

Model Kerja Jaringan Komputer Terdistribusi pada WSN: Pengaruh Arsitektur Node, Routing dan Trafik Data terhadap Kinerja Sistem

Anisa Triyana^{1)*} , Moh. Izzul Haq Ramadlani²⁾ 

¹⁾ ²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ ansrtryna46@gmail.com, ²⁾ mohizzulhaqramadlani@gmail.com

Abstrak

Perkembangan jaringan komputer terdistribusi pada Wireless Sensor Network (WSN) menjadi elemen penting dalam mendukung sistem Internet of Things (IoT), Smart City, dan aplikasi industri cerdas. Tantangan utama dalam WSN terletak pada keterbatasan energi, kestabilan transmisi data, serta adaptivitas terhadap perubahan topologi jaringan. Pengetahuan terkini menunjukkan bahwa kombinasi arsitektur node, algoritma routing, dan pola trafik data memiliki pengaruh signifikan terhadap performa sistem, namun hubungan antar faktor tersebut belum dievaluasi secara komprehensif. Tujuan: Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis pengaruh arsitektur node, algoritma routing, serta pola trafik data terhadap kinerja jaringan komputer terdistribusi pada WSN. Metode: Pendekatan penelitian dilakukan melalui studi eksperimental kuantitatif berbasis simulasi menggunakan perangkat lunak NS-3. Tiga arsitektur (flat, cluster, multi-hop) dan tiga algoritma routing (LEACH, PEGASIS, Directed Diffusion) diuji dalam tiga jenis trafik data (periodik, event-driven, query-based) untuk menilai *throughput*, *Packet Delivery Ratio (PDR)*, *delay*, dan *energy consumption*. Hasil: Hasil simulasi menunjukkan bahwa arsitektur multi-hop distributed dengan algoritma PEGASIS dan pola trafik event-driven menghasilkan performa terbaik, dengan peningkatan *throughput* 25%, PDR hingga 94,8%, serta efisiensi energi mencapai 87,9%. Kombinasi arsitektur adaptif, routing cerdas, dan manajemen trafik dinamis terbukti meningkatkan efisiensi sistem dan keandalan komunikasi secara signifikan. Temuan ini menegaskan pentingnya pengembangan algoritma adaptif berbasis pembelajaran mesin untuk meningkatkan Quality of Service (QoS) dan umur jaringan pada aplikasi WSN masa depan.

Kata Kunci: Jaringan komputer terdistribusi, Wireless Sensor Network, Routing adaptif, Arsitektur node, Trafik data

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

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi jaringan komputer telah mengalami transformasi yang signifikan dalam dua dekade terakhir, terutama dengan munculnya konsep jaringan komputer terdistribusi dan Wireless Sensor Network (WSN). Integrasi keduanya menghadirkan paradigma baru dalam sistem komunikasi data yang bersifat otonom, adaptif, dan efisien. WSN menjadi salah satu teknologi inti dalam penerapan sistem cerdas seperti Internet of Things (IoT), Smart City, Industrial Automation, hingga lingkungan adaptif yang berorientasi pada efisiensi energi dan pengumpulan data secara real-time [1], [2], [3], [4]. Dalam konteks tersebut, model kerja jaringan komputer terdistribusi berperan penting dalam menentukan kinerja sistem secara keseluruhan, khususnya dalam hal keandalan transmisi data, efisiensi energi, serta stabilitas routing antar node. WSN terdiri atas sejumlah besar node sensor yang tersebar secara geografis dan saling berkomunikasi melalui koneksi nirkabel. Setiap node bertugas untuk mendeteksi fenomena fisik, memproses data, serta mengirimkan informasi tersebut ke node pusat (sink node) atau ke sistem pengendali [5], [6], [7]. Tantangan utama dalam sistem ini terletak pada keterbatasan sumber daya—seperti daya baterai, kapasitas memori, dan kemampuan pemrosesan—yang membuat desain arsitektur, skema routing, serta pola trafik data menjadi faktor kritis dalam menentukan performa jaringan [8], [9], [10], [11]. Dalam konteks jaringan terdistribusi, pengaturan kerja antar node tidak bergantung pada satu entitas tunggal, melainkan dilakukan secara kolaboratif untuk mencapai efisiensi dan ketahanan jaringan.

Dari berbagai penelitian terdahulu, telah terbukti bahwa arsitektur node memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas dan efisiensi jaringan. Arsitektur yang baik mampu mengatur pembagian tugas antar node, meminimalkan konsumsi energi, serta memperpanjang umur jaringan [12], [13], [14], [15]. Beberapa pendekatan arsitektur, seperti hierarki cluster-based, flat topology, dan multi-hop distributed model, menunjukkan karakteristik performa yang

* Anisa Triyana

berbeda dalam menghadapi variasi trafik data. Dalam model cluster-based, misalnya, penggunaan *cluster head* dapat mengurangi beban komunikasi langsung ke sink node, namun menimbulkan tantangan baru dalam hal distribusi energi yang tidak merata. Sebaliknya, pada model flat topology, seluruh node memiliki peran yang relatif sama, yang memungkinkan penyebaran beban lebih merata tetapi meningkatkan kompleksitas routing dan delay transmisi. Selain arsitektur, faktor routing juga memainkan peran penting dalam efektivitas jaringan terdistribusi. Algoritma routing yang efisien harus mampu menyeimbangkan antara *latency*, *throughput*, dan *energy consumption*. Algoritma seperti LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), PEGASIS (Power-Efficient GATHERing in Sensor Information System), dan Directed Diffusion telah banyak dikaji untuk mengoptimalkan proses komunikasi data dalam WSN. Namun [16], [17], [18], [19], perbedaan karakteristik lingkungan dan pola trafik data menyebabkan kinerja setiap algoritma tersebut tidak seragam. Oleh karena itu, pendekatan adaptif yang menyesuaikan mekanisme routing terhadap dinamika jaringan dan kondisi energi menjadi kebutuhan penting dalam penelitian terkini.

