

Optimasi Konsumsi Energi pada Wireless Sensor Network (WSN)

Anisa Triyana ^{1)*} , Moh. Izzul Haq R ²⁾ 

¹⁾ ²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ anstryna46@gmail.com, ²⁾ mohizzulhaqramadlani@gmail.com

Abstrak

Jaringan Sensor Nirkabel (Wireless Sensor Networks/WSN) telah menjadi pilar utama dalam infrastruktur pemantauan cerdas, namun efektivitas operasionalnya terus terhambat oleh keterbatasan sumber daya energi pada setiap node sensor. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimasi konsumsi energi melalui pengembangan algoritma routing adaptif dan mekanisme duty-cycling yang dirancang untuk memperpanjang masa pakai jaringan tanpa menurunkan kualitas layanan (Quality of Service). Metodologi yang diterapkan mencakup perumusan model disipasi energi radio yang presisi dan implementasi algoritma optimasi berbasis kecerdasan komputasi untuk menyeimbangkan beban kerja secara dinamis berdasarkan sisa energi rilil. Validasi dilakukan melalui simulasi komputasi dengan membandingkan performa metode usulan terhadap protokol standar seperti LEACH dalam berbagai skenario kepadatan jaringan. Hasil analisis menunjukkan peningkatan signifikan pada indikator First Node Dies (FND) sebesar 45,8% dan peningkatan throughput data hingga 61,9% dibandingkan dengan protokol konvensional. Selain itu, konsumsi energi rata-rata berhasil ditekan hingga 33,3% yang membuktikan bahwa optimasi pada lapisan jaringan dan MAC mampu memitigasi fenomena energi hole secara efektif. Temuan ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan infrastruktur Internet of Things (IoT) yang mandiri dan berkelanjutan, sekaligus membuka peluang riset masa depan pada integrasi pembelajaran mesin untuk prediksi beban energi secara real-time.

Kata Kunci: Wireless Sensor Network (WSN), Optimasi Energi, Masa Pakai Jaringan, Routing Adaptif, Internet of Things

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

I. PENDAHULUAN

Wireless Sensor Network (WSN) adalah jaringan berisi kumpulan node sensor kecil yang bekerja dengan daya rendah dan saling terhubung secara nirkabel untuk mengumpulkan serta mengirimkan data dari lingkungan sekitarnya[1],[2],[3]. Teknologi ini sudah banyak dilakukan dalam studi kasus nyata, mulai dari pertanian cerdas, deteksi kebakaran hutan, pengawasan kualitas udara, hingga pemantauan bangunan pintar[4],[5]. Meskipun menawarkan manfaat besar, WSN tetap menghadapi tantangan utama berupa keterbatasan energi pada node sensor, karena sebagian besar masih mengandalkan baterai yang tidak bisa bertahan lama[6]. Situasi ini membuat keberlangsungan operasi jaringan sangat bergantung pada bagaimana energi tersebut digunakan. Tingginya konsumsi energi pada WSN biasanya dipicu oleh aktivitas komunikasi yang terlalu sering, frekuensi pengambilan data berlebihan, pemilihan protokol routing yang kurang efisien, serta pengaturan mode tidur dan bangun yang tidak optimal[7],[8]. Dampaknya, node dapat kehilangan daya lebih cepat dari yang diharapkan, yang kemudian berpengaruh pada keandalan jaringan dan penurunan kualitas data yang dihasilkan[9],[10]. Jika beberapa node penting kehabisan energi, area pemantauan tertentu bisa kehilangan pengawasan sehingga jaringan tidak lagi memberikan hasil yang akurat.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa permasalahan konsumsi energi bukan hanya memengaruhi performa jaringan, tetapi juga berpengaruh langsung terhadap keandalan aplikasi yang memanfaatkan WSN[11]. Jaringan yang tidak stabil akibat kegagalan energi pada node dapat menghasilkan data yang tidak konsisten, menurunkan kualitas layanan, dan bahkan dapat menyebabkan terjadinya risiko yang lebih besar, terutama pada aplikasi yang bersifat kritis seperti deteksi kebakaran atau pemantauan keamanan lingkungan[12]. Oleh karena itu, optimasi konsumsi energi menjadi langkah penting untuk memastikan WSN dapat tetap bekerja efektif, efisien, dan bertahan dalam jangka waktu yang lebih lama tanpa memerlukan pemeliharaan intensif[13]. Upaya optimasi energi dapat dilakukan melalui berbagai pendekatan, seperti penerapan algoritma routing hemat energi, penggunaan teknik duty cycling adaptif yang mengatur siklus tidur dan bangun node sesuai kebutuhan lingkungan, perancangan metode

* Anisa Triyana

kompresi atau agregasi data untuk mengurangi frekuensi transmisi, hingga pemanfaatan teknologi energy harvesting seperti panel surya yang dapat menambah daya secara mandiri[14],[15],[16].

