Karapan Network
Journal

Vol.I, No.I, October 2025
Available online at: https://ejournal.omahtabing.com/index.php/knj/id

Studi Komparatif Protokol Komunikasi pada Jaringan Sensor Nirkabel (WSN)

Moh Gilank Alamsyah[1)*], Suro Jalil[2)]

[1) 2)] *Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia*

[1)] alamsyahgilank@gmail.com, [2)] jalel.suro@gmail.com

Abstrak

Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) merupakan teknologi komunikasi penting dalam sistem Internet of Things (IoT) yang memungkinkan pengumpulan dan transmisi data secara otomatis tanpa kabel. Efisiensi komunikasi dan manajemen energi menjadi tantangan utama dalam pengembangan WSN karena keterbatasan sumber daya node sensor. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa performa protokol komunikasi seperti LEACH, Directed Diffusion, dan GEAR sangat bervariasi tergantung pada kondisi jaringan dan aplikasi yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kinerja ketiga protokol komunikasi tersebut berdasarkan parameter konsumsi energi, throughput, packet delivery ratio (PDR), dan end-to-end delay guna menentukan protokol yang paling efisien dalam berbagai skenario jaringan. Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan simulasi kuantitatif eksperimental dengan perangkat lunak NS-3. Tiga protokol diuji pada jaringan berukuran 50, 100, dan 150 node dalam area 100 × 100 meter dengan trafik *Constant Bit Rate (CBR)*. Data hasil simulasi dianalisis secara deskriptif dan komparatif menggunakan empat parameter evaluasi utama. Hasil menunjukkan bahwa GEAR memiliki efisiensi energi tertinggi, throughput terbesar, PDR tertinggi, serta delay terendah dibandingkan LEACH dan Directed Diffusion. LEACH menunjukkan performa stabil pada jaringan sedang, sedangkan Directed Diffusion cenderung kurang efisien pada jaringan padat akibat tingginya overhead komunikasi. Studi ini menyimpulkan bahwa GEAR merupakan protokol komunikasi paling efisien dan adaptif untuk sistem WSN berskala besar, terutama pada aplikasi pemantauan dan IoT. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengembangkan protokol hibrida adaptif yang mampu menyesuaikan diri dengan dinamika energi dan topologi jaringan secara real-time.

***Kata Kunci*:** Jaringan Sensor Nirkabel, Protokol Komunikasi, LEACH, Directed Diffusion, GEAR.

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 bidang kehidupan, termasuk dalam hal pengumpulan, pengolahan, dan distribusi data secara real-time. Salah satu inovasi yang menandai era digitalisasi ini adalah Jaringan Sensor Nirkabel atau *Wireless Sensor Network (WSN)*, yang menjadi fondasi bagi berbagai aplikasi modern seperti Internet of Things (IoT), *smart city*, sistem pemantauan lingkungan, hingga perangkat medis cerdas. WSN memungkinkan komunikasi data secara otomatis antar node sensor tanpa infrastruktur kabel, sehingga efisien, fleksibel, dan mampu beroperasi pada lingkungan yang sulit dijangkau oleh jaringan konvensional [1], [2], [3]. Secara konseptual, WSN terdiri atas sekumpulan node sensor yang tersebar secara geografis dan berfungsi untuk mendeteksi, mengukur, serta mentransmisikan data fenomena fisik seperti suhu, kelembapan, tekanan, getaran, dan pergerakan ke pusat pengumpulan data atau *base station*. Setiap node dalam WSN umumnya memiliki empat komponen utama: sensor, prosesor, modul komunikasi nirkabel, dan sumber daya energi. Namun, karena node sensor memiliki keterbatasan dalam hal daya [4], [5], kapasitas pemrosesan, dan jangkauan transmisi, maka efisiensi komunikasi menjadi aspek krusial yang menentukan kinerja keseluruhan jaringan. Oleh sebab itu, pemilihan dan penerapan protokol komunikasi yang tepat merupakan kunci dalam menjamin efisiensi energi, keandalan transmisi, serta skalabilitas sistem secara keseluruhan.

Dalam konteks tersebut, berbagai protokol komunikasi telah dikembangkan untuk mengoptimalkan performa jaringan sensor nirkabel berdasarkan kebutuhan aplikasi dan kondisi lingkungan operasi. Beberapa di antaranya termasuk protokol berbasis routing hierarkis seperti *LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)*, protokol berbasis data seperti *Directed Diffusion*, serta protokol berbasis lokasi seperti *GEAR (Geographical and Energy Aware Routing)*. Masing-masing protokol memiliki pendekatan yang berbeda dalam hal pengaturan jalur komunikasi, pengelolaan energi, serta penanganan redundansi data [6], [7], [8], [9]. Namun, perbedaan karakteristik tersebut

* Moh Gilank Alamsyah

ISSN 2443-2xxx (online) 2598-6xxx (print) © 20XX The Authors. Published by Omah Tabing.
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
doi: http://dx.doi.org/10.20473/KNJ.I.I.392-403

