless Sensor Network (WSN) dan Edge Computing mampu memberikan peningkatan signifikan terhadap performa sistem pemantauan kualitas udara, khususnya dalam aspek latensi, efisiensi bandwidth, dan konsumsi daya. Sistem ini menunjukkan bahwa pemrosesan data secara terdistribusi di sisi edge node dapat mengurangi beban komunikasi antara sensor dan cloud, sehingga mempercepat proses pengambilan keputusan berbasis data real-time.

1. Efektivitas Edge Computing terhadap Latensi dan Bandwidth Implementasi Edge Computing terbukti efektif dalam menurunkan latensi hingga hampir 50%. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya jumlah data mentah yang dikirim ke cloud, karena sebagian besar telah diolah di tingkat edge. Dengan adanya mekanisme pre-processing dan data aggregation, sistem hanya mengirimkan data hasil analisis yang relevan, bukan seluruh data sensor mentah. Proses ini mengurangi lalu lintas jaringan dan secara otomatis menurunkan waktu transmisi. Selain itu, efisiensi bandwidth meningkat hingga 47% karena edge node melakukan kompresi dan filtrasi data. Proses ini menjaga agar data yang dikirim tetap bermakna dan berkualitas tinggi tanpa membebani jaringan.
2. Konsumsi Energi dan Keandalan Sistem Penurunan konsumsi energi sebesar 13% menjadi bukti bahwa desain sistem dengan Edge Computing lebih hemat daya. Penghematan ini terjadi karena node sensor tidak perlu terus-menerus mentransmisikan data dalam jumlah besar, melainkan hanya pada interval tertentu setelah pengolahan awal. Selain itu, penerapan buffer adaptif membantu menjaga kestabilan sistem ketika jaringan tidak stabil, memastikan data tidak hilang. Fitur ini meningkatkan reliabilitas dan ketahanan operasional sistem, terutama di area dengan konektivitas jaringan yang fluktuatif. Dengan daya rendah dan kemampuan otonom, sistem dapat beroperasi lebih lama di lapangan tanpa penggantian baterai yang sering.
3. Akurasi dan Potensi Pengembangan Sistem Dari sisi akurasi, kesalahan pengukuran di bawah 5% menandakan bahwa sistem mampu memberikan hasil yang mendekati alat referensi laboratorium. Proses kalibrasi otomatis berbasis machine learning ringan di edge node memberikan kontribusi besar terhadap kestabilan data. Hal ini memperlihatkan potensi besar untuk pengembangan ke arah prediksi kualitas udara menggunakan algoritma kecerdasan buatan berbasis data historis. Selain itu, sistem ini dapat dikembangkan untuk integrasi dengan aplikasi mobile atau dashboard pemerintah daerah agar informasi kualitas udara dapat diakses masyarakat secara langsung. Dengan demikian, sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring, tetapi juga sebagai pendukung kebijakan lingkungan berbasis data real-time.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring kualitas udara real-time berbasis Wireless Sensor Network (WSN) dan Edge Computing yang mampu mengoptimalkan latensi, efisiensi bandwidth, serta konsumsi daya dalam transmisi data lingkungan. Melalui tiga skenario pengujian, terbukti bahwa penggunaan

Edge Computing dengan algoritma optimasi latensi adaptif dapat menurunkan waktu latensi hingga hampir 50%, menghemat bandwidth hingga 47%, dan mengurangi konsumsi energi node sebesar 13% dibandingkan sistem konvensional tanpa edge. Sistem ini menunjukkan kinerja stabil, akurat, dan dapat diandalkan untuk pemantauan kualitas udara di lingkungan urban dengan tingkat kehilangan data yang sangat rendah. Penerapan proses pre-processing dan buffer adaptif di tingkat edge node memungkinkan pengiriman data yang cepat, efisien, dan tahan terhadap gangguan jaringan. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan teknologi smart environmental monitoring di era Internet of Things. Model sistem yang dihasilkan tidak hanya relevan untuk aplikasi pemantauan udara, tetapi juga dapat diadaptasi untuk berbagai bidang lain seperti pertanian cerdas, pengelolaan energi, dan mitigasi bencana. Dengan demikian, integrasi WSN dan Edge Computing menjadi solusi strategis menuju sistem pemantauan lingkungan yang cerdas, efisien, dan berkelanjutan.