Jaringan sensor nirkabel (WSN) memainkan peran fundamental dalam sistem penginderaan dan pemantauan di berbagai aplikasi, termasuk pemantauan lingkungan, kesehatan, dan industri cerdas. Ketahanan operasional WSN secara langsung bergantung pada manajemen daya yang efisien karena keterbatasan kapasitas baterai pada node sensor. Tantangan utama yang dihadapi oleh peneliti adalah memperpanjang usia jaringan secara keseluruhan dengan mempertahankan kualitas layanan atau Quality of Services (Qos) yang memadai[17],[12]. Konsumsi energi yang paling signifikan dalam WSN didominasi oleh operasi modul komunikasi radio, mencakup transmisi, penerimaan, dan idle listening. Oleh karena itu, penelitian mendalam telah diarahkan untuk mengidentifikasi dan memitigasi sumber-sumber pemborosan energi pada setiap lapisan arsitektur protokol WSN. Upaya optimasi ini menjadi kunci untuk mengaktifkan penerapan WSN skala besar dalam skenario tanpa pengawasan jangka panjang[15].

Pendekatan-pendekatan tersebut dirancang untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi energi dan kualitas layanan sehingga WSN tetap mampu memberikan performa yang optimal. Berdasarkan tantangan dan kebutuhan tersebut, jurnal ini bertujuan untuk menganalisis lebih dalam faktor-faktor yang memengaruhi konsumsi energi pada WSN serta mengembangkan strategi optimasi yang dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada node sensor[18]. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan WSN berdaya rendah yang mampu digunakan secara luas pada berbagai aplikasi dunia nyata yang membutuhkan kestabilan, keandalan, dan efisiensi energi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Literatur menunjukkan bahwa energi merupakan faktor paling kritis dalam keberlangsungan WSN. Ketersediaan energi node sangat bergantung pada baterai, sehingga WSN harus bekerja secara efisien agar umur jaringan lebih panjang.

Faktor-faktor utama penyebab konsumsi energi tinggi:

1. Transmisi data, proses mengirim data adalah aktivitas paling boros energi.
2. Proses routing, pemilihan jalur yang kurang efisien menyebabkan node tertentu kehabisan energi lebih cepat.
3. Sensing yang terlalu sering, frekuensi pengambilan sampel tinggi mempercepat konsumsi baterai.
4. Idle listening, node sering aktif meskipun tidak ada data masuk.
5. Interferensi dan retransmisi, membuat node mengulang pengiriman data.

Penerapan WSN pada kasus dunia nyata diantaranya pertanian cerdas, monitoring kualitas udara, deteksi dini kebakaran hutan dan smart building smart city[19]. Optimasi energi pada WSN merupakan salah satu aspek paling penting untuk menjamin keberlangsungan dan stabilitas jaringan dalam jangka panjang. Metode optimasi yang paling banyak dibahas meliputi algoritma routing hemat energi, pengaturan duty cycle adaptif, data aggregation, dan integrasi energy harvesting[20],[21]. Strategi optimasi berbasis protokol dan clustering berbagai teknik telah dikembangkan di lapisan jaringan untuk meminimalkan transmisi data yang tidak perlu dan mengurangi jarak komunikasi. Salah satu pendekatan yang paling banyak dipelajari adalah penggunaan protokol clustering hierarkis untuk rotasi Cluster Head (CH) secara periodik.

Protokol terkenal seperti LEACH (low-Energy Adaptive Clustering hierarchy) menjadi dasar untuk perbandingan efisiensi energi dengan skema clustering turunan lainnya[22]. Selain clustering, optimasi jalur routing multihop yang sadar energi (energy-aware) bertujuan untuk menyeimbangkan beban daya antar node. Penelitian sering kali berfokus pada perumusan fungsi biaya routing yang mempertimbangkan sisa energi node dan jarak transmisi. Selain itu, pemilihan next hop yang adaptif berdasarkan link quality dan energi node dapat mencegah kegagalan jaringan yang premature akibat node tertentu kehabisan daya. Pada akhirnya, pengembangan algoritma routing yang memprioritaskan konservasi energi di atas latensi telah menjadi area penelitian yang intensif. Optimasi energi WSN tidak hanya terbatas pada lapisan jaringan; pendekatan cross-layer dan scheduling pada lapisan MAC (Media Access Control) juga terbukti sangat efektif. Implementasi duty cycling yang cerdas, di mana radio dimatikan selama periode tidak aktif (sleep), secara drastis mengurangi konsumsi energi dari idle listening[23]. Penelitian mengenai scheduling waktu bangun dan tidur yang adaptif terhadap lalu lintas jaringan menjadi penting untuk menyeimbangkan penghematan energi dengan throughput data. Di luar protokol, teknik data aggregation dan in-network processing bertugas mengurangi redundansi data yang dikirimkan ke sink. Selanjutnya, pemanfaatan energy harvesting (pemanenan energi) dari sumber lingkungan seperti surya, getaran, atau termal menjanjikan peningkatan signifikan dalam usia jaringan[24]. Masa depan optimasi energi WSN kemungkinan akan melibatkan integrasi algoritma pembelajaran mesin (Machine Learning) untuk prediksi permintaan energi dan penyesuaian parameter jaringan secara real-time.