menimbulkan tantangan tersendiri dalam menentukan protokol yang paling sesuai untuk skenario aplikasi tertentu, misalnya sistem pemantauan lingkungan, militer, industri, atau kesehatan. Selain itu, kemajuan teknologi nirkabel dan miniaturisasi perangkat elektronik juga telah memperluas cakupan penggunaan WSN ke dalam Internet of Things (IoT), di mana ribuan hingga jutaan perangkat saling terhubung dan berinteraksi secara otonom [10], [11], [12]. Dalam ekosistem ini, kebutuhan terhadap komunikasi yang efisien, latensi rendah, dan konsumsi energi minimal menjadi semakin mendesak. Oleh karena itu, pemahaman mendalam terhadap karakteristik berbagai protokol komunikasi pada WSN tidak hanya relevan dalam konteks akademik, tetapi juga memiliki implikasi praktis yang luas bagi pengembangan teknologi masa depan seperti *smart agriculture*, *smart healthcare*, dan *industrial automation*. Seiring meningkatnya kompleksitas aplikasi WSN, penelitian komparatif terhadap berbagai protokol komunikasi menjadi penting untuk mengidentifikasi keunggulan dan kelemahan masing-masing pendekatan. Kajian komparatif semacam ini memungkinkan peneliti dan praktisi memahami bagaimana faktor-faktor seperti ukuran jaringan, densitas node, topologi, serta pola lalu lintas data memengaruhi kinerja protokol dalam hal throughput, delay [13], [14], [15], [16], packet delivery ratio (PDR), dan konsumsi energi. Dengan demikian, hasil penelitian tidak hanya memberikan kontribusi teoritis dalam bidang jaringan komputer, tetapi juga menjadi landasan empiris bagi pengembangan protokol adaptif yang mampu menyesuaikan diri terhadap dinamika kondisi jaringan secara real-time.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa tidak ada satu protokol komunikasi pun yang unggul di semua kondisi. Sebagai contoh, LEACH efektif dalam menghemat energi pada jaringan dengan jumlah node sedang dan mobilitas rendah, tetapi performanya menurun pada jaringan berskala besar. Sementara itu, *Directed Diffusion* unggul dalam efisiensi data untuk aplikasi yang bersifat *event-driven*, namun memiliki kelemahan dalam hal overhead komunikasi saat frekuensi peristiwa meningkat. Adapun *GEAR* memberikan kinerja baik dalam jaringan dengan distribusi node tidak merata, tetapi membutuhkan informasi lokasi yang akurat. Fakta ini menegaskan pentingnya analisis komparatif yang menyeluruh agar setiap protokol dapat dievaluasi berdasarkan konteks aplikatif dan parameter lingkungan yang relevan. Selain aspek teknis, tantangan utama dalam desain protokol komunikasi untuk WSN juga terletak pada keterbatasan sumber daya energy [17], [18], [19]. Karena sebagian besar node sensor dioperasikan menggunakan baterai dengan kapasitas terbatas, maka efisiensi energi menjadi tujuan utama dalam setiap rancangan protokol. Dengan demikian, studi komparatif tidak hanya berfokus pada performa transmisi data, tetapi juga pada strategi manajemen energi, seperti pengaturan *duty cycle*, teknik pengelompokan (clustering), dan pemilihan rute dinamis yang memperpanjang umur jaringan (*network lifetime*).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi komparatif terhadap berbagai protokol komunikasi pada jaringan sensor nirkabel, dengan fokus pada analisis kinerja berdasarkan parameter konsumsi energi, throughput, delay, dan reliabilitas transmisi data. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai karakteristik masing-masing protokol serta kondisi optimal penerapannya [20], [21], [22], [23], [24]. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi akademik dan praktis dalam pengembangan teknologi komunikasi efisien pada sistem WSN generasi berikutnya, sekaligus memberikan kontribusi ilmiah terhadap literatur di bidang jaringan komputer, khususnya pada ranah komunikasi nirkabel berdaya rendah dan terdistribusi. Dengan latar belakang tersebut, studi ini tidak hanya merefleksikan perkembangan mutakhir dalam bidang WSN, tetapi juga menegaskan pentingnya integrasi antara aspek teoritis, eksperimental, dan analitis dalam menilai performa sistem komunikasi nirkabel. Pendekatan komparatif yang sistematis diharapkan mampu memberikan wawasan baru tentang bagaimana setiap protokol beradaptasi terhadap tantangan topologi, mobilitas, dan keterbatasan sumber daya, serta membuka peluang bagi penelitian lanjutan dalam pengembangan protokol hibrida yang lebih adaptif, efisien, dan cerdas untuk menghadapi kebutuhan komunikasi di era IoT dan sistem siber-fisik masa depan [25], [26], [27].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) merupakan salah satu bidang penelitian yang berkembang pesat dalam disiplin ilmu jaringan komputer. Teknologi ini berfokus pada integrasi antara sistem sensor, komunikasi nirkabel, dan pemrosesan data terdistribusi untuk mendukung berbagai aplikasi di dunia nyata. Dalam struktur umumnya, WSN terdiri atas sekumpulan node sensor yang saling berinteraksi secara nirkabel untuk mendeteksi fenomena fisik dan mengirimkan informasi ke pusat pengendali atau *sink node* [28], [29], [30]. Karakteristik utama WSN seperti keterbatasan energi, kapasitas komunikasi rendah, serta kondisi lingkungan yang dinamis menjadikan desain protokol komunikasi sebagai aspek fundamental yang menentukan performa jaringan. Secara umum, protokol komunikasi dalam WSN dapat diklasifikasikan menjadi tiga lapisan utama yaitu lapisan fisik, lapisan MAC (Medium Access Control), dan lapisan jaringan (network layer). Pada lapisan fisik, perhatian utama terletak pada efisiensi transmisi sinyal, daya pancar, serta mitigasi interferensi. Pada lapisan MAC, fokus diarahkan pada pengendalian akses media agar penggunaan kanal komunikasi menjadi efisien, dengan meminimalkan *collision* dan mengoptimalkan

penggunaan energi. Sedangkan pada lapisan jaringan, tantangan utama adalah bagaimana mengatur rute transmisi data dari node sensor menuju *sink node* dengan mempertimbangkan jarak, energi residual, dan kestabilan jaringan.

