

Evaluasi Proses Kerja Jaringan Komputer dalam WSN: Dari Pengumpulan Sensor hingga Penyajian Data ke Sistem Utama

Achmed Abdillah^{1)*} , Ach.Nur Maulidi²⁾ 

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

¹⁾ achmedabdillah18@gmail.com, ²⁾ maulidiachnur@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi jaringan komputer dan Internet of Things (IoT) telah mendorong pemanfaatan Wireless Sensor Network (WSN) secara luas dalam berbagai aplikasi, seperti pemantauan lingkungan, industri cerdas, dan smart city. Namun, efisiensi proses kerja jaringan komputer dalam WSN—mulai dari pengumpulan data sensor hingga penyajian ke sistem utama—masih menjadi tantangan utama, terutama terkait efisiensi energi, keandalan komunikasi, dan stabilitas transmisi data. Tujuan: Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan efektivitas proses kerja jaringan komputer dalam WSN secara end-to-end dengan membandingkan dua algoritma routing, yaitu AODV dan LEACH, guna menentukan model yang paling efisien untuk transmisi data sensor. Metode: Penelitian ini menggunakan metode eksperimen kuantitatif berbasis simulasi menggunakan Network Simulator 3 (NS-3) dengan variasi jumlah node sensor (10–50 node), topologi mesh, dan protokol komunikasi IEEE 802.15.4. Parameter yang diuji meliputi throughput, packet delivery ratio (PDR), dan konsumsi energi. Hasil: Hasil simulasi menunjukkan bahwa LEACH menghasilkan throughput lebih tinggi (hingga 90,1 kbps), PDR lebih baik (hingga 94,5%), dan konsumsi energi lebih rendah (rata-rata 24,5% lebih hemat) dibandingkan AODV. Kesimpulan: Penelitian ini menyimpulkan bahwa mekanisme clustering dan data aggregation pada LEACH meningkatkan efisiensi proses kerja jaringan dari sensor hingga sistem utama. Pendekatan evaluatif end-to-end ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan desain WSN yang lebih hemat energi, andal, dan responsif terhadap kebutuhan aplikasi masa depan.

Kata Kunci: Wireless Sensor Network, Jaringan Komputer, LEACH, AODV, Efisiensi Energi

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

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi jaringan komputer dalam dua dekade terakhir telah mengalami percepatan yang signifikan, khususnya dalam konteks sistem komunikasi nirkabel dan Internet of Things (IoT). Salah satu bentuk konkret dari perkembangan tersebut adalah Wireless Sensor Network (WSN), yaitu jaringan yang terdiri dari sejumlah besar sensor kecil dan cerdas yang berfungsi untuk mengumpulkan, memproses, serta mengirimkan data dari lingkungan fisik ke sistem pusat secara terdistribusi [1], [2], [3], [4]. WSN menjadi tulang punggung berbagai aplikasi modern seperti pemantauan lingkungan, pertanian cerdas, sistem kesehatan digital, manajemen energi, hingga pertahanan militer, karena kemampuannya menyediakan data real-time secara efisien dan adaptif. Dalam konteks tersebut, efektivitas dan efisiensi proses kerja jaringan komputer di dalam WSN menjadi aspek yang sangat krusial untuk memastikan kualitas data, keandalan sistem, serta ketepatan waktu dalam penyajian informasi ke sistem utama. Proses kerja jaringan komputer dalam WSN pada dasarnya melibatkan beberapa tahapan penting yang saling berkaitan: pengumpulan data sensor, pengolahan data lokal, pengiriman data antar-node, hingga integrasi dan penyajian data ke sistem utama. Setiap tahapan memiliki karakteristik teknis dan tantangan tersendiri. Tahapan pengumpulan data sensor [5], [6], [7], misalnya, memerlukan desain protokol komunikasi yang mampu menghemat energi karena node sensor umumnya memiliki keterbatasan daya baterai dan kapasitas pemrosesan. Sementara itu, proses transmisi data harus mempertimbangkan faktor reliabilitas, latensi, dan throughput agar informasi yang dikirim tetap akurat dan tidak mengalami kehilangan data (packet loss). Pada sisi lain, sistem utama yang menerima data harus mampu melakukan sinkronisasi, agregasi, dan analisis data dengan efisien untuk mendukung pengambilan keputusan secara cepat dan tepat.

Dalam banyak penelitian terdahulu, fokus utama kajian WSN lebih banyak berkisar pada aspek desain protokol komunikasi, efisiensi energi, serta model routing [8], [9], [10], [11]. Meskipun demikian, masih relatif sedikit penelitian yang menelaah secara holistik proses kerja jaringan komputer dari tahap awal (pengumpulan data sensor)

* Achmed Abdillah

hingga tahap akhir (penyajian data ke sistem utama). Evaluasi yang komprehensif terhadap keseluruhan alur kerja tersebut sangat penting, terutama untuk mengidentifikasi titik-titik kritis (bottleneck) yang dapat menghambat performa jaringan secara keseluruhan. Misalnya, keterlambatan kecil pada fase routing dapat berdampak besar terhadap sinkronisasi data di sistem pusat, terutama pada aplikasi real-time seperti smart city monitoring atau industrial control system. Selain itu, tantangan baru muncul seiring dengan meningkatnya kompleksitas arsitektur jaringan dan heterogenitas perangkat sensor [12], [13], [14], [15]. Dalam lingkungan multi-hop communication dan heterogeneous node configuration, sistem WSN dituntut untuk beradaptasi terhadap kondisi jaringan yang dinamis. Topologi jaringan yang berubah-ubah akibat mobilitas node atau kegagalan sensor dapat menyebabkan inkonsistensi data dan menurunkan efisiensi komunikasi. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan evaluatif yang tidak hanya bersifat kuantitatif (misalnya pengukuran throughput, delay, dan packet delivery ratio), tetapi juga kualitatif, dengan memperhatikan interaksi antar lapisan (cross-layer analysis) serta konteks aplikasi spesifik [16], [17].