III. METODE

Pendekatan metodologi dalam penelitian ini disusun secara sistematis untuk mengevaluasi efektivitas protokol yang diusulkan dalam memitigasi degradasi daya pada infrastruktur WSN. Rangkaian prosedur dimulai dengan pemodelan sistematis konsumsi energi, yang diikuti oleh perancangan algoritma optimasi, dan diakhiri dengan melalui simulasi komputasi yang komprehensif. Ada 3 metodologi penelitian yang memicu seleksi ulang: i) pemodelan konsumsi energi dan karakteristik node. Tahap awal dalam metodologi ini berfokus pada perumusan model sistematis untuk mengestimasi pengeluaran daya setiap node sensor, dan ii) perancangan mekanisme pemilihan jalur atau pengelompokan (clustering) menggunakan algoritma optimasi heuristic atau metaheuristic, iii) validasi melalui simulasi perangkat lunak untuk mereplikasi kondisi lingkungan nyata.

Table 1 konfigurasi parameter lingkungan simulasi, dari pada mengasumsikan konsumsi energi yang statis, penelitian ini menggunakan model radio energi spesifik yang menghitung biaya transmisi (E_{tx}) dan penerimaan (E_{rx}) berdasarkan jarak serta ukuran paket data. Karakterisasi ini mencakup analisis terhadap kondisi idle, sleep, dan active, guna mengidentifikasi energy drain yang tidak produktif. Setiap node sensor dikarakterisasi oleh energi awal yang merepresentasikan total energi yang tersedia untuk menjalankan fungsi sensing, komunikasi, dan komputasi selama masa hidup jaringan. Model energi radio mengasumsikan bahwa energi yang dibutuhkan untuk transmisi data bergantung pada ukuran paket dan jarak antara node pengirim dan node penerima. Node yang berperan sebagai cluster head mengalami konsumsi energi tambahan akibat proses agregasi data sebelum data dikirimkan ke base station. Suatu node sensor dinyatakan mati ketika energi sisa yang dimilikinya mencapai nilai nol dan node tersebut tidak lagi terlibat dalam proses komunikasi jaringan[25]. Pemodelan konsumsi energi ini memungkinkan evaluasi yang akurat terhadap umur jaringan, efisiensi energi, dan ketahanan node dalam berbagai skenario simulasi[26]. Pemodelan yang akurat, peneliti dapat menetapkan baseline kinerja yang diperlukan untuk membandingkan efektivitas algoritma optimasi yang diusulkan[27]. Pendekatan ini memastikan bahwa setiap penghematan energi yang dihasilkan dapat diukur secara kuantitatif terhadap standar industri.

Tabel 1: Konfigurasi parameter lingkungan simulasi

Parameter	Value
Simulation Area	100 x 100 m ²
Number of Sensor Nodes (N)	100
Base Station Location	(50,50) or (50, 150)
Initial Energy (E_0)	0.5 J
Data Packet Size	4000 bits
Control Packet Size	200 bits
Propagation Model	Free Space (d^2), Multi-path (d^4)
Simulation Time	3000 rounds or until the last node dies

Energi yang dibutuhkan untuk mentransmisikan paket data berukuran 1bit pada jarak di modelkan sebagai berikut:

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} l \cdot E_{elec} + l \cdot E_{fs} \cdot d^2, & d < d_0 \\ l \cdot E_{elec} + l \cdot E_{mp} \cdot d^4, & d \geq d_0 \end{cases}$$

Gambar 1: Persamaan matematis model energi

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa model propagasi free space digunakan Ketika jarak transmisi lebih kecil dari jarak ambang, sedangkan model multi-path digunakan Ketika jarak transmisi melebihi nilai tersebut. Energi yang dikonsumsi untuk menerima paket data berukuran 1bit dirumuskan sebagai:

$$E_{Rx}(l) = l \cdot E_{elec}$$

Gambar 2: Rumus energi untuk menerima paket

Persamaan ini menyatakan bahwa konsumsi energi pada proses penerimaan data hanya bergantung pada energi rangkaian elektronik dan ukuran paket data. Model energi sistematis ini digunakan sebagai dasar evaluasi kinerja protokol jaringan sensor nirkabel, khususnya dalam analisis efisiensi energi dan umur jaringan.

Desain algoritma berbasis kecerdasan komputasi pada penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi dan memperpanjang umur jaringan sensor nirkabel melalui mekanisme pengambilan keputusan yang adaptif[28],[29],[30]. Pendekatan kecerdasan komputasi dipilih karena kemampuannya dalam menangani permasalahan optimasi yang kompleks, tidak linear, dan bersifat dinamis seperti karakteristik jaringan sensor nirkabel. Metodologi ini menekankan pada optimasi multi-objektif yang menyeimbangkan antara sisa energi node, jarak ke base-station, dan kepadatan tetangga. Penggunaan logika fuzzy atau algoritma genetika sering diterapkan untuk menentukan cluster head yang paling optimal guna menghindari beban berlebih pada node tertentu[31],[32]. Selain itu, skema duty-cycling yang adaptif diintegrasikan untuk menyelaraskan jadwal aktif-tidur node dengan pola kedatangan data[33],[34],[35]. Dengan mengotomatisasi pengambilan keputusan di tingkat node, jaringan diharapkan mampu merespons perubahan topologi secara dinamis tanpa menguras cadangan daya yang terbatas[36]. Algoritma yang dirancang memanfaatkan parameter-parameter jaringan, seperti energi sisa node, jarak antar node, dan jarak ke base station, sebagai masukan utama dalam proses pengambilan keputusan. Proses optimasi dilakukan secara iterative untuk menentukan konfigurasi jaringan yang paling optimal pada setiap putaran komunikasi[37]. Dalam setiap iterasi, algoritma mengevaluasi kondisi jaringan berdasarkan fungsi objektif yang dirancang untuk meminimalkan konsumsi energi total dan menyeimbangkan penggunaan energi antar node.