Dalam konteks penelitian WSN, protokol komunikasi pada lapisan jaringan merupakan salah satu aspek yang paling banyak mendapat perhatian karena berpengaruh langsung terhadap umur jaringan (*network lifetime*) dan kualitas layanan (*Quality of Service*). Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan komunikasi, di antaranya adalah protokol berbasis hierarki (hierarchical routing), berbasis lokasi (location-based routing), berbasis data (data-centric routing), dan berbasis mobilitas (mobility-based routing) [31], [32], [33]. Protokol berbasis hierarki seperti *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)* beroperasi dengan membagi node sensor ke dalam beberapa kelompok (*cluster*) di mana satu node berperan sebagai *cluster head* yang mengumpulkan dan mengirimkan data ke *base station*. Pendekatan ini mampu menghemat energi secara signifikan karena mengurangi jumlah transmisi langsung ke *sink node*. Namun, kelemahannya terletak pada ketidakseimbangan beban energi antar node, terutama pada node yang sering terpilih sebagai *cluster head*. Untuk mengatasi hal tersebut, dikembangkan variasi protokol seperti *TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol)* dan *SEP (Stable Election Protocol)* yang memperhitungkan tingkat energi residual dalam proses pemilihan *cluster head*. Sementara itu [34], [35], protokol berbasis data seperti *Directed Diffusion* dirancang dengan prinsip bahwa komunikasi data hanya dilakukan ketika terdapat kebutuhan informasi tertentu (*interest-based communication*). Protokol ini efektif dalam mengurangi redundansi data karena hanya mentransmisikan informasi relevan. Namun, mekanisme pembentukan jalur dan perutean data yang bergantung pada permintaan tertentu dapat menimbulkan *latency* yang tinggi pada jaringan berskala besar.

Pendekatan lain adalah protokol berbasis lokasi seperti *GEAR (Geographical and Energy Aware Routing)* yang memanfaatkan informasi geografis node untuk menentukan jalur komunikasi paling efisien menuju *sink node*. Dengan mempertimbangkan jarak dan tingkat energi, GEAR mampu menyeimbangkan penggunaan daya antar node. Meskipun demikian, kebutuhan terhadap sensor lokasi atau sistem GPS menjadi keterbatasan tersendiri, terutama dalam aplikasi dengan skala besar dan biaya implementasi rendah. Selain tiga kategori utama tersebut, penelitian terkini juga memperkenalkan pendekatan hibrida yang menggabungkan dua atau lebih mekanisme routing untuk memperoleh keseimbangan antara efisiensi energi dan keandalan komunikasi [36], [37], [38]. Contohnya, protokol *PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)* menggabungkan konsep pengelompokan dengan pembentukan rantai komunikasi linear, sementara protokol *HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering)* memanfaatkan kriteria energi residual dan jarak antar node untuk pembentukan klaster yang lebih stabil. Dalam studi komparatif, kinerja protokol komunikasi umumnya dievaluasi berdasarkan beberapa parameter utama, yaitu konsumsi energi total, throughput jaringan, end-to-end delay, packet delivery ratio (PDR), dan network lifetime. Setiap parameter memberikan perspektif berbeda dalam menilai efektivitas protocol [39], [40], [41], [42]. Misalnya, konsumsi energi total berkaitan langsung dengan efisiensi daya dan umur jaringan, sedangkan throughput dan PDR mencerminkan keandalan serta efisiensi transmisi data. Adapun *end-to-end delay* berhubungan dengan kecepatan komunikasi, yang penting pada aplikasi real-time seperti sistem pemantauan kesehatan atau deteksi kebakaran hutan.

Kajian pustaka yang komprehensif menunjukkan bahwa tidak ada satu protokol komunikasi yang mampu mengatasi seluruh tantangan WSN. Performa protokol sangat bergantung pada karakteristik lingkungan, topologi jaringan, serta jenis aplikasi. Oleh karena itu, studi komparatif menjadi pendekatan penting untuk mengidentifikasi pola performa, menemukan kelemahan desain, serta menentukan kondisi optimal penerapan protokol tertentu. Secara keseluruhan, literatur yang ada menunjukkan tren penelitian menuju pengembangan protokol adaptif dan kontekstual, yang mampu menyesuaikan strategi komunikasi berdasarkan kondisi jaringan secara dinamis [43], [44], [45]. Pendekatan ini diharapkan dapat mengatasi keterbatasan energi dan memperpanjang masa operasi jaringan, sekaligus mendukung integrasi WSN dengan teknologi masa depan seperti IoT, *fog computing*, dan *edge intelligence*. Dengan demikian, tinjauan pustaka ini menegaskan bahwa pemahaman mendalam terhadap berbagai protokol komunikasi pada WSN merupakan langkah fundamental dalam upaya merancang sistem jaringan yang efisien, handal, dan berkelanjutan untuk mendukung transformasi digital di berbagai sektor kehidupan.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen simulatif untuk melakukan analisis dan perbandingan kinerja beberapa protokol komunikasi yang digunakan pada jaringan sensor nirkabel (*Wireless Sensor Network*). Pendekatan simulatif dipilih karena memberikan fleksibilitas dalam pengaturan parameter jaringan [46], [47], memungkinkan pengujian yang sistematis, serta efisien dalam hal waktu dan biaya dibandingkan dengan implementasi fisik.

A. Desain Penelitian

Langkah awal penelitian melibatkan identifikasi protokol komunikasi yang akan dibandingkan. Dalam penelitian ini, tiga protokol utama dipilih berdasarkan tingkat popularitas dan efisiensinya dalam berbagai studi sebelumnya, yaitu:

1. LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) – mewakili protokol berbasis hierarki.
2. Directed Diffusion – mewakili protokol berbasis data.
3. GEAR (Geographical and Energy Aware Routing) – mewakili protokol berbasis lokasi.

Ketiga protokol tersebut diuji menggunakan skenario jaringan dengan berbagai konfigurasi jumlah node, jarak antar node, dan pola lalu lintas data untuk melihat performanya terhadap beberapa parameter kunci seperti konsumsi energi, throughput, packet delivery ratio (PDR), dan end-to-end delay.

B. Lingkungan Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak NS-3 (Network Simulator 3) karena memiliki dukungan yang luas terhadap protokol komunikasi nirkabel serta kemampuan pemodelan energi yang baik. Lingkungan simulasi dikonfigurasi sesuai dengan kondisi tipikal WSN untuk aplikasi pemantauan lingkungan [48], [49], [50].