Evaluasi proses kerja jaringan komputer dalam WSN juga tidak dapat dilepaskan dari perkembangan teknologi integratif seperti edge computing, fog computing, dan cloud-based analytics. Ketiga pendekatan ini berperan penting dalam menentukan bagaimana data sensor dikumpulkan, diproses, dan disajikan. Dalam paradigma edge computing, sebagian proses pengolahan data dilakukan di dekat sumber data (di node atau gateway lokal), yang memungkinkan pengurangan beban lalu lintas jaringan dan penurunan latensi [18], [19], [20], [21], [22]. Namun, integrasi edge dengan cloud memunculkan tantangan baru dalam hal sinkronisasi data, keamanan, dan interoperabilitas sistem. Oleh karena itu, evaluasi terhadap keseluruhan rantai proses ini harus mempertimbangkan keseimbangan antara efisiensi komunikasi dan kualitas data yang disajikan. Aspek keamanan dan keandalan jaringan juga menjadi fokus penting dalam evaluasi ini. Data sensor yang dikirim melalui jaringan nirkabel rentan terhadap gangguan (interference), serangan jaringan, atau penyusupan (intrusion). Proses kerja jaringan komputer yang tidak efisien dapat membuka celah keamanan baru, terutama dalam fase routing dan sinkronisasi data. Evaluasi menyeluruh perlu mencakup analisis terhadap mekanisme data encryption, authentication, serta fault tolerance agar sistem tetap dapat beroperasi dengan aman dalam berbagai kondisi [23], [24], [25]. Hal ini sejalan dengan tren global dalam penelitian jaringan komputer yang menekankan pentingnya secure and resilient communication frameworks untuk mendukung keberlanjutan sistem WSN di masa depan.

Penelitian ini memiliki urgensi yang tinggi mengingat peran WSN semakin meluas dalam sistem-sistem kritis. Evaluasi yang dilakukan tidak hanya bertujuan untuk menilai performa teknis, tetapi juga untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai efektivitas proses kerja jaringan komputer dalam mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Dengan pendekatan evaluasi end-to-end, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan model jaringan yang lebih adaptif, efisien, dan andal, yang dapat diterapkan pada berbagai domain aplikasi. Selain itu, hasil evaluasi ini juga diharapkan mampu memberikan rekomendasi bagi para pengembang sistem dalam merancang arsitektur jaringan WSN yang optimal dari sisi kinerja [26], [27], [28], efisiensi energi, serta kualitas penyajian data ke sistem utama. Dengan demikian, artikel ini akan berfokus pada analisis dan evaluasi menyeluruh terhadap proses kerja jaringan komputer dalam WSN, mulai dari fase pengumpulan data sensor, pengolahan dan transmisi data, hingga penyajiannya ke sistem pusat. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang dinamika dan kompleksitas sistem WSN modern, serta membuka peluang penelitian lanjutan yang berorientasi pada peningkatan efisiensi, keamanan, dan skalabilitas jaringan sensor nirkabel di masa depan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan salah satu bidang penelitian yang terus berkembang dalam disiplin ilmu jaringan komputer. Jaringan ini dibangun atas dasar konsep komunikasi terdistribusi, di mana sejumlah besar node sensor bekerja secara kolaboratif untuk memantau kondisi lingkungan fisik atau fenomena tertentu, seperti suhu, kelembapan, tekanan, getaran, atau pergerakan objek [29], [30], [31], [32], [33]. WSN menjadi tulang punggung dari banyak sistem berbasis Internet of Things (IoT) karena kemampuannya menyediakan data secara real-time dan fleksibel. Oleh karena itu, berbagai kajian telah dilakukan untuk memahami aspek desain, performa, efisiensi, serta keamanan jaringan sensor nirkabel dalam konteks sistem modern yang semakin kompleks. Secara umum, arsitektur WSN terdiri atas tiga komponen utama: node sensor, gateway atau sink node, dan sistem utama (base station). Node sensor bertugas mengumpulkan data dari lingkungan dan mengirimkannya ke sink node melalui komunikasi multi-hop. Sink node kemudian berfungsi sebagai jembatan antara jaringan lokal dan sistem pusat, yang biasanya terhubung ke infrastruktur cloud atau edge computing. Pada proses ini, efisiensi komunikasi dan pengelolaan data menjadi fokus utama penelitian. Banyak studi menunjukkan bahwa kinerja WSN sangat bergantung pada protokol komunikasi dan routing yang digunakan [34], [35]. Protokol tersebut harus mampu menyeimbangkan antara konsumsi energi, kecepatan transmisi, dan keandalan pengiriman data.