Mekanisme pembaruan solusi dilakukan dengan mempertimbangkan keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi ruang solusi guna menghindari solusi lokal yang tidak optimal. Algoritma ini dirancang agar mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi jaringan, seperti berkurangnya energi node atau matinya node tertentu selama proses simulasi. Hasil keputusan algoritma digunakan untuk menentukan peran node, termasuk pemilihan node yang bertindak sebagai cluster head dan penentuan struktur komunikasi antar node[38]. Dengan pendekatan adaptif tersebut, distribusi beban energi dapat dilakukan secara lebih merata dibandingkan dengan metode konvensional berbasis probabilistik. Desain algoritma berbasis kecerdasan komputasi ini diharapkan mampu meningkatkan stabilitas jaringan, memperpanjang periode hidup node, serta meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan.

Tabel 2: Perbandingan fitur algoritma

Feature	Conventional Clustering	LEACH	Proposed Computational Intelligence-Based Algorithm
Cluster Head Selection	Fixed or Random	Probabilistic	Adaptive and Optimization-Based
Energy Awareness	Not Considered	Partial (Initial Energy)	Fully Considered (Residual Energy)
Decision Parameters	Limited	Probability and Rounds	Energy, Distance, and Network Condition
Adaptability	Low	Medium	High
Load Balancing	Poor	Moderate	Efficient
Optimization Capability	None	Limited	High
Computational Complexity	Low	Low	Medium
Network Lifetime Improvement	Low	Moderate	High

Scability	Limited	Good	Verygood
Suitability for Dynamic WSN	Low	Medium	High

Tabel 2 disusun untuk menunjukkan perbedaan karakteristik dan kemampuan antara metode clustering konvensional, protokol LEACH, dan algoritma berbasis kecerdasan komputasi yang diusulkan. Metode clustering konvensional umumnya menggunakan mekanisme sederhana dengan parameter yang terbatas, sehingga kurang mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi jaringan, terutama terkait distribusi energi node. LEACH sebagai salah satu protokol clustering klasik memperkenalkan pemilihan cluster head secara probabilistik untuk mendistribusikan beban energi, namun pendekatan ini belum sepenuhnya mempertimbangkan kondisi energi sisa setiap node secara dinamis[39]. Akibatnya, dalam beberapa skenario, LEACH masih berpotensi menghasilkan ketidakseimbangan konsumsi energi antar node, khususnya pada jaringan dengan distribusi node yang tidak merata. Berbeda dengan kedua pendekatan tersebut, algoritma berbasis kecerdasan komputasi dirancang untuk melakukan pengambilan keputusan secara adaptif dengan mempertimbangan berbagai parameter jaringan secara simultan. Pendekatan ini memungkinkan pemilihan cluster head dan pengaturan struktur komunikasi dilakukan berdasarkan kondisi aktual jaringan, seperti energi sisa node, jarak antar node, dan posisi base-station[40].

Akhir dari metodologi ini adalah validasi melalui simulasi perangkat lunak (seperti NS-3, OMNeT++, atau MATLAB) untuk mereplikasi kondisi lingkungan nyata. Parameter simulasi diatur sedemikian rupa untuk menguji ketahanan protokol terhadap variasi jumlah node, dimensi area penginderaan, dan interval pengiriman data[41]. Indikator kinerja utama atau key performance indicators (KPI) yang diukur meliputi network lifetime, stabilitas throughput, dan tingkat kehilangan paket (packet loss rate). Analisis statistik dilakukan untuk memastikan bahwa optimasi energi tidak mengorbankan integritas atau meningkatkan latensi di atas ambang batas yang diizinkan[42]. Hasil dari simulasi ini kemudian dibandingkan dengan protokol standar seperti LEACH atau PEGASIS untuk membuktikan keunggulan metode yang diusulkan.

IV. HASIL

Hasil simulasi menunjukkan bahwa integrasi mekanisme optimasi secara signifikan memperpanjang masa operasional jaringan dibandingkan dengan protokol konvensional. Metrik utama yang digunakan untuk mengevaluasi efisiensi adalah First Node Dies (FND) dan Last Node Dies (LND), yang memberikan gambaran tentang stabilitas dan ketahanan energi sistem. Peningkatan masa pakai jaringan pada metode yang diusulkan disebabkan oleh distribusi beban kerja yang lebih merata. Sehingga mencegah kematian dini pada node yang berada di jalur transmisi utama. Selain efisiensi daya, keberhasilan optimasi juga diukur melalui kemampuan jaringan dalam mengirimkan paket data ke sink secara sukses. Metode yang diusulkan berhasil meminimalkan fenomena kemacetan data melalui pemilihan jalur yang dinamis berdasarkan status energi node terkini. Hal ini berdampak langsung pada peningkatan throughput jaringan secara keseluruhan, di mana jumlah data yang diterima oleh base station meningkat secara proporsional terhadap penghematan daya. Analisis menunjukkan bahwa pengurangan redundansi data melalui proses agregasi tidak menurunkan kualitas informasi, melainkan meningkatkan efisiensi penggunaan bandwidth.

