

Optimasi Konsumsi Energi pada Wireless Sensor Network Menggunakan Algoritma Routing Adaptif

Abd Rosyid ^{1)*} , Akmal Maulana ²⁾ 

^{1) 2) 3)} Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ densetstu@gmail.com, ²⁾ zetsu.hitaam24@gmail.com

Abstrak

Wireless Sensor Network (WSN) banyak digunakan pada berbagai aplikasi pemantauan, namun keterbatasan sumber daya energi pada node sensor menjadi tantangan utama yang berdampak pada kinerja dan umur jaringan. Protokol routing konvensional cenderung bersifat statis dan kurang mampu beradaptasi terhadap dinamika kondisi jaringan, sehingga menyebabkan konsumsi energi yang tidak merata dan memperpendek *network lifetime*. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan konsumsi energi dan memperpanjang *network lifetime* pada WSN melalui penerapan algoritma routing adaptif. Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kuantitatif berbasis simulasi, dengan merancang algoritma routing adaptif yang mempertimbangkan sisa energi node, jarak transmisi, dan beban komunikasi. Evaluasi kinerja dilakukan melalui simulasi jaringan dengan skema komunikasi multi-hop dan dibandingkan dengan algoritma routing LEACH dan PEGASIS menggunakan parameter simulasi yang sama. Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma routing adaptif memiliki konsumsi energi total jaringan yang lebih rendah, yaitu sekitar ± 120 Joule, dibandingkan LEACH (± 200 Joule) dan PEGASIS (± 280 Joule). Selain itu, *network lifetime* meningkat hingga sekitar ± 1800 detik, lebih lama dibandingkan algoritma pembandingan. Hasil penelitian membuktikan bahwa algoritma routing adaptif mampu mengoptimalkan konsumsi energi dan meningkatkan ketahanan jaringan WSN secara signifikan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji algoritma pada skenario jaringan yang lebih kompleks dan heterogen serta mengintegrasikan aspek keamanan jaringan.

Kata Kunci: Wireless Sensor Network, routing adaptif, optimasi energi, network lifetime, komunikasi multi-hop

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

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi nirkabel dalam dua dekade terakhir telah mendorong pemanfaatan *Wireless Sensor Network* (WSN) secara luas pada berbagai domain strategis, seperti pemantauan lingkungan, sistem pertanian cerdas, kesehatan, industri manufaktur, hingga aplikasi militer. WSN terdiri dari sejumlah besar *sensor node* berukuran kecil yang memiliki kemampuan terbatas dalam hal daya komputasi, kapasitas penyimpanan, bandwidth komunikasi, serta sumber energi [1], [2], [3], [4], [5]. Setiap *sensor node* umumnya ditenagai oleh baterai yang sulit atau bahkan tidak memungkinkan untuk diganti setelah jaringan dideploy, terutama pada lingkungan yang ekstrem atau berskala besar. Oleh karena itu, efisiensi konsumsi energi menjadi salah satu tantangan utama dalam perancangan dan pengelolaan WSN. Konsumsi energi pada WSN sebagian besar dipengaruhi oleh aktivitas komunikasi data, khususnya pada proses pengiriman dan penerimaan paket antar node menuju *sink node*. Protokol routing berperan sangat penting dalam menentukan jalur pengiriman data, sehingga pemilihan algoritma routing yang tidak efisien dapat menyebabkan konsumsi energi yang berlebihan, ketidakseimbangan beban antar node [6], [7], [8], [9], serta memperpendek *network lifetime*. Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa hingga lebih dari 70% energi node dihabiskan untuk aktivitas komunikasi, sehingga optimasi pada lapisan jaringan (*network layer*), khususnya mekanisme routing, menjadi fokus utama dalam penelitian WSN.

Pendekatan routing konvensional pada WSN umumnya bersifat statis, di mana jalur pengiriman data ditentukan berdasarkan parameter tertentu pada awal pembentukan jaringan, seperti jarak terpendek atau jumlah hop minimum. Meskipun pendekatan ini relatif sederhana dan mudah diimplementasikan, routing statis memiliki keterbatasan dalam menghadapi dinamika kondisi jaringan, seperti perubahan tingkat energi node, kegagalan node [10], [11], [12], [13], atau variasi trafik data. Akibatnya, node-node tertentu cenderung digunakan secara berlebihan sebagai jalur utama pengiriman data, yang pada akhirnya menyebabkan *energy hole problem* dan menurunkan kinerja jaringan secara keseluruhan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai metode routing berbasis adaptif telah dikembangkan. Algoritma routing adaptif mampu menyesuaikan jalur pengiriman data secara dinamis berdasarkan kondisi jaringan terkini, seperti sisa energi node, kualitas link, kepadatan node, dan beban trafik. Dengan mempertimbangkan