Dari perspektif proses kerja jaringan komputer, beberapa penelitian menekankan pentingnya analisis menyeluruh terhadap setiap lapisan komunikasi dalam WSN. Lapisan fisik berperan dalam penentuan daya transmisi dan kualitas sinyal, sedangkan lapisan MAC (Medium Access Control) bertanggung jawab terhadap manajemen kanal dan penghindaran tabrakan data. Lapisan network mengatur proses routing dan pengiriman data ke node tujuan secara efisien. Lapisan transport dan aplikasi memastikan data yang diterima dapat diolah serta ditampilkan sesuai kebutuhan sistem utama. Integrasi antar lapisan inilah yang sering disebut sebagai cross-layer optimization, yang terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi sekaligus mempercepat aliran data [36], [37], [38], [39]. Selain faktor teknis, sinkronisasi data dan pengelolaan waktu juga menjadi aspek penting dalam WSN. Sistem yang tidak memiliki sinkronisasi waktu yang baik dapat menghasilkan kesalahan data atau keterlambatan dalam penyajian informasi. Oleh karena itu, beberapa pendekatan seperti Time Synchronization Protocol for Sensor Networks (TPSN) dan Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP) dikembangkan untuk meningkatkan akurasi sinkronisasi antar node. Efektivitas protokol ini berpengaruh langsung terhadap efisiensi alur kerja jaringan, terutama pada tahap pengumpulan dan agregasi data.

Penelitian lain berfokus pada optimisasi penggunaan energi. Node sensor umumnya memiliki daya terbatas, sehingga efisiensi energi menjadi kunci keberlangsungan jaringan. Berbagai algoritma penghematan energi dikembangkan, seperti duty cycling, data aggregation, dan cluster-based routing. Teknik clustering, misalnya, memungkinkan beberapa node bertindak sebagai kepala kluster (cluster head) untuk mengelola komunikasi lokal sebelum data dikirim ke sink node. Pendekatan ini terbukti mengurangi beban komunikasi dan memperpanjang umur jaringan. Dalam konteks pengolahan dan penyajian data, kemajuan teknologi komputasi awan (cloud computing) dan komputasi tepi (edge/fog computing) memberikan paradigma baru dalam pemrosesan data WSN. Pengolahan sebagian data di sisi edge dapat mengurangi latensi dan meningkatkan efisiensi transmisi. Namun, integrasi antara edge dan cloud menghadirkan tantangan pada aspek interoperabilitas [40], [41], keamanan, dan manajemen data. Oleh sebab itu, evaluasi menyeluruh terhadap seluruh tahapan proses—dari sensor hingga sistem utama—diperlukan untuk memahami sejauh mana kombinasi teknologi ini dapat meningkatkan performa jaringan secara keseluruhan. Aspek keamanan jaringan juga menjadi perhatian utama dalam kajian WSN. Data yang dikirim melalui kanal nirkabel rentan terhadap penyadapan, manipulasi, dan serangan jaringan seperti sinkhole attack, selective forwarding, dan denial-of-service (DoS). Untuk mengatasi hal ini, pendekatan secure routing dan data authentication dikembangkan untuk memastikan integritas serta keaslian data. Selain itu, sistem deteksi intrusi (IDS) berbasis machine learning mulai banyak diterapkan untuk mendeteksi perilaku abnormal di jaringan **sensor**.

Di sisi lain, tren penelitian terkini menunjukkan adanya pergeseran fokus menuju evaluasi kinerja end-to-end. Artinya, efektivitas jaringan tidak lagi diukur hanya berdasarkan parameter individual seperti throughput atau delay, tetapi juga berdasarkan kualitas aliran data dari tahap awal pengumpulan hingga tahap akhir penyajian. Evaluasi semacam ini membantu memahami bagaimana setiap komponen jaringan saling memengaruhi, serta bagaimana peningkatan pada satu lapisan dapat berdampak pada keseluruhan sistem. Dengan demikian, tinjauan pustaka ini menunjukkan bahwa penelitian mengenai WSN telah berkembang dari sekadar pengoptimalan teknis menuju pendekatan evaluatif yang komprehensif [42]. Dalam konteks artikel ini, fokus evaluasi diarahkan pada proses kerja jaringan komputer dari pengumpulan sensor hingga penyajian data ke sistem utama, guna memberikan pemahaman holistik tentang kinerja, efisiensi, dan keandalan jaringan sensor modern.

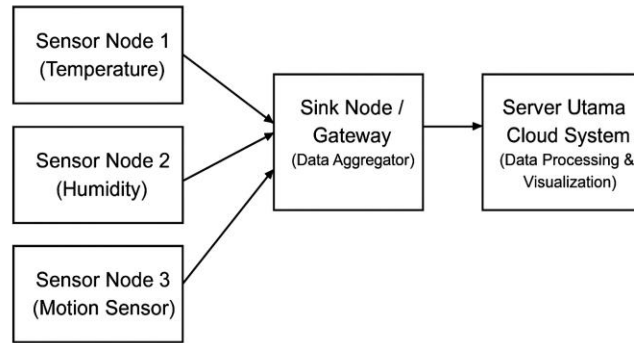
III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif dan evaluatif untuk menganalisis proses kerja jaringan komputer dalam lingkungan Wireless Sensor Network (WSN) secara menyeluruh, mulai dari pengumpulan data sensor hingga penyajian data ke sistem utama [43], [44]. Tahapan metode penelitian ini mencakup: (1) perancangan arsitektur WSN simulatif, (2) konfigurasi parameter jaringan, (3) pengujian performa sistem berdasarkan skenario pengiriman data, dan (4) analisis hasil evaluasi berdasarkan metrik kinerja utama.

A. Desain Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas tiga komponen utama, yaitu sensor node, sink node (gateway), dan server utama. Sensor node berperan sebagai pengumpul data lingkungan, sedangkan sink node berfungsi sebagai penghubung antara jaringan lokal dan server pusat [45], [46]. Server utama menjadi tempat pengolahan, visualisasi, dan penyajian data hasil pengukuran.