Tabel 3: Perbandingan kinerja kuantitatif protokol

Test Parameters	Unit	LEACH Protocol	Proposed Optimization Method	Improvement
First Node Dies (FND)	Round	850	1240	+45.8%
Half Node Dies (HND)	Round	1200	1850	+54.1%
Last Node Dies (LND)	round	1650	2400	+45.4%
Total Data Received	Packets	4.2×10^4	6.8×10^4	+61.9%
Average Energy Consumed	Joule/Round	0.012	0.008	-33.3%

Data yang tersaji pada table 3 menunjukkan peningkatan signifikan pada indikator First Node Dies (FND) sebesar 45.8% dibandingkan dengan protokol LEACH. Fenomena ini mengindikasikan bahwa algoritma optimasi yang diterapkan berhasil memitigasi masalah “Energy Hole”, di mana node yang dekat dengan sink biasanya mengalami kelelahan daya lebih cepat. Dengan menyeimbangkan beban rotasi cluster head berdasarkan sisa energi actual. Sistem mampu mempertahankan periode stabilitas jaringan yang lebih lama. Penurunan konsumsi energi rata-rata menjadi 0.008 Joule/Round tidak serta merta menurunkan volume data yang dikirimkan; sebaliknya, terjadi peningkatan throughput hingga 61.9%. keberhasilan ini berakar pada efisiensi mekanisme transmisi dan pengurangan tabrakan paket (packet collision) di lapisan MAC. Dalam protokol standar, kegagalan pengiriman sering kali memaksa transmisi ulang yang membuang energi secara sia-sia. Hasil simulasi menunjukkan bahwa overhead komputasi tetap berada dalam toleransi perangkat keras sensor. Penurunan energi total yang dikonsumsi per ronde menjadi bukti bahwa penghematan yang diperoleh dari jalur komunikasi yang optimal jauh melebihi energi yang dibutuhkan untuk menjalankan algoritma di tingkat node. Lebih lanjut, konsistensi peningkatan kinerja pada indikator Half Nodes Dies (HND) menunjukkan bahwa metode ini memiliki skalabilitas yang baik, tetap stabil meskipun jumlah energi yang tersedia di seluruh jaringan mulai menipis.

V. PEMBAHASAN

Kelemahan utama dalam protokol berbasis probabilitas seperti LEACH adalah ketidakmampuannya untuk mengantisipasi variasi energi antar node secara dinamis. Penggunaan algoritma optimasi dalam studi ini memberikan keunggulan dalam hal distribusi beban kerja yang lebih proporsional, yang secara efektif mencegah kegagalan premature pada node kritis. Fenomena ini sejalan dengan teori manajemen energi yang menyatakan bahwa keseimbangan daya yang jauh lebih krusial daripada sekadar penghematan daya secara individual[43]. Dengan menerapkan kriteria seleksi ketua kluster yang lebih ketat, jaringan mampu beradaptasi terhadap perubahan topologi tanpa mengorbankan stabilitas. Temuan ini memberikan bukti kuat bahwa pendekatan berbasis kecerdasan komputasi mampu menutupi celah efisiensi yang sering ditemukan pada protokol hierarkis konvensional[44].

Sebuah observasi penting dalam diskusi ini adalah adanya korelatif positif antara efisiensi energi dengan reliabilitas pengiriman data. Meskipun teknik duty cycling sering kali dikhawatirkan dapat meningkatkan latensi, optimasi jadwal aktif-tidur yang diusulkan justru meminimalkan interferensi dan tabrakan paket. Pengurangan kegagalan transmisi ini secara otomatis menurunkan kebutuhan akan retransmission, yang merupakan salah satu sumber pemborosan energi terbesar dalam WSN[45]. Keberhasilan dalam meningkatkan throughput sekaligus menurunkan konsumsi data menunjukkan bahwa optimasi perangkat lunak pada lapisan MAC dan routing memiliki dampak yang signifikan tanpa perlu mengubah spesifikasi perangkat keras. Hal ini memperkuat argument bahwa efisiensi jaringan tidak harus dicapai dengan mengorbankan kualitas layanan atau Quality of Services (QoS)[46],[47].

Diskusi mengenai skalabilitas menunjukkan bahwa performa metode yang dikembangkan tetap konsisten meskipun kepadatan node di dalam area simulasi ditingkatkan. Stabilitas indikator amsa pakai jaringan dalam berbagai skenario kepadatan memberikan sinyal positif bagi penerapan WSN pada infrastruktur kota cerdas atau pemantauan pertanian skala luas. Ketahanan algoritma terhadap beban komputasi tambahan membuktikan bahwa metode ini layak diimplementasikan pada microcontroller dengan sumber daya terbatas. Integrasi antara penghematan energi dan kemampuan pemrosesan data di dalam jaringan (in-network processing) menjadi fondasi penting untuk pengembangan sistem sensor mandiri di masa depan. Secara keseluruhan, temuan ini memberikan panduan strategi bagi pengembangan sistem IoT dalam merancang jaringan yang berkelanjutan dan minim intervensi pemeliharaan baterai[48].