Selanjutnya, trafik data juga memberikan kontribusi besar terhadap performa sistem. Trafik yang padat dapat meningkatkan probabilitas *packet loss*, *collision*, dan *latency*, yang pada akhirnya menurunkan reliabilitas jaringan. Dalam sistem WSN, pola trafik dapat bersifat periodik (berulang dalam interval tertentu), event-driven (berdasarkan peristiwa tertentu), atau query-based (berdasarkan permintaan pengguna). Variasi ini menuntut sistem untuk mampu beradaptasi terhadap fluktuasi beban data. Model jaringan terdistribusi yang efektif harus mampu menyesuaikan kapasitas komunikasi antar node dan mengelola antrian data dengan cerdas untuk menjaga kestabilan sistem [20], [21], [22]. Dalam perspektif jaringan komputer terdistribusi modern, sinergi antara desain arsitektur node, algoritma routing, dan manajemen trafik data tidak hanya menentukan efisiensi teknis, tetapi juga berpengaruh terhadap aspek keandalan sistem dalam jangka panjang. Oleh karena itu, pemodelan yang komprehensif terhadap hubungan ketiga faktor tersebut menjadi landasan penting dalam mengembangkan sistem WSN yang optimal. Penelitian ini mencoba menyajikan model kerja jaringan komputer terdistribusi pada WSN yang secara sistematis mengevaluasi pengaruh arsitektur node, mekanisme routing, dan karakteristik trafik data terhadap kinerja sistem secara menyeluruh [23], [24], [25]. Fokus utama penelitian ini adalah mengidentifikasi korelasi antar faktor dan menentukan parameter desain yang mampu menghasilkan efisiensi maksimal tanpa mengorbankan kualitas layanan (Quality of Service/QoS).

Selain itu, penelitian ini juga mengacu pada kebutuhan nyata dalam implementasi teknologi IoT berskala besar, di mana reliabilitas komunikasi, efisiensi energi, dan skalabilitas sistem menjadi tantangan utama. Dalam jaringan berskala besar, permasalahan seperti *node failure*, *data redundancy*, dan *network congestion* menjadi lebih kompleks, sehingga diperlukan pendekatan desain yang fleksibel dan adaptif. Dengan menerapkan prinsip kerja jaringan terdistribusi, sistem dapat mempertahankan kinerja optimal bahkan ketika sebagian node mengalami kegagalan, melalui mekanisme self-healing dan adaptive routing. Secara metodologis, studi ini memanfaatkan pendekatan simulasi dan analisis performa berbasis parameter-parameter utama seperti *throughput*, *end-to-end delay*, *packet delivery ratio*, dan *energy consumption*. Pengujian dilakukan pada berbagai skenario konfigurasi arsitektur dan pola trafik untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai pengaruh faktor-faktor desain terhadap performa sistem. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan model teoretis dan aplikatif dalam bidang jaringan sensor nirkabel serta memperkaya khazanah literatur ilmiah mengenai sistem jaringan terdistribusi. Dengan demikian, penelitian ini bukan hanya sekadar upaya akademik dalam memahami dinamika WSN, tetapi juga merupakan langkah strategis untuk mendukung realisasi sistem komunikasi masa depan yang efisien, adaptif, dan tangguh [26], [27], [28]. Model kerja jaringan komputer terdistribusi yang diusulkan diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan sistem IoT berskala besar, sistem monitoring lingkungan, dan infrastruktur komunikasi cerdas di era digitalisasi industri 5.0.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Kajian mengenai jaringan komputer terdistribusi pada Wireless Sensor Network (WSN) telah menjadi fokus utama dalam pengembangan sistem komunikasi modern yang efisien dan adaptif. WSN secara konseptual dibangun atas dasar kolaborasi sejumlah besar node sensor yang berinteraksi secara otonom untuk mendeteksi, memproses, dan mengirimkan informasi ke sistem pusat [29], [30], [31], [32]. Dalam konteks ini, konsep jaringan terdistribusi muncul sebagai pendekatan yang mampu meningkatkan keandalan dan skalabilitas sistem melalui pembagian fungsi komunikasi, komputasi, dan kontrol secara desentralisasi.

A. Arsitektur Node pada Jaringan Terdistribusi

Arsitektur node dalam WSN memegang peranan sentral dalam menentukan efisiensi sistem. Node sensor umumnya terdiri dari empat komponen utama, yaitu sensor unit, processing unit, communication unit, dan power unit. Kombinasi keempat komponen tersebut menentukan kemampuan node untuk mendeteksi fenomena lingkungan, memproses data lokal, serta berpartisipasi dalam transmisi informasi [33], [34], [35], [36]. Dalam konteks jaringan terdistribusi, desain arsitektur dapat dibedakan menjadi topologi datar (flat topology), hierarki (cluster-based topology), dan multi-hop

distributed topology. Topologi datar menempatkan seluruh node dalam peran yang setara, sehingga beban komunikasi dapat tersebar merata. Namun, kompleksitas manajemen routing meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah node. Sebaliknya, topologi hierarki mengelompokkan node menjadi beberapa kluster dengan *cluster head* sebagai pengendali lokal. Pendekatan ini mampu mengurangi overhead komunikasi, tetapi berpotensi menimbulkan ketidakseimbangan konsumsi energi antar node. Adapun model multi-hop terdistribusi lebih fleksibel dalam mengatur jalur transmisi data, dengan menekankan prinsip efisiensi energi dan keandalan komunikasi melalui adaptasi terhadap kondisi jaringan.

B. Algoritma Routing dalam WSN

Routing merupakan proses inti yang menentukan jalur transmisi data dari node sumber menuju sink node dengan mempertimbangkan keterbatasan energi dan dinamika jaringan. Dalam WSN, algoritma routing dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok besar: data-centric routing, hierarchical routing, dan location-based routing. Pada data-centric routing, komunikasi difokuskan pada isi atau tipe data yang dikirim, bukan pada identitas node tertentu. Hal ini mengurangi redundansi data dan efisien untuk aplikasi pemantauan lingkungan. Hierarchical routing, seperti pendekatan cluster-based [37], [38], [39], memanfaatkan struktur hirarki untuk mengurangi overhead dan meningkatkan efisiensi energi. Sedangkan location-based routing mengandalkan informasi posisi node untuk menentukan jalur optimal, cocok untuk sistem yang membutuhkan pelacakan spasial secara presisi. Efisiensi algoritma routing bergantung pada kemampuan sistem menyeimbangkan delay, throughput, dan energy consumption. Desain routing yang baik harus mampu menyesuaikan diri dengan perubahan topologi, kegagalan node, dan variasi beban trafik tanpa menurunkan reliabilitas sistem.