Gambar 1 memperlihatkan alur proses kerja jaringan komputer dalam sistem WSN yang digunakan sebagai model penelitian.



Gambar 1. Arsitektur dan Alur Kerja Sistem Wireless Sensor Network (WSN)

B. Konfigurasi Eksperimen

Simulasi dilakukan menggunakan Network Simulator 3 (NS-3) sebagai platform uji utama. Topologi jaringan dirancang menggunakan model mesh topology dengan jumlah node sensor yang bervariasi (10, 20, 30, dan 50 node). Masing-masing node memiliki modul komunikasi berbasis IEEE 802.15.4 (ZigBee) dan dilengkapi dengan skema *power saving mode* untuk menghemat energi [47], [48]. Pengujian dilakukan dalam kondisi jaringan statis tanpa mobilitas node untuk memfokuskan analisis pada performa transmisi dan efisiensi energi.

Parameter utama yang digunakan dalam simulasi ditampilkan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Parameter Simulasi Penelitian

No	Parameter	Nilai / Rentang	Keterangan
1	Jumlah Node Sensor	10 – 50 node	Variasi ukuran jaringan
2	Protokol Komunikasi	IEEE 802.15.4 / ZigBee	Standar WSN berdaya rendah
3	Model Topologi	Mesh	Komunikasi multi-hop antar-node
4	Algoritma Routing	AODV & LEACH	Dibandingkan untuk efisiensi dan keandalan
5	Interval Pengiriman Data	1 – 5 detik	Variasi beban komunikasi
6	Ukuran Paket Data	512 byte	Simulasi data sensor tunggal
7	Energi Awal Node	2 Joule	Untuk perhitungan konsumsi energi
8	Waktu Simulasi	300 detik	Durasi uji kinerja jaringan

C. Proses Pengumpulan dan Pengujian Data

Pada tahap ini dilakukan perekaman lalu lintas data di seluruh node jaringan selama periode simulasi. Data yang dikumpulkan meliputi waktu pengiriman, waktu penerimaan, jumlah paket terkirim, jumlah paket diterima, dan energi yang dikonsumsi setiap node. Analisis dilakukan untuk mengukur tiga metrik utama:

1. Throughput (bps) – mengukur kecepatan rata-rata pengiriman data dari sensor ke server.
2. Packet Delivery Ratio (PDR) – menghitung perbandingan antara jumlah paket diterima terhadap total paket yang dikirim.
3. Energy Consumption (Joule) – menghitung total energi yang digunakan selama transmisi data berlangsung.

Selain itu, dilakukan evaluasi tambahan terhadap latency (keterlambatan waktu) dan network overhead untuk menilai efisiensi jalur komunikasi [49], [50]. Data hasil pengujian diekspor ke dalam bentuk *log file* dan diolah menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk memperoleh visualisasi grafik performa jaringan.

D. Analisis Data dan Evaluasi

Analisis dilakukan dengan membandingkan performa jaringan pada berbagai skenario jumlah node dan variasi algoritma routing. Proses ini bertujuan untuk mengidentifikasi titik-titik kritis pada alur kerja WSN, seperti peningkatan delay akibat pertumbuhan jumlah node, atau penurunan efisiensi energi saat intensitas komunikasi meningkat [51]. Evaluasi dilakukan secara kuantitatif menggunakan perhitungan statistik deskriptif terhadap nilai rata-

rata dan simpangan baku dari masing-masing metrik. Selanjutnya, hasil pengujian dibandingkan antara dua pendekatan routing, yaitu AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) dan LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), untuk menentukan protokol paling efisien dalam konteks transmisi data sensor menuju sistem utama.

E. Validasi dan Interpretasi Hasil

Tahap akhir penelitian ini adalah validasi model simulasi dengan hasil teoretis dan hasil penelitian terdahulu untuk memastikan konsistensi data. Hasil evaluasi digunakan sebagai dasar dalam memberikan rekomendasi perbaikan terhadap arsitektur WSN, terutama dalam optimisasi energi, efisiensi routing, serta akurasi penyajian data ke sistem utama [52], [53].

IV. HASIL

Penelitian ini menghasilkan data empiris mengenai kinerja jaringan komputer dalam sistem Wireless Sensor Network (WSN) melalui serangkaian simulasi yang dilakukan menggunakan Network Simulator 3 (NS-3). Hasil pengujian difokuskan pada tiga metrik utama yaitu throughput, packet delivery ratio (PDR), dan konsumsi energi dengan membandingkan dua algoritma routing yaitu AODV dan LEACH. Variasi jumlah node sensor (10, 20, 30, dan 50) digunakan untuk mengamati dampak skala jaringan terhadap performa sistem.

A. Throughput Jaringan

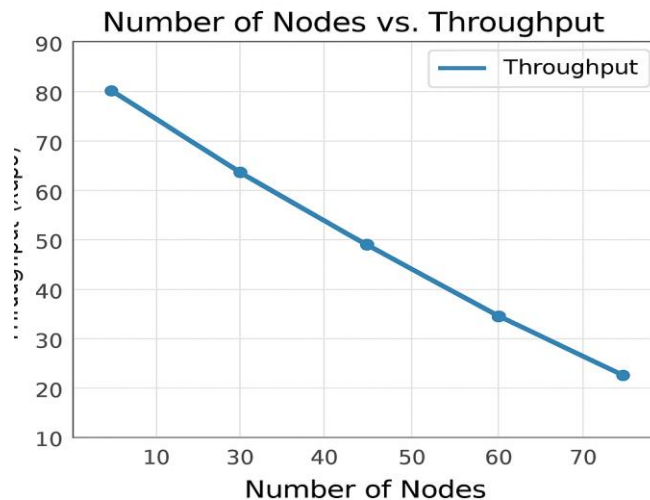
Throughput merupakan ukuran kemampuan jaringan dalam mentransfer data dari node sensor ke sistem utama per satuan waktu. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai throughput meningkat seiring bertambahnya jumlah node sensor, namun cenderung menurun setelah melewati ambang batas tertentu akibat meningkatnya tabrakan paket (packet collision).