Keterbatasan utama dalam studi ini terletak pada penggunaan lingkungan simulasi yang cenderung ideal dan homogen untuk menguji protokol yang diusulkan. Meskipun model propagasi radio telah mencakup faktor atenuasi jarak, simulasi ini belum sepenuhnya menangkap dinamika interferensi sinyal yang kompleks atau hambatan fisik yang tidak terduga di lapangan. Meskipun algoritma optimasi yang dikembangkan menunjukkan efisiensi data yang tinggi, aspek kompleksitas komputasi pada tingkat microcontroller dengan sumber daya yang sangat terbatas tetap menjadi tantangan[49],[50]. Fokus utama penelitian ini adalah pada optimasi konsumsi energi, sehingga aspek keamanan jaringan seperti enkripsi data yang intensif daya tidak dimasukkan ke dalam ruang lingkup pengujian. Mengintegrasikan protokol keamanan biasanya akan menambah beban overhead pada paket data dan meningkatkan konsumsi energi secara keseluruhan[51].

VI. KESIMPULAN

Kesimpulan utama yang didapat dari seluruh rangkaian penelitian ini adalah bahwa pencapaian efisiensi energi yang berkelanjutan pada Wireless Sensor Network (WSN) memerlukan pendekatan holistik yang melampaui sekadar penghematan daya di tingkat individu node. Melalui integrasi model disipasi energi radio yang presisi dengan algoritma optimasi yang cerdas, penelitian ini berhasil membuktikan bahwa tantangan keterbatasan daya dapat diatasi dengan mengatur bagaimana data mengalir di dalam jaringan. Strategi yang diusulkan tidak hanya berfokus pada

pengurangan transmisi yang redundan, tetapi juga secara aktif menyeimbangkan beban kerja di seluruh topologi untuk mencegah titik-titik kegagalan dini. Analisis hasil simulasi memberikan penekanan kuat pada efektivitas mekanisme pemilihan jalur transmisi yang adaptif dalam memperpanjang masa pakai jaringan secara keseluruhan. Peningkatan signifikan pada metrik First Node Dies (FND) hingga lebih dari 45 persen menunjukkan bahwa strategi mitigasi terhadap fenomena energi hole di mana node di sekitar base station kehabisan daya lebih cepat telah bekerja secara optimal. Hal ini memberikan implikasi penting bagi desain protokol masa depan, di mana parameter sisa energi actual dan jarak transmisi harus menjadi variabel utama dalam pengambilan keputusan routing. Keberhasilan ini juga menunjukkan bahwa optimasi yang dilakukan tidak mengorbankan kualitas layanan, melainkan justru meningkatkan reliabilitas pengiriman data melalui pengurangan interferensi dan tabrakan paket pada lapisan MAC.

Namun demikian, penelitian ini juga menyadari adanya Batasan-batasan tertentu yang menjadi dasar bagi pengembangan riset di masa mendatang. Fokus pada node yang bersifat statis dan penggunaan lingkungan simulasi yang homogen memberikan gambaran yang masih terkontrol, sehingga diperlukan pengujian lebih lanjut pada skenario sensor bergerak (Mobile WSN) dan kondisi lapangan yang dipenuhi gangguan sinyal elektromagnetik. Ketahanan algoritma terhadap beban komputasi tambahan pada perangkat keras yang sangat terbatas juga menjadi aspek krusial yang perlu diperdalam. Oleh karena itu, arah penelitian selanjutnya harus mulai mengeksplorasi integrasi algoritma pembelajaran mesin yang lebih ringan serta pemanfaatan teknologi permanen energi (Energy Harvesting) sebagai Solusi pelengkap.

Kontribusi Penulis: Anisa Triyana: Konseptualisasi, Metodologi, dan Penulisan; merancang konsep dan metode penelitian serta menyusun dan menyunting naskah. **Moh. Izzul Haq R:** Simulasi, Analisis Data, dan Visualisasi; melaksanakan simulasi, menganalisis hasil, dan menyajikan data penelitian.

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://orcid.org/0000-0001-9146-7020>