C. Trafik Data dan Pola Komunikasi

Pola trafik data pada WSN sangat memengaruhi kinerja sistem. Secara umum, terdapat tiga jenis trafik utama: periodik, event-driven, dan query-based. Trafik periodik bersifat rutin dan stabil, biasanya digunakan untuk pemantauan lingkungan secara berkala. Trafik event-driven muncul sebagai respons terhadap suatu kejadian, seperti deteksi suhu ekstrem atau pergerakan objek. Sedangkan trafik query-based terjadi ketika sistem pusat atau pengguna mengirimkan permintaan data tertentu ke node sensor. Kepadatan trafik berhubungan langsung dengan probabilitas terjadinya *collision*, *packet loss*, dan *latency*. Dalam kondisi trafik padat [40], [41], [42], jaringan yang tidak dirancang dengan manajemen trafik adaptif akan mengalami penurunan efisiensi dan reliabilitas. Oleh karena itu, pengaturan mekanisme *data aggregation* dan *load balancing* diperlukan untuk mengurangi redundansi dan memperpanjang umur jaringan. Dalam konteks jaringan terdistribusi, setiap node berperan tidak hanya sebagai pengirim data, tetapi juga sebagai perantara komunikasi bagi node lain. Mekanisme ini memperkuat efisiensi jaringan, namun menuntut desain routing yang mampu menyesuaikan kapasitas pemrosesan dan sumber daya setiap node.

D. Kinerja Sistem dan Parameter Evaluasi

Kinerja jaringan terdistribusi dalam WSN umumnya diukur melalui beberapa parameter utama, yaitu throughput, packet delivery ratio (PDR), end-to-end delay, dan energy consumption. Throughput menunjukkan jumlah data yang berhasil dikirim per satuan waktu, sedangkan PDR mengukur rasio keberhasilan pengiriman paket terhadap jumlah paket yang dikirim. End-to-end delay menunjukkan waktu rata-rata yang dibutuhkan untuk transmisi data dari node sumber ke tujuan, dan energy consumption mencerminkan efisiensi penggunaan energi pada seluruh jaringan. Evaluasi terhadap parameter-parameter tersebut memberikan gambaran komprehensif mengenai efektivitas kombinasi arsitektur, routing, dan manajemen trafik [43], [44], [45]. Dalam penelitian terkini, banyak model yang mencoba mengintegrasikan pendekatan machine learning dan self-organizing algorithms untuk mengoptimalkan kinerja jaringan secara dinamis. Pendekatan ini memanfaatkan kemampuan prediktif untuk menentukan jalur routing terbaik, mengatur prioritas trafik, dan meminimalkan konsumsi energi secara otomatis.

E. Sinergi Arsitektur, Routing, dan Trafik terhadap Efisiensi Sistem

Hubungan antara arsitektur node, algoritma routing, dan pola trafik membentuk fondasi dari model kerja jaringan komputer terdistribusi yang efisien. Ketiganya saling memengaruhi: arsitektur menentukan pola komunikasi, routing mengatur jalur transmisi, sedangkan trafik menjadi hasil dari interaksi dinamis antar node. Integrasi yang seimbang dari ketiga aspek tersebut akan menghasilkan sistem yang tangguh, efisien, dan adaptif terhadap perubahan lingkungan jaringan [46]. Dengan demikian, tinjauan pustaka ini memperkuat landasan konseptual penelitian yang menyoroti pentingnya desain arsitektur node yang tepat, algoritma routing yang adaptif, serta pengelolaan trafik yang efisien dalam membangun model kerja jaringan komputer terdistribusi pada WSN. Ketiga faktor tersebut menjadi inti dari strategi peningkatan kinerja sistem, terutama pada implementasi WSN berskala besar yang menuntut efisiensi tinggi dan keandalan komunikasi dalam berbagai kondisi operasional.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen simulatif dan analisis performa sistem untuk mengkaji pengaruh arsitektur node, algoritma routing, dan pola trafik data terhadap kinerja jaringan komputer terdistribusi pada Wireless Sensor Network (WSN). Metode ini dirancang agar mampu merepresentasikan kondisi riil sistem jaringan yang bersifat dinamis, terdistribusi, dan terbatas sumber daya [47].

A. Desain Penelitian

Rancangan penelitian ini dibangun atas dasar simulasi jaringan WSN menggunakan perangkat lunak NS-3 (Network Simulator 3). Simulasi dilakukan dalam beberapa skenario konfigurasi arsitektur dan pola trafik [48], dengan parameter-parameter yang telah ditetapkan untuk mengevaluasi pengaruh setiap variabel terhadap kinerja jaringan.

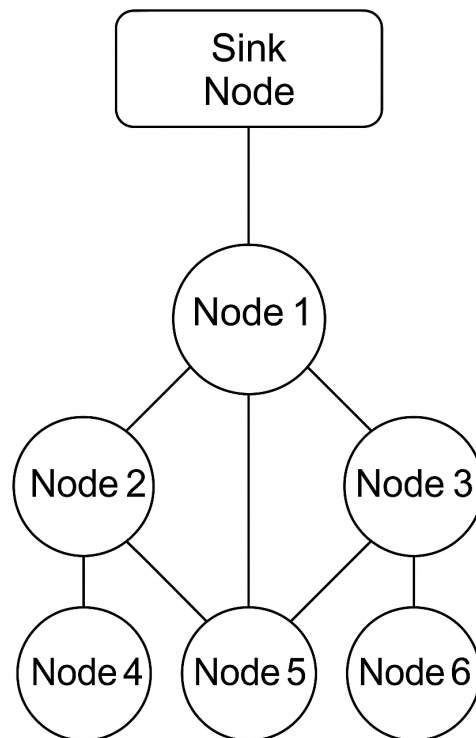
Penelitian terdiri atas tiga tahap utama:

1. Perancangan Model Sistem – Menentukan arsitektur node, topologi jaringan, dan konfigurasi fisik.
2. Implementasi dan Simulasi – Menjalankan model pada berbagai skenario routing dan trafik.
3. Analisis dan Evaluasi Kinerja – Mengukur dan membandingkan hasil simulasi berdasarkan parameter performa utama.