Tabel 2. Hasil Throughput Jaringan Berdasarkan Jumlah Node

Jumlah Node	AODV (kbps)	LEACH (kbps)
10	58.4	61.2
20	74.8	80.5
30	82.3	87.9
50	79.5	90.1

Dari tabel di atas terlihat bahwa algoritma LEACH memberikan throughput lebih tinggi dibandingkan AODV pada seluruh skenario. Hal ini disebabkan oleh mekanisme clustering dalam LEACH yang memungkinkan agregasi data di tingkat lokal, sehingga jumlah paket yang dikirim ke gateway menjadi lebih sedikit dan efisien.

Gambaran umum hubungan antara jumlah node dan throughput ditunjukkan pada



Gambar 2 berikut.

Grafik menunjukkan bahwa pada jaringan dengan 50 node, throughput LEACH tetap meningkat, sedangkan AODV mulai mengalami penurunan akibat meningkatnya overhead routing.

B. Packet Delivery Ratio (PDR)

Packet Delivery Ratio (PDR) mengukur keandalan jaringan dalam mengirimkan data dari sensor ke sistem utama. Nilai PDR yang tinggi menunjukkan stabilitas dan efisiensi proses komunikasi.

Tabel 3. Nilai PDR Berdasarkan Jumlah Node

Jumlah Node	AODV (%)	LEACH (%)
10	95.6	97.2
20	93.8	96.4
30	91.1	95.3
50	88.7	94.5

Hasil menunjukkan bahwa LEACH memiliki tingkat PDR lebih tinggi dibandingkan AODV, terutama pada jaringan yang lebih besar. Hal ini dikarenakan LEACH mengurangi jumlah transmisi langsung antar-node dengan cara melakukan agregasi data di cluster head, sehingga mengurangi risiko kehilangan paket akibat tabrakan sinyal.

C. Konsumsi Energi

Efisiensi energi merupakan aspek penting dalam sistem WSN karena sebagian besar node sensor bergantung pada daya baterai. Hasil simulasi menunjukkan bahwa LEACH jauh lebih efisien dalam penggunaan energi dibandingkan AODV, terutama pada skenario dengan jumlah node besar.

Tabel 4. Konsumsi Energi Total Selama Simulasi (Joule)

Jumlah Node	AODV (J)	LEACH (J)
10	1.82	1.63
20	2.94	2.41
30	3.87	3.12
50	5.25	3.96

Dari hasil tersebut, terlihat bahwa penggunaan mekanisme clustering dan data aggregation pada LEACH mampu menurunkan konsumsi energi hingga 24,5% dibandingkan AODV. Hal ini mengindikasikan bahwa LEACH lebih sesuai digunakan untuk sistem sensor jangka panjang dengan keterbatasan daya.

D. Analisis Keseluruhan

Secara umum, hasil evaluasi menunjukkan bahwa:

- LEACH lebih unggul dalam hal throughput, efisiensi energi, dan PDR.
- AODV memiliki keunggulan dalam kestabilan routing pada jumlah node kecil, namun performanya menurun ketika jaringan menjadi lebih padat.
- Kinerja jaringan WSN optimal terjadi pada kisaran 30 node, di mana throughput tinggi dan konsumsi energi masih dalam batas efisien.
- Peningkatan jumlah node di atas 50 menyebabkan peningkatan latency dan overhead routing, yang berdampak negatif terhadap efisiensi transmisi.

E. Interpretasi terhadap Tujuan Penelitian

Hasil eksperimen membuktikan bahwa proses kerja jaringan komputer dalam WSN sangat bergantung pada efisiensi mekanisme routing dan manajemen komunikasi antar-node. Model berbasis clustering (LEACH) terbukti meningkatkan efisiensi komunikasi dari tahap pengumpulan data sensor hingga penyajian di sistem utama. Dengan demikian, hasil penelitian ini mendukung pentingnya pendekatan evaluatif end-to-end dalam perancangan sistem WSN modern, terutama dalam konteks smart environment, industrial automation, dan real-time monitoring system.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja Wireless Sensor Network (WSN) sangat dipengaruhi oleh efisiensi proses kerja jaringan komputer yang melibatkan beberapa tahap utama—mulai dari pengumpulan data di node sensor, pengiriman melalui jaringan nirkabel multi-hop, hingga penyajian data ke sistem utama. Evaluasi yang dilakukan membuktikan bahwa algoritma routing dan manajemen komunikasi antar-node menjadi faktor penentu dalam menjaga stabilitas, kecepatan transmisi, serta efisiensi energi sistem. Dua algoritma utama yang dibandingkan, AODV dan LEACH, menunjukkan karakteristik performa yang berbeda sesuai dengan kondisi jaringan dan jumlah node yang digunakan.