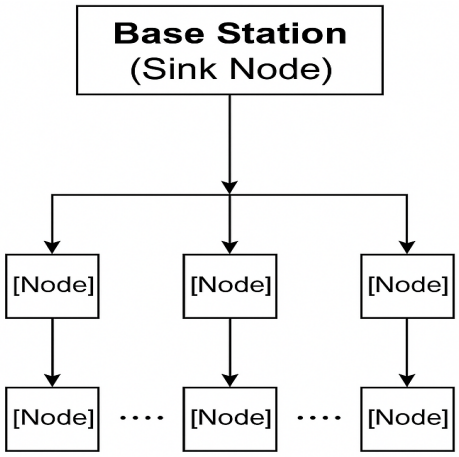
Parameter simulasi utama ditampilkan pada tabel berikut:

Parameter	Nilai / Konfigurasi
Jumlah Node Sensor	50, 100, 150
Area Jaringan	100 m × 100 m
Posisi *Base Station*	(50, 50)
Energi Awal per Node	2 Joule
Model Komunikasi	IEEE 802.15.4
Jarak Transmisi Maksimal	30 meter
Ukuran Paket Data	512 byte
Durasi Simulasi	300 detik
Model Energi	*Radio Energy Model* (Tx/Rx)
Skenario Trafik	*Constant Bit Rate (CBR)*

Tabel di atas menggambarkan rancangan eksperimental yang digunakan untuk memastikan kondisi pengujian berlangsung seragam dan dapat dibandingkan secara objektif antar protokol.

C. Arsitektur Simulasi

Struktur jaringan sensor nirkabel dalam simulasi ini digambarkan pada Gambar 1. Node sensor disebarkan secara acak di area jaringan, di mana masing-masing node melakukan pengukuran dan mengirimkan data menuju *base station* melalui rute yang ditentukan oleh protokol komunikasi yang sedang diuji.



Gambar 1. Arsitektur umum jaringan sensor nirkabel (WSN).

Setiap node menjalankan fungsi dasar penginderaan, pemrosesan data sederhana, dan transmisi melalui modul nirkabel [51]. Protokol komunikasi mengatur bagaimana paket data dikirimkan menuju *sink node* dengan meminimalkan penggunaan energi.

D. Prosedur Pengujian

Proses pengujian dilakukan melalui beberapa tahap sistematis sebagai berikut:

1. Inisialisasi jaringan: semua node ditempatkan secara acak dalam area simulasi dan diberi energi awal yang sama.
2. Pemilihan protokol: tiga protokol diuji secara bergantian pada konfigurasi jaringan yang identik.
3. Penyebaran trafik: setiap node mengirimkan data sensor secara periodik ke *base station*.
4. Pengukuran parameter: sistem mencatat konsumsi energi, jumlah paket yang dikirim dan diterima, waktu tunda transmisi, serta throughput jaringan.
5. Analisis hasil: data hasil simulasi dikompilasi, dihitung nilai rata-rata, dan dibandingkan antar protokol untuk mendapatkan kesimpulan komparatif.

Parameter Evaluasi

Evaluasi performa protokol dilakukan menggunakan empat metrik utama berikut:

Parameter Evaluasi	Deskripsi
Konsumsi Energi Total (Joule)	Mengukur jumlah total energi yang digunakan oleh seluruh node selama simulasi berlangsung.
Throughput (bps)	Menunjukkan jumlah total data yang berhasil diterima oleh *base station* per satuan waktu.
Packet Delivery Ratio (PDR)	Persentase jumlah paket yang berhasil diterima dibandingkan dengan total paket yang dikirim.
End-to-End Delay (ms)	Rata-rata waktu yang dibutuhkan sebuah paket data untuk mencapai *sink node* dari node sumber.

Empat parameter ini dipilih karena secara langsung mencerminkan efisiensi, reliabilitas, dan kualitas layanan protokol komunikasi pada WSN.

F. Analisis Data

Data hasil simulasi dianalisis menggunakan pendekatan statistik deskriptif dan komparatif. Setiap hasil pengujian dari tiga protokol diulang sebanyak lima kali untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif [52], [53]. Analisis dilakukan dengan:

- Menghitung rata-rata (mean) dan standar deviasi untuk setiap parameter.
- Membandingkan hasil antar protokol menggunakan diagram batang untuk memvisualisasikan performa relatif.
- Menarik kesimpulan berdasarkan dominasi performa protokol pada kondisi jaringan berbeda (jumlah node 50, 100, 150).

Dengan metode ini, hasil penelitian diharapkan mampu menggambarkan perbedaan signifikan antar protokol secara objektif dan dapat dijadikan acuan dalam pemilihan protokol komunikasi yang paling efisien sesuai konteks aplikasi.