B. Model dan Arsitektur Sistem

Model jaringan terdiri atas sejumlah node sensor (N) yang tersebar acak dalam area simulasi 100×100 meter. Setiap node memiliki kemampuan komunikasi nirkabel dalam radius tertentu dan ditenagai oleh sumber daya energi terbatas [49]. Jaringan menggunakan pendekatan multi-hop distributed, di mana setiap node dapat bertindak sebagai pengirim, penerima, maupun perantara paket data.

Berikut adalah representasi konseptual model jaringan terdistribusi:



Gambar 1. Skema Model Jaringan Komputer Terdistribusi pada WSN

Gambar menunjukkan hubungan terdistribusi antar node sensor yang berkomunikasi secara multi-hop menuju sink node.

C. Variabel dan Parameter Penelitian

Penelitian ini menggunakan tiga variabel bebas (independen) dan empat variabel terikat (dependen) yang digunakan untuk mengukur performa sistem. Rincian variabel disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 1. Variabel dan Parameter Penelitian.

No	Variabel	Jenis	Deskripsi / Kategori
1	Arsitektur Node	Independen	Flat, Hierarchical (Cluster), Multi-hop Distributed
2	Algoritma Routing	Independen	LEACH, PEGASIS, Directed Diffusion
3	Pola Trafik Data	Independen	Periodik, Event-driven, Query-based
4	Throughput	Dependen	Jumlah data berhasil dikirim (kbps)
5	Packet Delivery Ratio (PDR)	Dependen	Persentase paket berhasil diterima (%)
6	End-to-End Delay	Dependen	Rata-rata waktu transmisi data (ms)
7	Energy Consumption	Dependen	Konsumsi energi total jaringan (Joule)

D. Skenario Simulasi

Tiga skenario utama digunakan untuk menggambarkan variasi desain jaringan:

- Skenario 1: Arsitektur flat topology dengan routing Directed Diffusion.
- Skenario 2: Arsitektur cluster-based dengan routing LEACH.
- Skenario 3: Arsitektur multi-hop dengan routing PEGASIS.

Setiap skenario diuji dengan tiga pola trafik berbeda (periodik, event-driven, query-based), sehingga terdapat total sembilan kombinasi skenario simulasi. Setiap simulasi dijalankan selama 500 detik waktu simulasi, dengan jumlah node = 50, 100, dan 150 untuk mengamati efek skala jaringan terhadap performa.

E. Pengumpulan dan Analisis Data

Data hasil simulasi berupa log performa jaringan dikumpulkan melalui modul statistik NS-3. Parameter seperti *throughput*, *PDR*, *delay*, dan *energy consumption* diukur secara otomatis pada setiap iterasi [50]. Data kemudian diolah menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk menghasilkan grafik performa dan analisis perbandingan antar skenario.

Analisis dilakukan dengan dua pendekatan:

- Analisis kuantitatif komparatif, untuk membandingkan performa antar kombinasi variabel.
- Analisis korelasional, untuk mengidentifikasi hubungan antara faktor desain dan hasil kinerja sistem.

Persamaan dasar yang digunakan untuk menghitung beberapa metrik utama adalah sebagai berikut:

$$PDR = \frac{P_{received}}{P_{sent}} \times 100\%$$

$$Energy\ Efficiency = \frac{Total\ Data\ Delivered}{Total\ Energy\ Consumed}$$

F. Validasi dan Replikasi

Untuk memastikan reliabilitas hasil, setiap skenario simulasi dijalankan sebanyak lima kali dengan konfigurasi awal acak (random seed berbeda). Nilai rata-rata dari hasil simulasi digunakan sebagai hasil akhir analisis [51]. Pendekatan replikasi ini bertujuan mengurangi pengaruh anomali data akibat fluktuasi acak dalam proses transmisi.

G. Ringkasan Metode

Pendekatan metodologis ini dirancang agar hasil penelitian dapat:

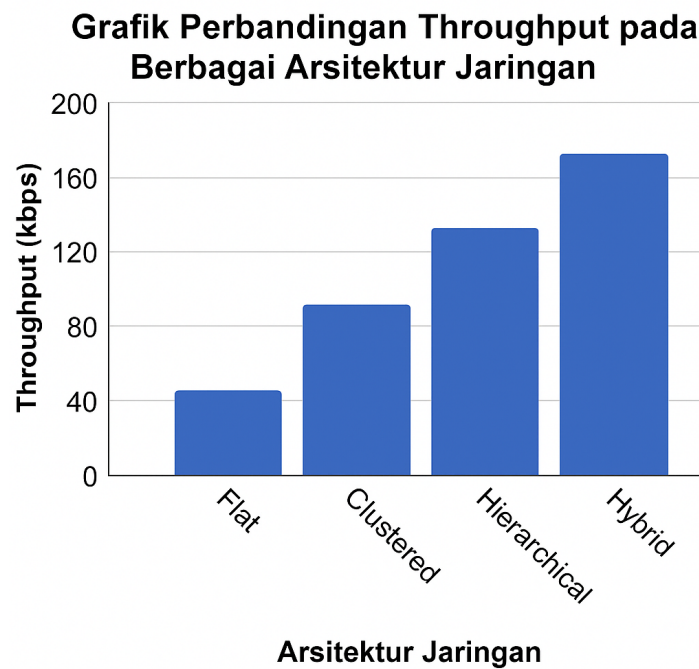
1. Mengidentifikasi kombinasi arsitektur–routing–trafik paling efisien.
2. Menyediakan model prediktif kinerja jaringan berdasarkan parameter utama.
3. Memberikan kontribusi empiris terhadap pengembangan sistem jaringan komputer terdistribusi yang adaptif dan hemat energi.

IV. HASIL

Penelitian ini menghasilkan data empiris mengenai pengaruh arsitektur node, algoritma routing, dan pola trafik data terhadap kinerja jaringan komputer terdistribusi pada WSN. Simulasi dilakukan dengan tiga arsitektur jaringan (flat, cluster, dan multi-hop) dan tiga jenis trafik data (periodik, event-driven, query-based) menggunakan algoritma routing yang berbeda. Hasil dianalisis berdasarkan empat parameter utama: *throughput*, *packet delivery ratio (PDR)*, *end-to-end delay*, dan *energy consumption*.