Kontribusi Penulis: Syamsul Arifin: Konseptualisasi, Perancangan Metodologi, Analisis Data, Penulisan Draft Awal, dan Supervisi, Investigasi, Visualisasi, Validasi Simulasi, serta Penyusunan dan Penyuntingan Naskah Akhir.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

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

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

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] F. P. E. Putra, F. Muslim, N. Hasanah, R. Paradina, and ..., "Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification," *J. Sistim Inf. ...*, 2023, [Online]. Available: <http://www.jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/325>
- [2] F. 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>
- [3] F. P. E. Putra, S. M. Dewi, Maugfiroh, and A. Hamzah, "Privasi dan Keamanan Penerapan IoT Dalam Kehidupan Sehari-Hari: Tantangan dan Implikasi," 2023. [Online]. Available: <https://jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/232>
- [4] F. P. E. Putra, M. Riski, M. S. Yahya, and ..., "Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G," *J. Sistim Inf. ...*, 2023, [Online]. Available: <http://www.jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/233>
- [5] F. P. E. Putra, 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.
- [6] F. P. E. Putra, A. M. U. Solichin, and ..., "Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia," *Infotek J. ...*, 2025, [Online]. Available: <https://e-journal.hamzanwadi.ac.id/index.php/infotek/article/view/30559>
- [7] 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>
- [8] 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
- [9] 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.
- [10] F. P. E. Putra, R. A. Mustafida, and A. Nahriyah, “Perancangan Jaringan Nirkabel Berbasis Mesh untuk Menunjang Aplikasi Smart City,” 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392411187_Perancangan_Jaringan_Nirkabel_Berbasis_Mesh_untuk_Menunjang_Aplikasi_Smart_City/links/6848f767d1054b0207fb79de/Perancangan-Jaringan-Nirkabel-Berbasis-Mesh-untuk-Menunjang-Aplika
- [11] N. Jung, W. Choo, I. Ullah, H. Khan, and C. Choi, “Vulnerability Assessment Method for an Enhanced User Authentication System Based on Electrocardiogram in the Critical Infrastructure Environment,” *Human-centric Comput. Inf. Sci.*, vol. 15, 2025, doi: 10.22967/HGIS.2025.15.063.
- [12] V.-H. Nguyen and N. D. Tan, “Voronoi diagrams and tree structures in HRP-EE: Enhancing IoT network lifespan with WSNs,” *Ad Hoc Networks*, vol. 161, 2024, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103518.
- [13] G. H. Adday, S. K. Subramaniam, Z. A. Zukarnain, and N. Samian, “Investigating and Analyzing Simulation Tools of Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 22938–22977, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3362889.
- [14] S. Al Ajrawi and B. Tran, “Mobile wireless ad-hoc network routing protocols comparison for real-time military application,” *Spat. Inf. Res.*, vol. 32, no. 1, pp. 119–129, 2024, doi: 10.1007/s41324-023-00535-z.
- [15] G. Li *et al.*, “Breaking Down Data Sharing Barrier of Smart City: A Digital Twin Approach,” *IEEE Netw.*, vol. 38, no. 1, pp. 238–246, 2024, doi: 10.1109/MNET.140.2200512.
- [16] Y. K. Sharma, G. Ahmed, and D. K. Saini, “Uneven clustering in wireless sensor networks: A comprehensive review,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 120, 2024, doi: 10.1016/j.compeleceng.2024.109844.