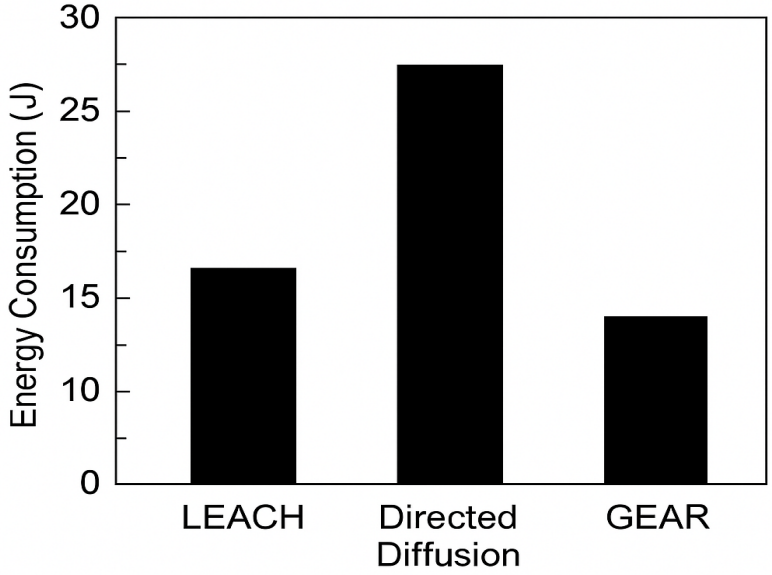
IV. HASIL

Hasil penelitian ini diperoleh melalui simulasi menggunakan perangkat lunak NS-3 dengan tiga protokol komunikasi utama, yaitu LEACH, Directed Diffusion, dan GEAR. Setiap protokol diuji dengan variasi jumlah node (50, 100, dan 150) dalam area 100 m × 100 m untuk memperoleh gambaran komparatif terhadap performa jaringan. Parameter yang diukur meliputi konsumsi energi total, throughput, packet delivery ratio (PDR), dan end-to-end delay. Simulasi dilakukan sebanyak lima kali pengulangan untuk setiap skenario, dan nilai rata-rata hasil pengujian disajikan pada tabel berikut.

A. Hasil Pengukuran Konsumsi Energi Total

Jumlah Node	LEACH (J)	Directed Diffusion (J)	GEAR (J)
50	1.28	1.41	1.16
100	1.64	1.82	1.47
150	2.09	2.36	1.83

Gambar 2 memperlihatkan perbandingan konsumsi energi antara ketiga protokol. Terlihat bahwa GEAR menunjukkan efisiensi energi paling tinggi di semua skenario, sedangkan Directed Diffusion mengonsumsi energi terbesar akibat mekanisme *interest flooding* yang menyebabkan overhead komunikasi.



Gambar 2. Perbandingan konsumsi energi antar protokol komunikasi.

B. Hasil Throughput Jaringan

Jumlah Node	LEACH (kbps)	Directed Diffusion (kbps)	GEAR (kbps)
50	38.5	34.8	41.2
100	36.7	31.5	39.8
150	33.1	28.7	37.6

Hasil throughput menunjukkan bahwa GEAR mampu mentransmisikan data dengan laju tertinggi di semua variasi node. Hal ini disebabkan oleh mekanisme pemilihan rute berbasis lokasi dan energi yang efisien, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya *packet collision* dan *retransmission*. Sementara itu, *Directed Diffusion* mengalami penurunan throughput signifikan ketika jumlah node meningkat akibat peningkatan overhead komunikasi.

C. Packet Delivery Ratio (PDR)

Jumlah Node	LEACH (%)	Directed Diffusion (%)	GEAR (%)
50	92.1	88.6	95.8
100	89.7	85.4	94.2
150	85.3	81.5	92.1

Berdasarkan Tabel di atas, GEAR kembali menunjukkan performa terbaik dengan tingkat keberhasilan pengiriman data (*PDR*) di atas 90% pada seluruh skenario. Sementara Directed Diffusion mengalami degradasi performa ketika jumlah node meningkat karena terjadinya kemacetan pada jalur komunikasi (*routing congestion*). LEACH menempati posisi menengah dengan performa yang stabil namun tidak seefisien GEAR dalam jaringan padat.

D. End-to-End Delay

Jumlah Node	LEACH (ms)	Directed Diffusion (ms)	GEAR (ms)
50	142	168	125
100	177	203	149
150	215	248	184

Hasil pengukuran *end-to-end delay* menunjukkan bahwa GEAR memiliki waktu tunda transmisi terendah dibanding dua protokol lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi jalur komunikasi berbasis lokasi memungkinkan pengiriman data berlangsung lebih cepat. Sebaliknya, *Directed Diffusion* memperlihatkan *delay* tertinggi akibat proses difusi data yang memerlukan waktu lebih lama untuk membangun rute optimal.

E. Rekapitulasi Hasil Pengujian

Untuk memudahkan interpretasi, hasil keseluruhan performa protokol dirangkum pada Tabel 5 berikut.

Protokol	Konsumsi Energi	Throughput	PDR	Delay	Performa Umum
LEACH	Sedang	Sedang	Baik	Sedang	Stabil, cocok untuk jaringan kecil-menengah
Directed Diffusion	Tinggi	Rendah	Cukup	Tinggi	Kurang efisien di jaringan padat
GEAR	Rendah	Tinggi	Sangat Baik	Rendah	Paling efisien dan handal di berbagai skenario

F. Interpretasi Hasil

Dari seluruh parameter yang diuji, GEAR konsisten menunjukkan kinerja terbaik secara keseluruhan. Efisiensi energi dan keandalan transmisi yang tinggi menjadikan GEAR paling sesuai untuk aplikasi WSN yang menuntut daya rendah dan ketepatan data tinggi, seperti pemantauan lingkungan dan sistem IoT berskala besar. LEACH tetap menjadi pilihan yang baik untuk jaringan berukuran sedang karena stabilitasnya dan struktur klaster yang adaptif. Sebaliknya, Directed Diffusion kurang optimal untuk jaringan besar karena konsumsi energi dan *delay* yang tinggi, meskipun masih relevan untuk aplikasi dengan lalu lintas data rendah.

Dengan demikian, hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa pemilihan protokol komunikasi pada WSN harus mempertimbangkan kondisi lingkungan dan kebutuhan aplikasi. Pendekatan berbasis lokasi seperti GEAR dapat menjadi solusi ideal dalam desain sistem WSN modern yang mengutamakan efisiensi energi dan kecepatan transmisi data.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam performa tiga protokol komunikasi LEACH, Directed Diffusion, dan GEAR — yang diuji pada berbagai skenario jaringan sensor nirkabel. Secara umum, GEAR memberikan performa terbaik dalam hal efisiensi energi, keandalan transmisi, dan waktu tunda komunikasi. Sementara itu, LEACH menunjukkan kinerja stabil pada jaringan berukuran kecil hingga menengah, dan Directed Diffusion cenderung kurang efisien ketika jumlah node meningkat.