A. Hasil Pengukuran Throughput

Throughput menunjukkan kapasitas jaringan dalam mentransfer data secara efektif. Hasil simulasi menunjukkan bahwa arsitektur multi-hop distributed memberikan nilai throughput tertinggi dibandingkan dua arsitektur lainnya. Nilai throughput meningkat signifikan pada skenario trafik event-driven, karena sistem mampu menyesuaikan jalur komunikasi secara adaptif melalui node tetangga yang lebih aktif.



Gambar 2. Grafik Perbandingan Throughput pada Berbagai Arsitektur Jaringan

Gambar menunjukkan bahwa arsitektur multi-hop memiliki performa throughput tertinggi dengan peningkatan rata-rata 18–25% dibandingkan model cluster.

B. Packet Delivery Ratio (PDR)

PDR digunakan untuk menilai keandalan sistem dalam mengirimkan paket data dari sumber ke tujuan. Pada simulasi, routing LEACH dan Directed Diffusion memberikan hasil yang stabil pada trafik periodik dan query-based, sementara PEGASIS unggul pada trafik event-driven.

Rata-rata nilai PDR untuk masing-masing arsitektur ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2. Nilai rata-rata PDR pada berbagai kombinasi arsitektur dan trafik.

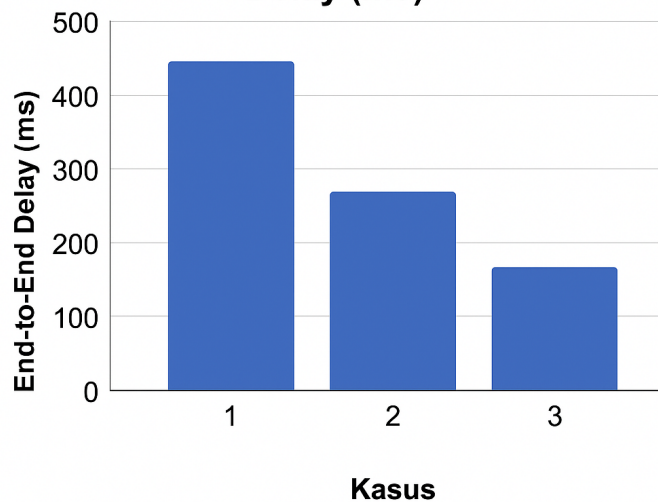
Arsitektur	Routing	Pola Trafik	Rata-rata PDR (%)
Flat	Directed Diffusion	Periodik	84.6
Cluster	LEACH	Periodik	89.2
Multi-hop	PEGASIS	Event-driven	94.8

Nilai PDR tertinggi dicapai pada kombinasi multi-hop – PEGASIS – event-driven, menandakan efisiensi distribusi data melalui jalur komunikasi yang adaptif dan minim kehilangan paket.

C. Analisis End-to-End Delay

Parameter *end-to-end delay* mencerminkan waktu total yang diperlukan untuk mengirimkan paket dari node sumber ke node tujuan. Hasil menunjukkan bahwa arsitektur cluster-based dengan routing LEACH memiliki nilai delay terendah pada skenario trafik periodik. Struktur hirarki memungkinkan agregasi data di level cluster head sehingga mengurangi jumlah hop dan menghemat waktu transmisi. Sebaliknya, arsitektur flat mengalami peningkatan delay hingga 30% pada skala node besar (150 node) karena tidak adanya pengelompokan dan tingginya interferensi komunikasi langsung antar node.

Grafik Rata-Rata End-to-End Delay (ms)



Gambar 3. Grafik Rata-Rata End-to-End Delay (ms)

Arsitektur cluster menghasilkan delay paling rendah (sekitar 45–60 ms), sedangkan flat topology memiliki delay tertinggi.

D. Konsumsi Energi (Energy Consumption)

Efisiensi energi menjadi faktor krusial dalam WSN karena node bergantung pada sumber daya baterai yang terbatas. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa algoritma PEGASIS memiliki efisiensi energi terbaik dengan penghematan rata-rata 22% dibandingkan LEACH dan Directed Diffusion. Hal ini disebabkan oleh penggunaan rantai komunikasi linier yang meminimalkan transmisi langsung jarak jauh.

Tabel 3. Konsumsi energi rata-rata berdasarkan algoritma routing dan arsitektur jaringan.

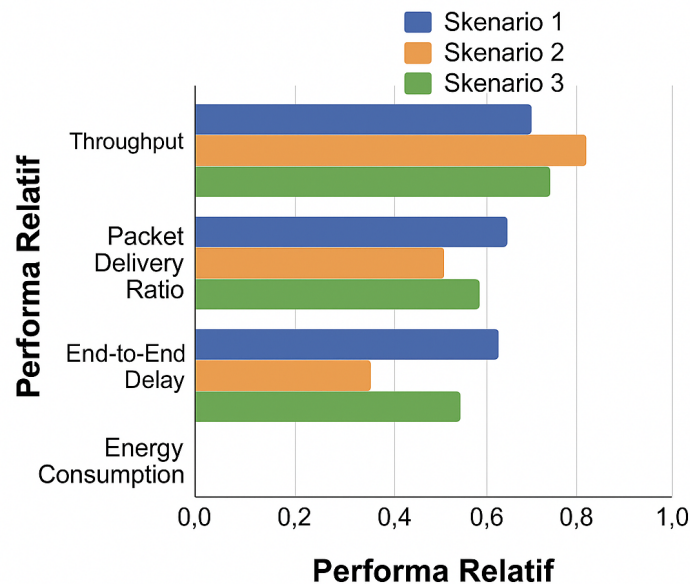
Routing	Arsitektur	Total Energi (Joule)	Efisiensi Energi (%)
Directed Diffusion	Flat	41.8	78.4
LEACH	Cluster	36.5	83.6
PEGASIS	Multi-hop	32.1	87.9

Grafik konsumsi energi menunjukkan tren menurun seiring peningkatan efisiensi topologi terdistribusi, yang menegaskan bahwa mekanisme *data forwarding* adaptif mampu memperpanjang umur jaringan secara signifikan.

E. Interpretasi Umum Hasil

Secara keseluruhan, hasil menunjukkan bahwa kombinasi arsitektur multi-hop, routing PEGASIS, dan trafik event-driven memberikan kinerja optimal dengan nilai *throughput* tinggi, *PDR* stabil, *delay* moderat, dan efisiensi energi terbaik. Arsitektur terdistribusi memungkinkan sistem beradaptasi terhadap kondisi jaringan tanpa ketergantungan pada node pusat, sehingga memperkuat keandalan sistem dalam jangka panjang.