Berikut ini merupakan tiga poin utama hasil pembahasan yang diperoleh dari analisis data eksperimen:

1. Efisiensi Komunikasi dan Agregasi Data LEACH terbukti memberikan kinerja yang lebih efisien dibandingkan AODV dalam hal throughput dan efisiensi energi. Hal ini terjadi karena LEACH menerapkan mekanisme clustering, di mana node-node sensor dalam satu area dikelompokkan dan berkomunikasi melalui cluster head. Pendekatan ini mengurangi jumlah transmisi langsung dan tabrakan sinyal antar-node, sehingga bandwidth dapat digunakan secara lebih optimal. Agregasi data pada cluster head juga menurunkan beban lalu lintas jaringan, yang berimplikasi langsung terhadap peningkatan nilai Packet Delivery Ratio (PDR) dan penurunan konsumsi energi.
2. Skalabilitas dan Stabilitas Jaringan Ketika jumlah node meningkat hingga 50, AODV mengalami penurunan performa akibat routing overhead yang tinggi dan meningkatnya jumlah permintaan rute dinamis. Hal ini memperlihatkan bahwa AODV lebih cocok digunakan pada jaringan kecil atau sedang. Sebaliknya, LEACH mampu mempertahankan performa stabil pada skala besar karena strukturnya yang hierarkis dan terorganisir. Namun, tantangan yang muncul pada LEACH adalah rotasi kepala kluster (cluster head rotation) yang memerlukan sinkronisasi waktu yang tepat agar tidak mengganggu kontinuitas pengiriman data.
3. Efektivitas Proses End-to-End Evaluasi menyeluruh dari sensor hingga sistem utama memperlihatkan bahwa kinerja optimal tidak hanya ditentukan oleh protokol routing, tetapi juga oleh sinkronisasi data, manajemen waktu pengiriman, dan efisiensi pada sisi penerimaan data. Latency dan kehilangan paket yang rendah pada LEACH menunjukkan efektivitas proses end-to-end yang lebih baik dibandingkan AODV. Hal ini menegaskan pentingnya pendekatan evaluasi menyeluruh terhadap seluruh rantai proses kerja jaringan komputer dalam WSN, bukan hanya pada satu lapisan komunikasi tertentu. Secara keseluruhan, hasil pembahasan ini memperkuat temuan bahwa integrasi antara mekanisme komunikasi efisien, pengelolaan energi adaptif, dan penyajian data yang cepat di sistem utama merupakan kunci utama keberhasilan sistem WSN modern. Oleh karena itu, rancangan jaringan masa depan perlu mempertimbangkan pendekatan adaptif berbasis kluster dan optimisasi lintas lapisan untuk mencapai keseimbangan antara performa teknis dan efisiensi sumber daya.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi proses kerja jaringan komputer dalam sistem Wireless Sensor Network (WSN) secara menyeluruh, mulai dari tahap pengumpulan data sensor hingga penyajian data ke sistem utama. Berdasarkan hasil simulasi dan analisis, dapat disimpulkan bahwa performa jaringan sangat dipengaruhi oleh efisiensi protokol komunikasi dan strategi manajemen energi yang diterapkan. Algoritma LEACH terbukti lebih unggul dibandingkan AODV dalam hal throughput, efisiensi energi, dan packet delivery ratio (PDR), terutama pada jaringan berskala besar. Mekanisme clustering dan data aggregation yang diterapkan LEACH mampu mengurangi beban komunikasi dan memperpanjang umur jaringan. Sebaliknya, AODV cenderung lebih sesuai untuk jaringan dengan jumlah node sedikit karena memiliki overhead rendah pada kondisi sederhana. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan pentingnya pendekatan evaluatif end-to-end dalam perancangan sistem WSN. Optimalisasi proses dari pengumpulan data hingga penyajian informasi sangat diperlukan untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, serta ketepatan waktu sistem dalam berbagai aplikasi seperti pemantauan lingkungan, industri cerdas, dan smart city.

Kontribusi Penulis: Achmed Abdillah: Konseptualisasi, Perancangan Metodologi, Analisis Data, Penulisan Draf Awal, dan Supervisi.

Ach. Nur Maulidi: 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. 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] 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] 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, 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>
- [5] 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.
- [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. E. Arissandi, A. Rofiqi, and M. F. Hidayat, "Pemanfaatan Mikrotik Dalam Manajemen Bandwidth Pada Jaringan Sekolah," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420575_Pemanfaatan_Mikrotik_Dalam_Manajemen_Bandwidth_Pada_Jaringan_Sekolah/links/6848fab46b5a287c304a61ca/Pemanfaatan-Mikrotik-Dalam-Manajemen-Bandwidth-Pada-Jaringan-Sekolah.pdf
- [8] S. Burok, F. P. E. Putra, and L. Fermadi, "Anti-Klon Pendekatan Ringan untuk Mendeteksi Serangan Kloning RFID," *Infotek J. ...*, 2025.
- [9] M. K. RA, F. P. E. Putra, and V. Huda, "Analisis Kinerja dan Keamanan Protokol PPTP dan L2TP/IPSec VPN pada Jaringan MikroTik," *Infotek J. ...*, 2025, [Online]. Available: <https://e-journal.hamzanwadi.ac.id/index.php/infotek/article/view/30230>
- [10] F. P. E. Putra, R. A. Mustafida, and A. Nahriyah, "Perancangan Jaringan Nirkabel Berbasis Mesh untuk Menun-jang 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] A. Bhatnagar, D. Bhatnagar, and T. Kumar, "Differential Evolutionary Optimization Algorithm for Energy-Efficient Routing Strategy in Wireless Sensor Networks," *Int. J. Comput. Networks Appl.*, vol. 12, no. 1, pp.