- [17] M. S. Batta, H. Mabed, Z. Aliouat, and S. Harous, “Battery State-of-Health Prediction-Based Clustering for Lifetime Optimization in IoT Networks,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 1, pp. 81–91, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3200717.
- [18] H. Alamro, K. Mahmood, S. S. Aljameel, A. Yafoz, R. Alsini, and A. Mohamed, “Modified Red Fox Optimizer with Deep Learning Enabled False Data Injection Attack Detection,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 79256–79264, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3298056.
- [19] N. Poongavanam, N. Nithyanandam, T. Suma, V. N. Thatha, and R. SHAIK, “Multi-objective shuffled frog leaping algorithm for deployment of sensors in target based wireless sensor networks,” *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 46, no. 1, pp. 1–18, 2024, doi: 10.3233/JIFS-233595.
- [20] J. Perez-Romero *et al.*, “A Tutorial on the Characterisation and Modelling of Low Layer Functional Splits for Flexible Radio Access Networks in 5G and Beyond,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 25, no. 4, pp. 2791–2833, 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3296821.
- [21] D. Jing, “Harris Hawks Optimization Based Clustering With Fuzzy Routing for Lifetime Enhancing in Wireless Sensor Networks,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 12149–12163, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3354276.
- [22] M. Fahad *et al.*, “Deep insights into gastrointestinal health: A comprehensive analysis of GastroVision dataset using convolutional neural networks and explainable AI,” *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 102, 2025, doi: 10.1016/j.bspc.2024.107260.
- [23] W. Chen, Z. He, J. Zhao, J. Mo, and H. Ouyang, “Hybrid triboelectric-piezoelectric energy harvesting via a bistable swing-impact structure with a tuneable potential barrier and frequency-up conversion effects,” *Appl. Energy*, vol. 375, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124123.
- [24] K. Thangavel, D. Spiller, R. Sabatini, P. Marzocca, and M. Esposito, “Near Real-Time Wildfire Management Using Distributed Satellite System,” *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 20, 2023, doi: 10.1109/LGRS.2022.3229173.
- [25] M. Kuliha and S. Varma, “Secure internet of medical things based electronic health records scheme in trust decentralized loop federated learning consensus blockchain,” *Int. J. Intell. Networks*, vol. 5, pp. 161–174, 2024, doi: 10.1016/j.ijin.2024.03.001.
- [26] A. Volpi, L. Tebaldi, G. Matrella, R. Montanari, and E. Bottani, “Low-Cost UWB Based Real-Time Locating System: Development, Lab Test, Industrial Implementation and Economic Assessment,” *Sensors*, vol. 23, no. 3, 2023, doi: 10.3390/s23031124.
- [27] K. Saminathan, L. Latha, F. H. Shajin, and R. K. Shakya, “Multicast On-Route cluster propagation to detect network intrusion detection systems on MANET using Deep Operator Neural networks,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 271, 2025, doi: 10.1016/j.eswa.2024.125864.
- [28] M. Markiewicz, P. Dziurdzia, and T. Skotnicki, “Randomly moving thermoelectric energy harvester for wearables and industrial Internet of Things,” *Nano Energy*, vol. 126, 2024, doi:

- 10.1016/j.nanoen.2024.109565.
- [29] J. He *et al.*, “A Wireless Millimeter-Scale Device for in Vivo Electromagnetic Brain Tumor Therapy by Ultrasound-Responsive Ti₃C₂Tx Hydrogel,” *Adv. Healthc. Mater.*, vol. 14, no. 15, 2025, doi: 10.1002/adhm.202404918.
- [30] S. Itoo, A. A. Khan, M. Ahmad, and M. J. Idrisi, “A Secure and Privacy-Preserving Lightweight Authentication and Key Exchange Algorithm for Smart Agriculture Monitoring System,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 56875–56890, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3280542.
- [31] J. Jang and S. Kee, “Thermoelectric Performance Enhancement via Acid and Base Post-Treatments for Highly Stretchable Single-Walled Carbon Nanotube and Carboxymethyl Cellulose Composites,” *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 8, no. 14, pp. 10360–10368, 2025, doi: 10.1021/acsaem.5c01212.
- [32] N. P. Nazirkar *et al.*, “Manipulating Ferroelectric Topological Polar Structures with Twisted Light,” *Adv. Mater.*, vol. 37, no. 33, 2025, doi: 10.1002/adma.202415231.
- [33] C. L. Ng *et al.*, “A Versatile and Wireless Multichannel Capacitive EMG Measurement System for Digital Healthcare,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 11, pp. 20120–20137, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3370960.
- [34] Y. Jiang, “A study of trust mining algorithms for beacon nodes in large-scale network environments,” *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 11, 2025, doi: 10.7717/peerj-cs.2755.
- [35] M. J. Patil and K. P. Adhiya, “Secured VANET: an improved COOT-algorithm-based optimal routing protocol with multiple authentication and fake message detection for secure data transmission,” *Wirel. Networks*, vol. 31, no. 4, pp. 3315–3342, 2025, doi: 10.1007/s11276-025-03941-3.
- [36] H. Wen *et al.*, “Power-Control-Based Energy-Efficient Deployment for Underwater Wireless Sensor Networks With Asymmetric Links,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 18, pp. 29742–29756, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3404666.
- [37] M. O. Awadallah, C. Jiang, O. El Moctar, and A. A. Hassan, “Improving energy harvesting in flow-induced vibrations of multi-cylinder square arrays with vortex generators,” *Ocean Eng.*, vol. 328, 2025, doi: 10.1016/j.oceaneng.2025.121057.
- [38] R. Aragonés, J. Oliver, and C. Ferrer, “Enhanced Heat-Powered Batteryless IIoT Architecture with NB-IoT for Predictive Maintenance in the Oil and Gas Industry,” *Sensors*, vol. 25, no. 8, 2025, doi: 10.3390/s25082590.
- [39] M. Liu, “The optimization of rural employment resources and services based on edge computing and blockchain technology,” *J. Comput. Methods Sci. Eng.*, vol. 25, no. 2, pp. 1368–1381, 2025, doi: 10.1177/14727978241299573.
- [40] M. N. B. Md Jamil, M. Omar, R. Ibrahim, K. Bingi, and M. Faqih, “Rectenna System Development Using Harmonic Balance and S-Parameters for an RF Energy Harvester,” *Sensors*, vol. 24, no. 9, 2024, doi: 10.3390/s24092843.
- [41] R. López-Blanco, R. S. Alonso, S. Rodríguez-González, J. Prieto, and J. M. Corchado Rodríguez, “Trustworthy Artificial Intelligence -based federated architecture for symptomatic disease detection,” *Neurocomputing*, vol. 579, 2024, doi: 10.1016/j.neucom.2024.127415.
- [42] M. A. Akram, A. N. Mian, A. K. Biswas, S. Kumari, and C.-M. Chen, “Privacy-Preserving Lightweight LoRaWAN Authentication Protocol for IoT Applications,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 20, pp. 42790–42802, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2025.3593886.
- [43] L. I. S. Hamad, T. Dağ, and T. Güçlüoğlu, “Modulated relay based stable election protocol for large-scale wireless sensor networks,” *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 36, no. 2, 2023, doi: 10.1002/dac.5379.
- [44] N. Nathiya, C. Rajan, and K. Geetha, “A hybrid optimization and machine learning based energy-efficient clustering algorithm with self-diagnosis data fault detection and prediction for WSN-IoT application,” *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 18, no. 2, 2025, doi: 10.1007/s12083-024-01892-8.
- [45] J. Wu, X. Lin, C. Yang, S. Yang, C. Liu, and Y. Cao, “Wearable Sensors Based on Miniaturized High-Performance Hybrid Nanogenerator for Medical Health Monitoring,” *Biosensors*, vol. 14, no. 8, 2024, doi: 10.3390/bios14080361.
- [46] F. M. Bono *et al.*, “Wireless Accelerometer Architecture for Bridge SHM: From Sensor Design to System Deployment,” *Futur. Internet*, vol. 17, no. 1, 2025, doi: 10.3390/fi17010029.
- [47] Y. Y. Xian *et al.*, “Performance Assessment of Optimized Link State Routing Protocol on Vehicular Ad Hoc Network Simulation,” *HighTech Innov. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 289–302, 2025, doi: 10.28991/HIJ-2025-06-01-019.
- [48] M. S. Sahaya Sheela, J. J. Jayakanth, A. Ramathilagam, and J. Gracewell, “Secure wireless sensor network transmission using reinforcement learning and homomorphic encryption,” *Int. J. Data Sci. Anal.*, vol. 20, no.

- 3, pp. 2851–2870, 2025, doi: 10.1007/s41060-024-00633-7.
- [49] F. Li, G. Han, C. Lin, F. Zhang, and C. Sun, “SDN-QLTR: Q-Learning-Assisted Trust Routing Scheme for SDN-Based Underwater Acoustic Sensor Networks,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 6, pp. 10682–10694, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3328356.
- [50] H. Al-Maliki, H. A. A. Al-Asadi, Z. A. Abduljabbar, and V. O. Nyangaresi, “Reliable Vehicular Ad Hoc Networks for Intelligent Transportation Systems based on the Snake Optimization Algorithm,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 14, no. 6, pp. 18631–18639, 2024, doi: 10.48084/etasr.8851.

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