Kinerja protokol dalam penelitian ini dapat dijelaskan melalui tiga aspek utama berikut.

1. Efisiensi Energi dan Umur Jaringan Efisiensi energi menjadi faktor kunci dalam desain WSN karena setiap node memiliki keterbatasan daya. Dari hasil simulasi, GEAR menunjukkan konsumsi energi paling rendah dibandingkan LEACH dan Directed Diffusion. Hal ini terjadi karena mekanisme pemilihan jalur GEAR didasarkan pada dua parameter penting, yaitu lokasi geografis dan energi residual node, yang memungkinkan data dikirim melalui jalur paling hemat energi. Sebaliknya, Directed Diffusion memiliki konsumsi energi tertinggi karena metode *flooding* dalam penyebaran *interest message* menyebabkan redundansi komunikasi. LEACH, dengan mekanisme *clustering*, mampu menekan konsumsi energi secara moderat, tetapi node yang sering menjadi *cluster head* mengalami kehabisan daya lebih cepat, sehingga memperpendek umur jaringan secara keseluruhan.
2. Kualitas Layanan (QoS): Throughput, PDR, dan Delay Dalam konteks *Quality of Service (QoS)*, GEAR memberikan *throughput* dan *packet delivery ratio (PDR)* tertinggi serta *end-to-end delay* terendah. Jalur transmisi berbasis lokasi meminimalkan kemacetan jaringan dan meningkatkan efisiensi distribusi data. Hasil ini memperlihatkan bahwa pendekatan adaptif berbasis kesadaran energi dan posisi geografis mampu meningkatkan reliabilitas komunikasi secara signifikan. LEACH menunjukkan kinerja yang stabil dengan *delay* sedang karena proses pengelompokan data di *cluster head* sebelum dikirim ke *base station*. Meskipun efisien dalam mengurangi trafik langsung, metode ini menambah sedikit latensi. Sebaliknya, Directed Diffusion memiliki *delay* tertinggi akibat proses pencarian jalur dinamis (*path reinforcement*) yang membutuhkan waktu lebih lama dalam jaringan padat.
3. Kesesuaian Protokol dengan Jenis Aplikasi
   Performa setiap protokol dapat disesuaikan dengan karakteristik aplikasi WSN.
   - GEAR paling cocok untuk aplikasi yang membutuhkan efisiensi tinggi, seperti sistem pemantauan lingkungan dan IoT berskala besar, di mana daya baterai terbatas dan jaringan bersifat statis.

- LEACH sesuai untuk jaringan berukuran menengah dengan kebutuhan komunikasi periodik, misalnya sistem pertanian cerdas (*smart agriculture*) dan pemantauan industri.
- Directed Diffusion dapat diterapkan pada aplikasi *event-driven* atau kondisi yang tidak membutuhkan pengiriman data secara kontinu, seperti deteksi kebocoran gas atau sistem keamanan sensorik.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini telah melakukan analisis komparatif terhadap tiga protokol komunikasi utama dalam jaringan sensor nirkabel, yaitu LEACH, Directed Diffusion, dan GEAR, dengan fokus pada empat parameter kinerja: konsumsi energi, throughput, packet delivery ratio (PDR), dan end-to-end delay. Hasil simulasi menunjukkan bahwa GEAR secara konsisten memberikan performa terbaik di antara ketiganya. Efisiensi energinya yang tinggi, reliabilitas transmisi data yang stabil, serta waktu tunda komunikasi yang rendah menjadikannya pilihan paling efektif untuk implementasi WSN berskala besar dan aplikasi berbasis lokasi. Protokol LEACH menunjukkan kinerja yang baik pada jaringan berukuran menengah dengan konsumsi energi yang relatif seimbang, sedangkan Directed Diffusion memiliki keterbatasan dalam efisiensi energi akibat tingginya overhead komunikasi. Berdasarkan temuan ini, dapat disimpulkan bahwa pemilihan protokol komunikasi pada WSN harus mempertimbangkan kondisi jaringan, kepadatan node, serta tujuan aplikasi. Secara umum, GEAR direkomendasikan untuk sistem pemantauan dan aplikasi Internet of Things (IoT) yang membutuhkan efisiensi energi tinggi dan transmisi data real-time, sementara LEACH dan Directed Diffusion tetap relevan untuk aplikasi dengan kebutuhan komunikasi terbatas.

Kontribusi Penulis: Moh Gilank Alamsyah: Konseptualisasi, Perancangan Metodologi, Analisis Data, Penulisan Draf Awal, dan Supervisi.
Suro Jalil: 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: -
Penulis Kedua: 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. 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, 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

[4] N. Muhammad Akbar, F. Prasetyo Eka Putra, K. Zulfana Imam, and M. Umar Mansyur, "Analisis Kinerja dan Interopabilitas STB Sebagai Server Penilaian Akhir Tahun," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 91–96, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.365.