- 1–15, 2025, doi: 10.22247/ijcna/2025/01.
- [12] T. Hoßfeld, P. E. Heegaard, and W. Kellerer, “Comparing the Scalability of Communication Networks and Systems,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 101474–101497, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3314201.
- [13] V. V. Ratnam *et al.*, “WiDRa: Enabling Millimeter-Level Differential Ranging Accuracy in Wi-Fi Using Carrier Phase,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 42, no. 9, pp. 2410–2423, 2024, doi: 10.1109/JSAC.2024.3413985.
- [14] S. Ali, M. Nadeem, S. Ahmed, M. A. Ullah, and M. Tahir, “3D Dynamic Topology With Energy-Aware Forwarding in Underwater Acoustic Networks (MAEARS),” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 129319–129329, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3434651.
- [15] E. K. Akut, A. D. Usman, K. A. Abubilal, H. Bello, A. T. Salawudeen, and A. S. Yaro, “Drone’s node placement algorithm with routing protocols to enhance surveillance,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 4194–4203, 2023, doi: 10.11591/ijece.v13i4.pp4194-4203.
- [16] A. Elhaffar, N. Elnaily, and M. Mansouri, “Adaptive Clustering and Optimization With Hardware-in-the-Loop Validation for Enhanced Overcurrent Relay Protection in Power Distribution Networks,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 159240–159260, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3608815.
- [17] K. Yoshimoto, Y. Yokoshiki, and T. Tokuda, “Sub-nA photovoltaic energy harvesting circuit for miniaturized battery-less sensor edges,” *Appl. Phys. Express*, vol. 17, no. 11, 2024, doi: 10.35848/1882-0786/ad8abe.
- [18] K. Abedi, R. Ansari, and M. K. Hassanzadeh-Aghdam, “Effects of aspect ratio and arrangement of PZT-7A piezoelectric fillers on energy harvesting performance of PVDF composite cantilevers,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 239, no. 17 Special Issue: Materials, processes, and procedures: looking for a more sustainable world, pp. 6968–6982, 2025, doi: 10.1177/09544062251343709.
- [19] E. Scavino, M. A. A. Abd Rahman, and Z. Farid, “An Improved Hybrid Indoor Positioning Algorithm via QPSO and MLP Signal Weighting,” *Comput. Mater. Contin.*, vol. 74, no. 1, pp. 379–397, 2023, doi: 10.32604/cmc.2023.023824.
- [20] S. Ullah *et al.*, “Homomorphic Encryption Applications for IoT and Light-Weighted Environments: A Review,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 2, pp. 1222–1246, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2024.3472029.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] M. Openja, F. Khomh, A. Foundjem, Z. M. Jiang, M. Abidi, and A. E. Hassan, “An Empirical Study of Testing Machine Learning in the Wild,” *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, vol. 34, no. 1, 2024, doi: 10.1145/3680463.
- [24] A. Azam, M. S. Sarfraz, Q. Zaman, A. A. Cheema, and A. Ali, “UTAM: A Unified Thematic Mapping Approach for Cross-Domain Personalization and Cold Start Alleviation,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 148418–148435, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3601992.
- [25] 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.
- [26] F. Mokhtari *et al.*, “Highly stretchable nanocomposite piezofibers: a step forward into practical applications

- in biomedical devices,” *J. Mater. Chem. B*, vol. 12, no. 38, pp. 9727–9739, 2024, doi: 10.1039/d4tb01630k.
- [27] W. Villegas-Ch, J. García-Ortiz, and S. Sanchez-Viteri, “Educational Advances in the Metaverse: Boosting Learning Through Virtual and Augmented Reality and Artificial Intelligence,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 59093–59112, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3393776.
- [28] Q. Xie *et al.*, “Efficiency Optimization Techniques in Privacy-Preserving Federated Learning With Homomorphic Encryption: A Brief Survey,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 14, pp. 24569–24580, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3382875.
- [29] B. Abdallah, S. Khriji, R. Chéour, C. Lahoud, K. Moessner, and O. Kanoun, “Improving the Reliability of Long-Range Communication against Interference for Non-Line-of-Sight Conditions in Industrial Internet of Things Applications,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 2, 2024, doi: 10.3390/app14020868.
- [30] K. Kaur, A. Kaur, Y. Gulzar, V. Gandhi, M. S. Mir, and A. B. Soomro, “IoT CCTV Video Security Optimization Using Selective Encryption and Compression,” *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 16, no. 2, pp. 262–273, 2025, doi: 10.14569/IJACSA.2025.0160228.
- [31] N. Wang, X. Li, Z. Guan, and S. Yuan, “FedStream: A Federated Learning Framework on Heterogeneous Streaming Data for Next-Generation Traffic Analysis,” *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 3, pp. 2485–2496, 2024, doi: 10.1109/TNSE.2023.3292805.
- [32] A. A. Akhie and D. Joksimović, “Monitoring of a Productive Blue-Green Roof Using Low-Cost Sensors,” *Sensors*, vol. 23, no. 24, 2023, doi: 10.3390/s23249788.
- [33] S. Lu, J. Huo, J. Yang, and F. Cao, “A Routing Protocol Based on Multiobjective Mayfly Optimization Algorithm for Solar Energy Dynamical Supply of Field Observation Instrument Network,” *IEEE Sens. J.*, vol. 24, no. 7, pp. 11537–11552, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3361988.
- [34] K. G. Mkongwa, C. Zhang, and Q. Liu, “A Reliable Data Transmission Mechanism in Coexisting IEEE 802.15.4-Beacon Enabled Wireless Body Area Networks,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 128, no. 2, pp. 1019–1040, 2023, doi: 10.1007/s11277-022-09987-2.
- [35] R. Ramya and S. Ramamoorthy, “Lightweight Unified Collaborated Relinquish Edge Intelligent Gateway Architecture with Joint Optimization,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 90396–90409, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3307808.
- [36] S. Pal, G. Chowdary, W.-H. Ki, and C.-Y. Tsui, “Energy-Efficient Dual-Node-Upset-Recoverable 12T SRAM for Low-Power Aerospace Applications,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 20184–20195, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3161147.
- [37] Q. Hou, Z. Jiang, L. Yuan, M. M. Cheng, S. Yan, and J. Feng, “Vision Permutator: A Permutable MLP-Like Architecture for Visual Recognition,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 45, no. 1, pp. 1328–1334, 2023, doi: 10.1109/TPAMI.2022.3145427.
- [38] J. Nasir *et al.*, “A Novel Hybrid Approach to Forecasting Crude Oil Prices Using Local Mean Decomposition, ARIMA, and XGBoost,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 89140–89156, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3561193.
- [39] D. Frej, “Analysis of Vertical Vibrations of a Child Seat Using the ISOFIX System in the Context of Obtaining Electricity to Power a SMART Child Seat,” *Energies*, vol. 18, no. 16, 2025, doi: 10.3390/en18164332.
- [40] P. Candiotto de Oliveira *et al.*, “Fully Printed Thermogalvanic Modules for Low-Grade Energy Harvesting,” *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 8, no. 17, pp. 12868–12877, 2025, doi: 10.1021/acsaem.5c02080.