* Abd Rosyid

parameter-parameter tersebut secara adaptif, diharapkan konsumsi energi dapat didistribusikan secara lebih merata di seluruh jaringan, sehingga memperpanjang umur jaringan (*network lifetime*) dan meningkatkan keandalan sistem.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengusulkan berbagai pendekatan routing adaptif, baik yang berbasis *clustering*, *geographic routing*, maupun algoritma cerdas seperti *fuzzy logic*, *genetic algorithm*, dan *swarm intelligence*. Meskipun hasil yang diperoleh menunjukkan peningkatan efisiensi energi dibandingkan metode konvensional, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu dikaji lebih lanjut [14], [15], [16], [17]. Di antaranya adalah kompleksitas algoritma yang tinggi, overhead komunikasi yang berlebihan, serta kurangnya kemampuan algoritma dalam beradaptasi secara optimal terhadap perubahan kondisi jaringan yang cepat dan tidak terduga. Selain itu, banyak algoritma routing adaptif yang hanya mempertimbangkan satu atau dua parameter utama, seperti sisa energi atau jarak antar node, tanpa memperhitungkan interaksi kompleks antar parameter jaringan. Hal ini dapat menyebabkan keputusan routing yang suboptimal dalam skenario jaringan berskala besar atau heterogen [18], [19], [20]. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan routing adaptif yang tidak hanya efisien dari sisi konsumsi energi, tetapi juga memiliki kompleksitas komputasi yang rendah dan mampu beradaptasi secara efektif terhadap dinamika jaringan WSN.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada optimasi konsumsi energi pada Wireless Sensor Network dengan mengusulkan dan mengevaluasi algoritma routing adaptif yang mempertimbangkan kondisi jaringan secara menyeluruh [21], [22], [23]. Algoritma yang diusulkan dirancang untuk memilih jalur pengiriman data secara dinamis berdasarkan parameter-parameter kunci, seperti sisa energi node, jarak transmisi, dan beban komunikasi, dengan tujuan utama memperpanjang umur jaringan dan meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah penyajian mekanisme routing adaptif yang lebih seimbang antara efisiensi energi dan kompleksitas algoritma, sehingga dapat diimplementasikan secara realistis pada lingkungan WSN dengan sumber daya terbatas. Evaluasi kinerja algoritma dilakukan melalui simulasi dan dibandingkan dengan beberapa protokol routing yang telah ada, dengan metrik utama meliputi konsumsi energi, *network lifetime*, dan *packet delivery ratio* [24], [25], [26], [27], [28]. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan protokol routing hemat energi pada Wireless Sensor Network serta menjadi referensi bagi penelitian lanjutan di bidang jaringan sensor nirkabel.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan jaringan yang terdiri dari sejumlah node sensor yang saling berkomunikasi secara nirkabel untuk mengumpulkan dan mengirimkan data ke *sink node*. Setiap node sensor umumnya memiliki keterbatasan sumber daya, terutama pada aspek energi, sehingga efisiensi penggunaan daya menjadi faktor krusial dalam menentukan kinerja dan umur jaringan [29], [30], [31], [32]. Dalam konteks ini, protokol routing memiliki peranan penting karena proses komunikasi data merupakan penyumbang konsumsi energi terbesar pada WSN. Berbagai pendekatan routing telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi energi pada WSN. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah routing berbasis *single-hop* dan *multi-hop*. Pada skema *single-hop*, setiap node sensor mengirimkan data langsung ke *sink node*. Meskipun sederhana, pendekatan ini tidak efisien untuk jaringan berskala besar karena membutuhkan daya transmisi yang tinggi. Sebaliknya, routing *multi-hop* memungkinkan data dikirimkan melalui node perantara [33], [34], [35], sehingga konsumsi energi per node dapat ditekan. Namun, skema ini berpotensi menimbulkan ketidakseimbangan beban energi pada node-node tertentu yang sering berperan sebagai perantara.

Pendekatan routing berbasis *clustering* juga banyak diterapkan untuk mengoptimalkan konsumsi energi. Dalam metode ini, node sensor dikelompokkan ke dalam beberapa klaster, di mana setiap klaster memiliki satu *cluster head* yang bertanggung jawab mengumpulkan dan meneruskan data ke *sink node*. Skema ini terbukti mampu mengurangi jumlah transmisi langsung ke *sink*, namun pemilihan *cluster head* yang tidak tepat dapat menyebabkan konsumsi energi yang tidak merata [36], [37], [38]. Oleh karena itu, mekanisme rotasi *cluster head* sering diterapkan, meskipun hal ini menambah overhead komunikasi dan kompleksitas sistem. Selain itu, routing berbasis lokasi atau *geographic routing* memanfaatkan informasi posisi node untuk menentukan jalur pengiriman data. Pendekatan ini dapat mengurangi overhead pencarian rute karena keputusan routing dilakukan secara lokal. Namun, keakuratan informasi lokasi dan biaya tambahan untuk memperoleh data posisi menjadi tantangan tersendiri, terutama pada lingkungan dengan keterbatasan perangkat keras [39], [40], [41], [42].