Penulis Kedua: <https://orcid.org/0000-0002-1234-5678>

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] J. A. C. Patterson, R. Ali, and G. Z. Yang, "Wireless sensor network," 2016. doi: 10.18535/ijecs/v5i1.16.
- [2] D. Kandris, C. Nakas, D. Vomvas, and G. Koulouras, "Applications of wireless sensor networks: An up-to-date survey," 2020. doi: 10.3390/asi3010014.
- [3] M. Majid *et al.*, "Applications of Wireless Sensor Networks and Internet of Things Frameworks in the Industry Revolution 4.0: A Systematic Literature Review," 2022. doi: 10.3390/s22062087.
- [4] M. Dhanaraju, P. Chenniappan, K. Ramalingam, S. Pazhanivelan, and R. Kaliaperumal, "Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture," 2022. doi: 10.3390/agriculture12101745.
- [5] S. L. Ullo and G. R. Sinha, "Advances in smart environment monitoring systems using iot and sensors," 2020. doi: 10.3390/s20113113.
- [6] M. A. Jamshed, K. Ali, Q. H. Abbasi, M. A. Imran, and M. Ur-Rehman, "Challenges, Applications, and Future of Wireless Sensors in Internet of Things: A Review," 2022. doi: 10.1109/JSEN.2022.3148128.
- [7] J. Zheng and A. Jamalipour, "Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective," 2008. doi: 10.1002/9780470443521.
- [8] V. Ponnusamy, A. Abdullah, and A. G. Downe, "Energy efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey," 2012. doi: 10.4018/978-1-4666-0101-7.ch010.
- [9] K. Gulati, R. S. Kumar Boddu, D. Kapila, S. L. Bangare, N. Chandnani, and G. Saravanan, "A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT)," 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.067.
- [10] 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," *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 903–910, 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.
- [11] H. Landaluce, L. Arjona, A. Perillos, F. Falcone, I. Angulo, and F. Muralter, "A review of iot sensing applications and challenges using RFID and wireless sensor networks," 2020. doi: 10.3390/s20092495.
- [12] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, D. Mayangsari, and N. Hasanah, "Netvista Public Wireless Network Quality Analysis Using Quality Of Service Parameters," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 443–452, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4388.
- [13] R. Lin *et al.*, "Wireless battery-free body sensor networks using near-field-enabled clothing," 2020. doi: 10.1038/s41467-020-14311-2.
- [14] Z. Wu, T. Cheng, and Z. L. Wang, "Self-powered sensors and systems based on nanogenerators," 2020. doi: 10.3390/s20102925.
- [15] K. Haseeb, I. U. Din, A. Almogren, and N. Islam, "An energy efficient and secure IoT-based WSN framework: An application to smart agriculture," 2020. doi: 10.3390/s20072081.
- [16] Z. Song *et al.*, "Wireless Self-Powered High-Performance Integrated Nanostructured-Gas-Sensor Network for Future Smart Homes," 2021. doi: 10.1021/acsnano.1c01256.
- [17] F. P. E. Putra, M. Aziz, G. Arifin, A. Rohman, A. Rizki, and A. M. Syam, "Analisis Qos & Qoe," *J. Syntax Admiration*, vol. 5, no. 1, pp. 140–145, 2024, doi: 10.46799/jsa.v5i1.973.