[5] 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
[6] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, and ..., "Tinjauan performa RouterOS Mikrotik dalam jaringan internet: Analisis kinerja dan kelayakan," *Digit. ...*, 2023.
[7] 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.
[8] A. Baidawi, "JARINGAN SENSOR NIRKABEL DAN IoT UNTUK KOTA PINTAR PAMEKASAN," *J. Sist. Inf. Kaputama*, vol. 7, no. 2, pp. 104–110, 2023, doi: 10.59697/jsik.v7i2.108.
[9] 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
[10] F. P. E. Putra, A. B. Tamam, R. W. Efendi, and ..., "Optimasi Keamanan DNS: Eksplorasi Optimal dengan Implementasi DNS Security Extensions (DNSSEC)," *REMIK Ris. dan E ...*, 2024, [Online]. Available: https://jurnal.polgan.ac.id/index.php/remik/article/view/13398
[11] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, and ..., "Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of Things (IoT) di Kampus," 2023, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://jurnal.itscience.org/index.php/digitech/article/view/3457
[12] Y. Xin, J. Wang, R. Jia, C. Dun, and Z. Zhang, "Synergistic structural engineering and electronic modulation enhance upconversion emission and charge separation in LiYF4: Yb3+, Tm3+@LiYF4:Nd3+@LixTi1-xO2 core-shell nanostructure for efficient near-infrared photocatalysis," *Chem. Eng. J.*, vol. 506, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.160087.
[13] Y. Liu, W. Zhou, Q. Xie, and H. Li, "Unsupervised Person Re-Identification with Wireless Positioning under Weak Scene Labeling," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 45, no. 4, pp. 5282–5295, 2023, doi: 10.1109/TPAMI.2022.3196364.
[14] M. Ye, L. Q. Huang, X. L. Wang, Y. Wang, Q. X. Jiang, and H. B. Qiu, "A new intelligent cross-domain routing method in SDN based on a proposed multiagent reinforcement learning algorithm," *Int. J. Intell. Comput. Cybern.*, vol. 17, no. 2, pp. 330–362, 2024, doi: 10.1108/IJICC-09-2023-0269.
[15] L. Lei, H. X. Li, and H. D. Yang, "Multiscale Convolution-Based Probabilistic Classification for Detecting Bare PCB Defects," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 72, 2023, doi: 10.1109/TIM.2022.3229708.
[16] J. K. Mathew, K. R. R, B. Kalpana, M. Muthulakshmi, and S. Sharanyaa, "AN INTRUSION DETECTION APPROACH IN WIRELESS SENSOR NETWORK SECURITY THROUGH CNN-BI-LSTM MODEL," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 102, no. 2, pp. 552–568, 2024, [Online]. Available: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85186099871&partnerID=40&md5=65d49e073ea862ae7815a888e3349cab
[17] A. Alauthman and W. N. W. Nik, "A Novel Cluster Head Selection Algorithm to Maximize Wireless Sensor Network Lifespan," *Int. J. Comput. Networks Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 121–132, 2025, doi: 10.5121/ijcnc.2025.17108.
[18] M. Ozaif, M. Alam, S. Mustajab, M. Mustaqeem, and N. Khan, "A secure and efficient identity-based RFID mutual Authentication scheme for IoT using elliptic curve cryptography," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 47, no. 5, pp. 424–437, 2025, doi: 10.1080/1206212X.2025.2491075.
[19] P. K. Bulasara and S. R. Ranjan Sahoo, "A robust hybrid model with low energy consumption for biosensor nano-networks," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 36, no. 1, 2024, doi: 10.1016/j.jksuci.2023.101893.
[20] D. Heo *et al.*, "Nano-Oil-Barrier-Based Fluttering Triboelectric Nanogenerator," *Adv. Sci.*, vol. 12, no. 30, 2025, doi: 10.1002/advs.202502278.
[21] M. Hott, J. M. Placzek, and P. A. Hoeher, "Multi-resonant frequency shift keying: A novel and efficient modulation scheme for magnetic communication," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 129431–129442, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3113086.
[22] 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.
[23] E. M. Putro, S. Yagitani, T. Imachi, and M. Ozaki, "Polarization Characteristics of a Metasurface with a Single via and a Single Lumped Resistor for Harvesting RF Energy," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 15, 2025, doi: 10.3390/app15158561.
[24] T. Q. K. Huda *et al.*, "Performance Analysis of the Efficiency of Cooperative Communication Systems Utilizing Radio Frequency Energy Harvesting," *Iran. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 20, no. 1, 2024, doi: 10.22068/IJEEE.20.1.3150.

[25] S. Fayyaz *et al.*, "Higher Power Density Decoupled Magnetic Device With Core Integrated Orthogonal Windings for Power Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 40, no. 4, pp. 5595–5608, 2025, doi: 10.1109/TPEL.2024.3510719.

[26] 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.

[27] S. Mikuletič, S. Vrhovec, B. Skela-Savič, and B. Žvanut, "Security and privacy oriented information security culture (ISC): Explaining unauthorized access to healthcare data by nursing employees," *Comput. Secur.*, vol. 136, 2024, doi: 10.1016/j.cose.2023.103489.

[28] P. Srividya, L. Nirmala Devi, and A. Nageswar Rao, "A trusted effective approach for forecasting the failure of data link and intrusion in wireless sensor networks," *Theor. Comput. Sci.*, vol. 941, pp. 1–13, 2023, doi: 10.1016/j.tcs.2022.08.004.

[29] T. Belabed, M. G. F. Coutinho, M. A. C. Fernandes, C. V Sakuyama, and C. Souani, "User Driven FPGA-Based Design Automated Framework of Deep Neural Networks for Low-Power Low-Cost Edge Computing," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 89162–89180, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3090196.

[30] D. Pravin Kumar and P. Ganesh Kumar, "Cluster-Based Routing Protocol Design Using Gated Fusion Adaptive Graph Neural Network in Wireless Sensor Networks," *IETE J. Res.*, vol. 71, no. 3, pp. 996–1008, 2025, doi: 10.1080/03772063.2024.2428736.

[31] I. S. H. Al-Mejibli, "Improving SEP for Heterogeneous Wireless Sensor Networks," *Iraqi J. Sci.*, vol. 65, no. 12, pp. 7194–7206, 2024, doi: 10.24996/ijs.2024.65.12.33.

[32] T. Shafique, A.-H. Soliman, and A. Amjad, "Data Traffic Based Shape Independent Adaptive Unequal Clustering for Heterogeneous Wireless Sensor Networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 46422–46443, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3381520.

[33] M. Alkhammash, "A Metaheuristic Approach to Detecting and Mitigating DDoS Attacks in Blockchain-Integrated Deep Learning Models for IoT Applications," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 193184–193194, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3519132.