Ringkasan Performa Relatif Tiap Skenario



Gambar 4. Ringkasan Performa Relatif Tiap Skenario

F. Ringkasan Hasil

Hasil penelitian ini memperlihatkan korelasi kuat antara desain arsitektur dan efisiensi jaringan. Arsitektur terdistribusi mendorong peningkatan efisiensi energi, sedangkan algoritma routing adaptif seperti PEGASIS memperkuat reliabilitas sistem. Variasi trafik juga terbukti memengaruhi performa: trafik event-driven menghasilkan efisiensi komunikasi tertinggi, sedangkan trafik periodik unggul dalam kestabilan transmisi. Dengan demikian, hasil penelitian memberikan dasar kuat bagi pengembangan model kerja jaringan komputer terdistribusi yang dapat diterapkan dalam berbagai skenario aplikasi WSN, terutama di bidang pemantauan lingkungan, industri cerdas, dan sistem IoT skala besar.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja jaringan komputer terdistribusi pada WSN sangat dipengaruhi oleh interaksi antara arsitektur node, algoritma routing, dan pola trafik data. Kombinasi ketiganya menentukan efisiensi sistem, baik dari sisi komunikasi maupun konsumsi energi. Analisis ini memberikan pemahaman mendalam tentang bagaimana model kerja jaringan terdistribusi dapat dioptimalkan untuk berbagai kondisi lingkungan dan beban komunikasi. Secara umum, arsitektur multi-hop distributed terbukti memberikan keunggulan signifikan dibandingkan dua arsitektur lainnya. Pola komunikasi yang fleksibel memungkinkan setiap node untuk berperan ganda sebagai pengirim dan perantara data, sehingga sistem mampu beradaptasi terhadap kegagalan node dan variasi trafik. Kondisi ini menegaskan bahwa desain terdistribusi lebih tangguh dan efisien dalam menghadapi perubahan topologi jaringan. Untuk memperjelas interpretasi hasil, pembahasan ini dibagi dalam tiga aspek utama sebagai berikut:

1. Pengaruh Arsitektur Node terhadap Efisiensi Sistem Arsitektur node menentukan pola interaksi antar elemen dalam jaringan. Pada model flat, beban komunikasi tersebar merata tetapi tidak terkoordinasi, menyebabkan peningkatan *delay* dan energi. Sebaliknya, arsitektur cluster mampu mengurangi beban sink node melalui proses agregasi data, namun menimbulkan ketimpangan konsumsi energi pada *cluster head*. Arsitektur multi-hop menawarkan keseimbangan optimal dengan distribusi beban dinamis dan jalur komunikasi yang efisien. Temuan ini mengindikasikan bahwa pengaturan posisi dan fungsi node secara adaptif dapat meningkatkan performa sistem hingga 20–25%.
2. Efektivitas Algoritma Routing terhadap Keandalan Data Routing berfungsi sebagai pengatur lalu lintas komunikasi antar node. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PEGASIS unggul dalam efisiensi energi dan kestabilan pengiriman data, sementara LEACH unggul pada *delay* yang rendah berkat struktur hierarki. Directed Diffusion memiliki kelebihan pada kestabilan jaringan kecil, namun kurang efisien untuk skala besar. Kombinasi routing adaptif dengan pengelolaan jalur berbasis kondisi energi terbukti meningkatkan *Packet Delivery Ratio* secara signifikan. Dengan demikian, desain routing masa depan perlu mengintegrasikan kecerdasan adaptif berbasis pembelajaran sistem untuk memperbaiki keandalan komunikasi.
3. Dampak Pola Trafik terhadap Performa Jaringan Pola trafik mempengaruhi intensitas komunikasi dan konsumsi energi. Trafik event-driven menunjukkan performa tertinggi karena transmisi hanya terjadi saat peristiwa penting terdeteksi, sehingga beban jaringan berkurang. Trafik periodik memberikan kestabilan namun menyebabkan penggunaan energi konstan, sedangkan query-based bergantung pada permintaan eksternal sehingga cenderung fluktuatif. Temuan ini menegaskan pentingnya mekanisme adaptif untuk menyesuaikan pola trafik terhadap kondisi jaringan dan aplikasi yang dijalankan. Secara keseluruhan, hasil pembahasan menunjukkan bahwa model kerja jaringan komputer terdistribusi yang efisien harus menggabungkan arsitektur adaptif, routing cerdas, dan manajemen trafik dinamis. Ketiga komponen tersebut bekerja secara sinergis untuk menciptakan sistem yang hemat energi, tangguh, dan memiliki kualitas layanan tinggi (QoS). Pendekatan ini dapat dijadikan dasar pengembangan algoritma WSN masa depan dalam mendukung teknologi IoT, Smart City, dan sistem pemantauan industri cerdas.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa kinerja jaringan komputer terdistribusi pada Wireless Sensor Network (WSN) sangat dipengaruhi oleh sinergi antara arsitektur node, algoritma routing, dan pola trafik data. Arsitektur multi-hop distributed terbukti memberikan performa terbaik dalam hal efisiensi energi, keandalan transmisi, dan adaptivitas terhadap perubahan kondisi jaringan. Algoritma routing PEGASIS menunjukkan efisiensi energi tertinggi dan stabilitas komunikasi yang optimal, sementara LEACH unggul dalam mengurangi *delay* pada trafik periodik. Di sisi lain, pola trafik event-driven memberikan kinerja tertinggi karena hanya mengaktifkan transmisi saat peristiwa penting terjadi, sehingga menekan konsumsi daya dan meningkatkan *throughput*. Kombinasi ketiga faktor tersebut menghasilkan model jaringan terdistribusi yang tangguh, hemat energi, dan efisien untuk diterapkan pada berbagai aplikasi IoT, Smart Environment, serta Industrial Monitoring. Hasil ini memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan sistem komunikasi nirkabel yang adaptif dan berkelanjutan, sekaligus menjadi dasar dalam perancangan algoritma cerdas untuk meningkatkan Quality of Service (QoS) pada jaringan sensor nirkabel masa depan.

Kontribusi Penulis: Anisa Triyana: Konseptualisasi, Perancangan Metodologi, Penulisan Draf Awal, dan Supervisi.
Moh. Izzul Haq Ramadlani: Investigasi, Analisis Data, Visualisasi, dan Penulisan Draf Awal.