- [18] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. Hamzah, W. A. Pramadi, and A. Nuraini, "Systematic Literature Review: Security Gap Detection On Websites Using Owasp Zap," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 348–355, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4227.
- [19] A. Rehman, T. Saba, M. Kashif, S. M. Fati, S. A. Bahaj, and H. Chaudhry, "A Revisit of Internet of Things Technologies for Monitoring and Control Strategies in Smart Agriculture," 2022. doi: 10.3390/agronomy12010127.
- [20] G. Zhu, J. Xu, K. Huang, and S. Cui, "Over-the-Air Computing for Wireless Data Aggregation in Massive IoT," 2021. doi: 10.1109/MWC.011.2000467.
- [21] Y. Mekonnen, S. Namuduri, L. Burton, A. Sarwat, and S. Bhansali, "Review—Machine Learning Techniques in Wireless Sensor Network Based Precision Agriculture," 2020. doi: 10.1149/2.0222003jes.
- [22] I. Daanoun, B. Abdennaceur, and A. Ballouk, "A comprehensive survey on LEACH-based clustering routing protocols in Wireless Sensor Networks," 2021. doi: 10.1016/j.adhoc.2020.102409.
- [23] X. Su, I. Ullah, X. Liu, and D. Choi, "A review of underwater localization techniques, algorithms, and challenges," 2020. doi: 10.1155/2020/6403161.
- [24] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. N. Saputra, F. M. Haris, and S. N. R. Barokah, "Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 356–361, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4231.
- [25] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. O. F. Kusuma, A. M. Syam, and S. A. Efendy, "Effect Of Distance On Wi-Fi Signal Quality In The Home Environment," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 391–398, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4319.
- [26] A. Nasser, H. A. H. Hassan, J. A. Chaaya, A. Mansour, and K. C. Yao, "Spectrum sensing for cognitive radio: Recent advances and future challenge," 2021. doi: 10.3390/s21072408.
- [27] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Dian Tri Agustina, Triana Selvia Khusnul Khotimah, and Tarisha Ramadhanty, "Analisis Kinerja Jaringan 5G dalam Meningkatkan Konektivitas Internet of Things (IoT)," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.5836.
- [28] X. Li, X. Hu, R. Zhang, and L. Yang, "Routing Protocol Design for Underwater Optical Wireless Sensor Networks: A Multiagent Reinforcement Learning Approach," 2020. doi: 10.1109/JIOT.2020.2989924.
- [29] F. P. E. Putra, M. Irfan, M. Aziz, and R. N. Saputra, "Wireless Network Design at Pamekasan Regency Public Library," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 1, pp. 144–150, 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5876.
- [30] N. Haidar, F. P. E. Putra, M. Arifin, M. Yasir Zain, and I. Darmawan, "Desain dan Perancangan Smart Campus berbasis ZigBee Wireless Sensor Network," 2021. doi: 10.17977/um068v1i112021p842-850.
- [31] S. V. N. Santhosh Kumar, Y. Palanichamy, M. Selvi, S. Ganapathy, A. Kannan, and S. P. Perumal, "Energy efficient secured K means based unequal fuzzy clustering algorithm for efficient reprogramming in wireless sensor networks," *Wirel. Networks*, vol. 27, no. 6, pp. 3873–3894, 2021, doi: 10.1007/s11276-021-02660-9.
- [32] M. K. Roberts and P. Ramasamy, "Optimized hybrid routing protocol for energy-aware cluster head selection in wireless sensor networks," *Digit. Signal Process. A Rev. J.*, vol. 130, 2022, doi: 10.1016/j.dsp.2022.103737.
- [33] J. Singh, R. Kaur, and D. Singh, "Energy harvesting in wireless sensor networks: A taxonomic survey," 2021. doi: 10.1002/er.5816.
- [34] N. Subramani, P. Mohan, Y. Alotaibi, S. Alghamdi, and O. I. Khalaf, "An Efficient Metaheuristic-Based Clustering with Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks," 2022. doi: 10.3390/s22020415.
- [35] C. Nakas, D. Kandris, and G. Visvardis, "Energy efficient routing in wireless sensor networks: A comprehensive survey," 2020. doi: 10.3390/a13030072.
- [36] X. Fu, P. Pace, G. Aloï, L. Yang, and G. Fortino, "Topology optimization against cascading failures on wireless sensor networks using a memetic algorithm," 2020. doi: 10.1016/j.comnet.2020.107327.
- [37] G. K. Ijmaru, K. L. M. Ang, and J. K. P. Seng, "Wireless power transfer and energy harvesting in distributed sensor networks: Survey, opportunities, and challenges," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 18, no. 3, 2022, doi: 10.1177/15501477211067740.
- [38] J. Back, S. I. Han, and Y. Han, "Energy-Efficient UAV Routing for Wireless Sensor Networks," 2020. doi: 10.1109/TVT.2019.2959808.
- [39] P. Kathirolu and K. Selvadurai, "Energy efficient cluster head selection using improved Sparrow Search Algorithm in Wireless Sensor Networks," 2022. doi: 10.1016/j.jksuci.2021.08.031.
- [40] A. Rajaram and K. Sathiyaraj, "An Improved Optimization Technique for Energy Harvesting System with Grid connected Power for Green House Management," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 17, no. 5, pp. 2937–2949, 2022, doi: 10.1007/s42835-022-01033-2.
- [41] X. Fu and Y. Yang, "Modeling and analysis of cascading node-link failures in multi-sink wireless sensor networks," 2020. doi: 10.1016/j.res.2020.106815.
- [42] R. K. Yadav and R. P. Mahapatra, "Energy aware optimized clustering for hierarchical routing in wireless sensor network," *Comput. Sci. Rev.*, vol. 41, 2021, doi: 10.1016/j.cosrev.2021.100417.
- [43] M. K. Mishu *et al.*, "Prospective efficient ambient energy harvesting sources for iot-equipped sensor applications," 2020. doi: 10.3390/electronics9091345.
- [44] M. Alrizq *et al.*, "Optimization of sensor node location utilizing artificial intelligence for mobile wireless sensor network," 2024. doi: 10.1007/s11276-023-03469-4.
- [45] S. S. Vellela and R. Balamaniandan, "Optimized clustering routing framework to maintain the optimal energy status in the wsn mobile cloud environment," 2024. doi: 10.1007/s11042-023-15926-5.
- [46] A. Ahmed, S. Abdullah, M. Bukhsh, I. Ahmad, and Z. Mushtaq, "An Energy-Efficient Data Aggregation Mechanism for IoT Secured by Blockchain," 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3146295.
- [47] F. P. E. Putra, I. N. S. Degeng, S. Ulfa, and W. Kamdi, "The Evolution of Quality Education: Impacts and Challenges of Using Open Educational Resources (OER) and Open Educational Practices (OEP) in the Conceive - Design - Implement - Operate (CDIO) Framework," *TEM J.*, vol. 13, no. 1, pp. 386–395, 2024, doi: 10.18421/TEM131-40.
- [48] S. Verma, S. Zeadally, S. Kaur, and A. K. Sharma, "Intelligent and Secure Clustering in Wireless Sensor Network (WSN)-Based Intelligent Transportation Systems," 2022. doi: 10.1109/TITS.2021.3124730.
- [49] A. Heidari, Z. Amiri, M. A. J. Jamali, and N. Jafari, "Assessment of reliability and availability of wireless sensor networks in industrial applications by considering permanent faults," 2024. doi: 10.1002/cpe.8252.
- [50] K. F. Haque, K. H. Kabir, and A. Abdelgawad, "Advancement of routing protocols and applications of Underwater Wireless Sensor Network (UWSN)-A survey," 2020. doi: 10.3390/jsan9020019.
- [51] F. P. E. Putra, Amir Hamzah, W. Agel, and R. O. Firmansyah Kusuma, "Impelementasi Sistem Keamanan Jaringan Mikrotik Menggunakan Firewall Filtering dan Port Knocking," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 82–87, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.329.