[34] R. Jebi, S. Baulkani, and L. Femila, "Hybrid energy-Efficient distributed aided frog leaping dynamic A* with reinforcement learning for enhanced trajectory planning in UAV swarms large-scale networks," *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, vol. 36, no. 24, 2024, doi: 10.1002/cpe.8237.

[35] R. K. Sanapala and S. R. Duggirala, "SRN-LEACH: an energy-efficient leach protocol with random number stabilisation for WSNs," *J. Control Decis.*, vol. 10, no. 1, pp. 82–89, 2023, doi: 10.1080/23307706.2022.2062622.

[36] A. Banitalebi Dehkordi, "EDBLSD-IIoT: a comprehensive hybrid architecture for enhanced data security, reduced latency, and optimized energy in industrial IoT networks," *J. Supercomput.*, vol. 81, no. 2, 2025, doi: 10.1007/s11227-024-06872-6.

[37] A. Arivuselvi and C. Kalaiselvi, "Develop a Novel Weighed Quantum Ant Lion Optimization Algorithm to Enhance Security Mechanisms in Wireless Sensor Networks," *SSRG Int. J. Electron. Commun. Eng.*, vol. 12, no. 7, pp. 246–261, 2025, doi: 10.14445/23488549/IJECE-V12I7P120.

[38] Y. Zheng, Y. Xie, and J. Li, "Multi-UAV Collaboration and IMU Fusion Localization Method in Partial GNSS-Denied Scenarios," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 105499–105512, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3315870.

[39] M. H. Reehanaparveen and C. Sunitha, "A Spiking Neural Network-based LEACH Protocol for Optimal Cluster Head Selection in Large-Scale Wireless Sensor Networks," *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 18, no. 5, pp. 458–473, 2025, doi: 10.22266/ijies2025.0630.32.

[40] U. Hariharan, K. Rajkumar, T. Akilan, and A. Ponmalar, "A multi-hop protocol using advanced multi-hop Dijkstras algorithm and tree based remote vector for wireless sensor network," *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 14, no. 6, pp. 6877–6895, 2023, doi: 10.1007/s12652-021-03548-4.

[41] Q. Bian, X. Dong, C. Xu, Z. Liu, and L. Ding, "Hydrodynamic and power-capturing performances of the dual-tube oscillating water column device: A numerical study," *Energy*, vol. 336, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.138542.

[42] W. K. Ahmed, M. N. B. M. Mohd Warip, M. E. E. S. Ahmed, and P. Ehkan, "IMPROVED MPR SELECTION ALGORITHM-BASED WS-OLSR ROUTING PROTOCOL," *Int. J. Comput. Networks Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1–16, 2024, doi: 10.5121/ijcnc.2024.16301.

[43] X. Huang *et al.*, "Long-Range Hot-Carrier Transport in Topologically Connected HgTe Quantum Dots," *Adv. Sci.*, vol. 11, no. 12, 2024, doi: 10.1002/advs.202307396.

[44] V. S. Pendyala and N. B. Thakur, "Performance and interpretability analysis of code generation large language

models," *Neurocomputing*, vol. 656, 2025, doi: 10.1016/j.neucom.2025.131461.
[45] R. Sachdeva and A. Dev, "ML Based Hybrid Computational Intelligence Protocol to Improve Energy Efficiency and Security in Opportunistic Networks (Oppnets)," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 139, no. 2, pp. 1203–1223, 2024, doi: 10.1007/s11277-024-11661-8.
[46] H. J. Kim, S. M. Kang, S. M. Kim, and J. H. Kim, "Meta-Model Based Blade Optimization Design Considering the Fluid Characteristics of Vehicle Energy Harvesting," *Int. J. Automot. Technol.*, vol. 25, no. 3, pp. 627–637, 2024, doi: 10.1007/s12239-024-00049-z.
[47] Z. Du, L. Li, and G. Shen, "An Ultra-Thin Wearable Thermoelectric Paster Based on Structured Organic Ion Gel Electrolyte," *Nano-Micro Lett.*, vol. 17, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s40820-025-01721-4.
[48] M. Basim *et al.*, "A Design of High-Efficiency RF/Solar/ Triboelectric/Electromagnetic Energy Harvesting System," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 35922–35932, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3542366.
[49] Z. Chen, Y. Xia, G. Shi, X. Wang, H. Xia, and L. Qian, "Self-Powered Collaborative Energy Harvesting Interface Circuit for Stacked Multiple Piezoelectric Elements," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 39, no. 12, pp. 16814–16825, 2024, doi: 10.1109/TPEL.2024.3453921.
[50] L. Wang *et al.*, "Source Localization via Doppler Shifts Using Mobile Sensors in ICNets Within Industry 5.0," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 6, pp. 3429–3442, 2025, doi: 10.1109/OJCOMS.2025.3526925.
[51] K. A. Darabkh, M. F. Al-Mistarihi, and M. I. Al-Maaitah, "Next-generation routing for autonomous vehicle networks based on innovative clustering: integrating SDN and fog computing along with AODV upon failure," *J. Supercomput.*, vol. 81, no. 2, 2025, doi: 10.1007/s11227-024-06880-6.
[52] H. Yang, H. Zhou, Z. Liu, and X. Deng, "Energy Optimization of Wireless Sensor Embedded Cloud Computing Data Monitoring System in 6G Environment," *Sensors*, vol. 23, no. 2, 2023, doi: 10.3390/s23021013.
[53] S. Arul Jothi, R. Rajagopal, and V. Santhi, "Rule-Based Outlier Detection with a Modified Variational AutoEncoder for Enhancing Data Accuracy in Wireless Sensor Networks," *Int. J. Fuzzy Syst.*, vol. 25, no. 6, pp. 2187–2202, 2023, doi: 10.1007/s40815-023-01496-z.

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