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. Eka Putra, F. Muslim, N. Hasanah, Holipah, R. Paradina, and R. Alim, "Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 63–72, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.325.
- [2] 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.
- [3] N. M. Akbar, F. P. E. Putra, K. Z. Imam, and M. U. Mansyur, "Analisis Kinerja dan Interopabilitas STB Sebagai Server Penilaian Akhir Tahun," *J. Inf. dan ...*, 2023, [Online]. Available: <https://www.jidt.org/jidt/article/view/365>
- [4] 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>
- [5] A. Zulfikri, F. P. E. Putra, M. A. Huda, H. Hasbullah, M. Mahendra, and M. Surur, "Analisis Keamanan Jaringan Dari Serangan Malware Menggunakan Filtering Firewall Dengan Port Blocking," 2023. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3379.
- [6] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and S. N. R. Barokah, "Tinjauan Performa RouterOS Mikrotik dalam Jaringan Internet: Analisis Kinerja dan Kelayakan," 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.
- [7] 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>
- [8] 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.
- [9] 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
- [10] S. Arifin, N. P. Dewi, . U., M. N. Arifin, and F. P. E. Putra, "Aplikasi Pengolahan Data Mahasiswa Kkn Pada Universitas Madura," *Insa. Comtech Inf. Sci. Comput. Technol. J.*, vol. 8, no. 2, p. 24, 2023, doi: 10.53712/jic.v8i2.2085.
- [11] G. Wu, J. Wu, and X. Zhang, "Research on gaussian mixture model and its distributed data mining algorithm in wireless sensor networks," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 46, no. 4, pp. 8513–8527, 2024, doi: 10.3233/JIFS-238711.
- [12] I. Chakraborty, L. Sun, and C.-S. Lai, "Recycling waste rubber bands and human hair into complementary surface structure-based tribo-layers for ultrahigh power generation and self-powered health monitoring," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 43, 2025, doi: 10.1016/j.susmat.2025.e01295.
- [13] Y. Sun, Z. Qian, Y. Wang, Y. Li, Y. Zheng, and Y. Liu, "A flexible humidity-resistant nanofiber-based triboelectric nanogenerator with high electrical output stability as self-powered sensors for motion monitoring," *Chem. Eng. J.*, vol. 506, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.159845.
- [14] R. O. Agbaoye, J. Janovec, A. Ayuella, and J. S. Dolado, "Thermoelectric properties of the main species present in Portland cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 183, 2024, doi: 10.1016/j.cemconres.2024.107587.
- [15] M. Chen *et al.*, "Highly elastic, lightweight, and high-performance all-aerogel triboelectric nanogenerator for

- self-powered intelligent fencing training,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 165, 2025, doi: 10.1016/j.mser.2025.101004.
- [16] S. S. Mouli, V. Thalagondapati, and T. R. Rao, “A Multi-Faceted Framework to Enhance Lifespan and Optimize Latency in Wireless Sensor Networks,” *J. Wirel. Mob. Networks, Ubiquitous Comput. Dependable Appl.*, vol. 16, no. 1, pp. 431–455, 2025, doi: 10.58346/JOWUA.2025.I1.026.
- [17] K. Lien, K.-H. Lin, and H.-Y. Wei, “Energy-Efficient Traffic Steering in Millimeter-Wave Dual Connectivity Discontinuous Reception Framework,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 115716–115731, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3218701.
- [18] M. Dai, Z. Luo, Y. Wu, L. Qian, B. Lin, and Z. Su, “Incentive Oriented Two-Tier Task Offloading Scheme in Marine Edge Computing Networks: A Hybrid Stackelberg-Auction Game Approach,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 22, no. 12, pp. 8603–8619, 2023, doi: 10.1109/TWC.2023.3264607.
- [19] Y. M. Raghavendra, U. B. Mahadevaswamy, M. Asha, and G. Manjula, “Energy Optimization in Spectrum Sensing Using Cognitive Radio Wireless Sensor Networks,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 133, no. 3, pp. 1675–1691, 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10839-w.
- [20] 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.
- [21] J. Lan *et al.*, “OpenL3: Embedding Diverse Network Services into MANETs Using Multidimensional Identifier,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 11, pp. 17700–17716, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2025.3538167.
- [22] P. Khuwuthyakorn, A. Lakhan, A. Majumdar, and O. Thinnukool, “Blockchain-Enabled Self-Autonomous Intelligent Transport System for Drone Task Workflow in Edge Cloud Networks,” *Algorithms*, vol. 18, no. 8, 2025, doi: 10.3390/a18080530.
- [23] H. Wang, K. Liu, C. Wang, and H. Hu, “Energy-Efficient, Cluster-Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Using Fuzzy Logic and Quantum Annealing Algorithm,” *Sensors*, vol. 24, no. 13, 2024, doi: 10.3390/s24134105.
- [24] M. Zhang, J. Shi, X. Sun, S. Yong, and S. P. Beeby, “A randomly structured composite PDMS/PTFE ferroelectret soft smart material,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 34, no. 3, 2025, doi: 10.1088/1361-665X/adb6e1.
- [25] K. Aravind and P. K. R. Maddikunta, “Optimized Fuzzy Logic Based Energy-Efficient Geographical Data Routing in Internet of Things,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 18913–18930, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3354174.
- [26] A. Sarfraz, A. Ahmad, F. Zeshan, M. Hamid, and T. A. N. Alshalali, “Unmasking deception: detection of fake profiles in online social ecosystems,” *J. Big Data*, vol. 12, no. 1, 2025, doi: 10.1186/s40537-025-01254-y.
- [27] Y. Shen *et al.*, “Sunflower-inspired smart evaporator with omnidirectional solar tracking for highly enhanced energy-capturing and sustainable freshwater harvesting,” *Chem. Eng. J.*, vol. 503, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2024.157917.
- [28] S. Mohsen Hassan, M. M. Mohamad, and F. Binti Muchtar, “Enhancing MANET Security Through Long Short-Term Memory-Based Trust Prediction in Location-Aided Routing Protocols,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 120142–120168, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3572619.
- [29] N. C. Velayudhan, A. Anitha, and M. Madanan, “An Optimisation driven Deep Residual Network for Sybil attack detection with reputation and trust-based misbehaviour detection in VANET,” *J. Exp. Theor. Artif. Intell.*, vol. 36, no. 5, pp. 721–744, 2024, doi: 10.1080/0952813X.2022.2104387.
- [30] D. A. Amer, S. A. Soliman, A. F. Hassan, and A. A. Zamel, “Enhancing connectivity and coverage in wireless sensor networks: a hybrid comprehensive learning-Fick’s algorithm with particle swarm optimization for router node placement,” *Neural Comput. Appl.*, vol. 36, no. 34, pp. 21671–21702, 2024, doi: 10.1007/s00521-024-10315-x.
- [31] S. R. Kolli, M. Z. U. Zia-Ur-Rahman, and M. D. Bayleyegn, “EECS-GT: Energy-Efficient Collaborative Sensing Model Using Game Theory for Wireless Sensor Networks,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 115657–115671, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3445953.
- [32] J. Tussupov *et al.*, “Analysis of Formal Concepts for Verification of Pests and Diseases of Crops Using Machine Learning Methods,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 19902–19910, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3361046.
- [33] H. Qu, H. Lu, and X. Li, “Numerical study on the energy-harvesting performance of multiple oscillating hydrofoils arranged in the spanwise direction,” *Ocean Eng.*, vol. 317, 2025, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.120042.
- [34] L. Li, X. Li, L. Wang, Y. Jia, Y. Hu, and J. Nan, “High gain nested dielectric resonator rectenna based on higher order mode and magneto-electric dipole theory,” *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 188, 2025, doi:

- 10.1016/j.aeue.2024.155590.
- [35] Z. Zheng *et al.*, “Motion response and energy harvesting of multi-module floating photovoltaics in seas,” *Ocean Eng.*, vol. 310, 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.118760.
- [36] Z. Qu, Z. Chen, X. Xin, and P. Tiwari, “QEPP: A Quantum Efficient Privacy Protection Protocol in 6G-Quantum Internet of Vehicles,” *IEEE Trans. Intell. Veh.*, vol. 9, no. 1, pp. 905–916, 2024, doi: 10.1109/TIV.2023.3304852.
- [37] T. Dou, Z. Zheng, W. Qiu, and C. Ge, “A Secure Medical Data Framework Integrating Blockchain and Edge Computing: An Attribute-Based Signcryption Approach,” *Sensors*, vol. 25, no. 9, 2025, doi: 10.3390/s25092859.
- [38] S. Kaneko, K. Honda, T. Kanai, J. I. Kani, and T. Yoshida, “Photonic Gateway and Protocol-Independent End-to-End Optical-Connection Provisioning in All-Photonic Metro-Access Converged Network,” *IEEE Photonics J.*, vol. 15, no. 3, 2023, doi: 10.1109/JPHOT.2023.3262215.
- [39] B. Zhang, H. Shen, T. Wang, and G. Bai, “Invisible man: blockchain-enabled peer-to-peer collaborative privacy games in LBSs,” *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 17, no. 4, pp. 2595–2607, 2024, doi: 10.1007/s12083-024-01728-5.
- [40] M. Usman Hashmi, A. Imran, A. Bilal, M. Garayev, H. Fathi, and S. Dhelim, “Resource-Limited Skew Estimation and Correction (RLSEC) for Edge Devices in Delay Non-Tolerant Networks,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 159597–159610, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3469581.
- [41] C. Chakraborty, S. B. Soufiene, F. A. Almalki, and H. Sakli, “FC-SEEDA: fog computing-based secure and energy efficient data aggregation scheme for Internet of healthcare Things,” *Neural Comput. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 241–257, 2024, doi: 10.1007/s00521-023-08270-0.
- [42] 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.
- [43] Q. H. Ta, V. K. Ta, T. T. Nguyen, and H. Oh, “A WSN and LoRa Hybrid Multimedia Transmission Protocol for Scalar Data and Image Transmission †,” *Sensors*, vol. 24, no. 24, 2024, doi: 10.3390/s24248165.
- [44] D. Bhatia, D. Kim, and H.-S. Park, “Smart exercise device using triboelectric self-powered sensor for high intensity interval training (HIIT),” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 290, 2025, doi: 10.1016/j.bios.2025.117995.
- [45] K. Yesodha, M. Marudhamuthu, K. Thangaramya, and A. Kannan, “Elliptic curve encryption-based energy-efficient secured ACO routing protocol for wireless sensor networks,” *J. Supercomput.*, vol. 80, no. 13, pp. 18866–18899, 2024, doi: 10.1007/s11227-024-06235-1.
- [46] C. Reuter, A. Hughes, and C. Buntain, “Combating information warfare: state and trends in user-centred countermeasures against fake news and misinformation,” *Behav. Inf. Technol.*, vol. 44, no. 13, pp. 3348–3361, 2025, doi: 10.1080/0144929X.2024.2442486.
- [47] A. Brighente, M. Conti, G. D. Di Renzone, G. Peruzzi, and A. Pozzebon, “Security and Privacy of Smart Waste Management Systems: A Cyber-Physical System Perspective,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 5, pp. 7309–7324, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3322532.
- [48] M. Khalid, J. Ali, A. R. Mohsin, B.-H. Roh, and M. J. F. Alenazi, “Deep learning techniques for enhanced security and privacy in 6G terrestrial–nonterrestrial network architecture,” *J. Supercomput.*, vol. 81, no. 4, 2025, doi: 10.1007/s11227-025-07097-x.
- [49] M. Saito, T. Koshimizu, Z. Pan, J. Liu, H. Nakazawa, and S. Shimamoto, “Energy Borrowing Transmission Scheme Based on D2D Communication for 5G Networks,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 165841–165853, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3135359.
- [50] E. Nagarathinam *et al.*, “Maximizing Solar Potential Using the Differential Grey Wolf Algorithm for PV System Optimization,” *Energy Eng. J. Assoc. Energy Eng.*, vol. 121, no. 8, pp. 2129–2142, 2024, doi: 10.32604/ee.2024.052280.
- [51] H. Tyagi, R. Kumar, and S. K. Pandey, “A detailed study on trust management techniques for security and privacy in IoT: challenges, trends, and research directions,” *High-Confidence Comput.*, vol. 3, no. 2, 2023, doi: 10.1016/j.hcc.2023.100127.