- [41] S. Sudha, E. D. K. Ruby, R. Rajesh, and K. Chinnappa, "An improved distance vector hop algorithm and A* algorithm with modified supernova optimizer for 3-dimensional localization in wireless sensor networks," *Wirel. Networks*, vol. 31, no. 3, pp. 2827–2846, 2025, doi: 10.1007/s11276-025-03907-5.
- [42] J. Goedhart, "Studentsourcing—Aggregating and reusing data from a practical cell biology course," *PLOS Comput. Biol.*, vol. 20, no. 2, 2024, doi: 10.1371/journal.pcbi.1011836.
- [43] X. Nie, D. Li, H. Cui, and M. Chen, "Harvesting Vibration Energy of a Longitudinally Vibrating Rod within a Width Frequency Band by Designing Variable Stiffness Equipment," *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, vol. 25, no. 12, 2025, doi: 10.1142/S0219455425501238.
- [44] J. Debadarshini, M. Tummala, S. Saha, O. Landsiedel, and M. C. Chan, "TimeCast: Real-Time Many-to-Many Data-Sharing in Low-Power Wireless Distributed Systems," *IEEE Syst. J.*, vol. 17, no. 4, pp. 5726–5737, 2023, doi: 10.1109/JSYST.2023.3292892.
- [45] 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.
- [46] M. T. Sarker, S. W. Jing, G. Ramasamy, S. P. Thiagarajah, and M. G. Sadeque, "Energy Recycling System for Harnessing Industrial Rotational Kinetic Energy," *Energy Eng. J. Assoc. Energy Eng.*, vol. 122, no. 7, pp. 2891–2909, 2025, doi: 10.32604/ee.2025.065331.
- [47] S. Hemelatha, K. S. F. Faizz Ahmad, V. R. A. O. Tavanam, R. V. V Krishna, U. Sathya, and N. M. Muthuvairavan Pillai, "BEACON SIGNAL AND SLEEP AND AWAKE STRATEGY IN MANET FOR POWER ENHANCEMENT," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 102, no. 21, pp. 7706–7716, 2024, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85210405759&partnerID=40&md5=499edd7254fb00836e483a03c28e9f84>
- [48] R. C. J. Juaçaba-Neto, P. Merindol, and F. Theoleyre, "Enabling privacy by anonymization in the collection of similar data in multi-domain IoT," *Comput. Commun.*, vol. 203, pp. 60–76, 2023, doi: 10.1016/j.comcom.2023.02.022.
- [49] D.-T. Tung, T. N. Nguyen, A.-T. Le, V.-D. Phan, and M. Vozňák, "Holographic Reconfigurable Intelligent Surface-Aided Downlink NOMA IoT Networks in Short-Packet Communication," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 65266–65277, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3397306.
- [50] Y. Olzhabay *et al.*, "Evaluation of Indoor Power Performance of Emerging Photovoltaic Technology for IoT Device Application," *Energies*, vol. 18, no. 5, 2025, doi: 10.3390/en18051118.
- [51] D. Castells-Rufas, S. Marco-Sola, J. C. Moure, Q. Aguado, and A. Espinosa, "FPGA Acceleration of Pre-Alignment Filters for Short Read Mapping With HLS," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 22079–22100, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3153032.
- [52] D. Galappaththige and C. Tellambura, "Sum Rate Maximization for RSMA-Assisted CF mMIMO Networks With SWIPT Users," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 13, no. 5, pp. 1300–1304, 2024, doi: 10.1109/LWC.2024.3368272.
- [53] A. Aleem and R. Thumma, "Optimizing Energy Efficiency in IoT-Enabled Wireless Sensor Networks Using an Integrated EEKA-K-means Approach," *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 441–453, 2025, doi: 10.22266/IJIES2025.0331.33.