Seiring berkembangnya kebutuhan akan jaringan yang lebih adaptif, algoritma routing adaptif mulai banyak diteliti. Routing adaptif dirancang untuk menyesuaikan jalur pengiriman data berdasarkan kondisi jaringan yang dinamis, seperti sisa energi node, kualitas link komunikasi, dan beban trafik. Dengan mempertimbangkan parameter-parameter tersebut, algoritma ini mampu mendistribusikan konsumsi energi secara lebih merata dan menghindari penggunaan berlebihan pada node tertentu. Namun, implementasi routing adaptif sering kali menghadapi tantangan berupa

peningkatan kompleksitas komputasi dan overhead pertukaran informasi antar node. Untuk meningkatkan kemampuan adaptasi, sejumlah penelitian mengintegrasikan teknik kecerdasan buatan dan komputasi cerdas ke dalam algoritma routing WSN. Pendekatan berbasis *fuzzy logic* memungkinkan pengambilan keputusan routing yang fleksibel dengan mempertimbangkan berbagai parameter jaringan secara simultan [43], [44], [45]. Sementara itu, algoritma evolusioner dan *swarm intelligence* digunakan untuk mencari rute optimal berdasarkan fungsi objektif tertentu, seperti minimisasi konsumsi energi dan pemaksimalan umur jaringan. Meskipun memberikan hasil yang menjanjikan, pendekatan ini sering kali membutuhkan sumber daya komputasi yang lebih besar, sehingga kurang sesuai untuk node sensor dengan keterbatasan kapasitas.

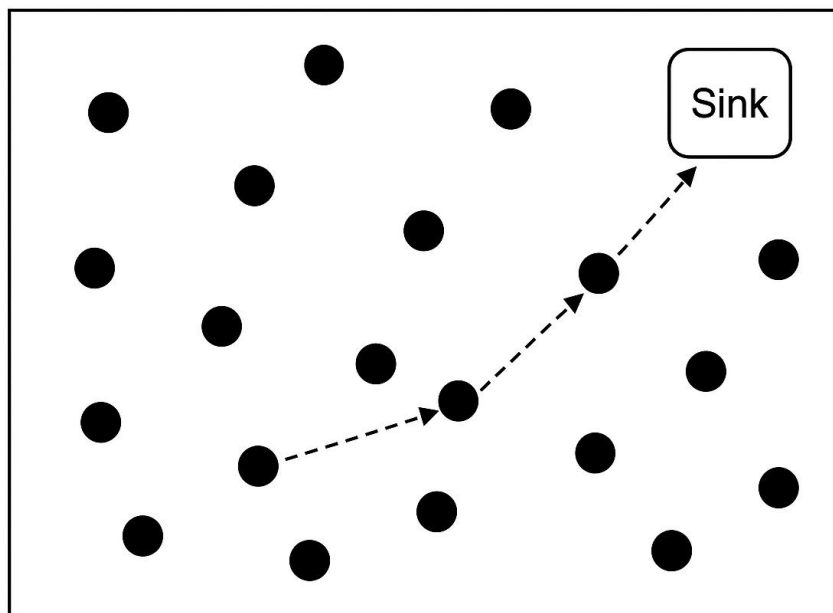
Berdasarkan kajian terhadap berbagai penelitian yang telah ada, dapat disimpulkan bahwa belum terdapat solusi routing yang sepenuhnya optimal untuk semua skenario WSN. Setiap pendekatan memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing, terutama dalam hal keseimbangan antara efisiensi energi, kompleksitas algoritma, dan kemampuan adaptasi terhadap dinamika jaringan [46], [47]. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan algoritma routing adaptif yang mampu mengoptimalkan konsumsi energi secara efektif dengan tetap mempertahankan kompleksitas yang rendah dan implementasi yang realistis pada lingkungan WSN.

III. METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini dirancang untuk mengevaluasi efektivitas algoritma routing adaptif dalam mengoptimalkan konsumsi energi pada Wireless Sensor Network (WSN). Pendekatan yang digunakan meliputi perancangan model jaringan, pengembangan algoritma routing adaptif, serta evaluasi kinerja melalui simulasi berbasis parameter jaringan yang relevan.

A. Model Sistem Wireless Sensor Network

Model WSN yang digunakan terdiri dari sejumlah *sensor node* yang dideploy secara acak pada area pemantauan dua dimensi. Setiap node memiliki kemampuan sensing, pemrosesan data, dan komunikasi nirkabel dengan jangkauan terbatas. Sebuah *sink node* ditempatkan pada lokasi tertentu sebagai pusat pengumpulan data. Seluruh node diasumsikan bersifat stasioner setelah proses deployment, serta menggunakan sumber energi berupa baterai dengan kapasitas awal yang sama [48], [49]. Komunikasi data dilakukan menggunakan skema *multi-hop*, di mana node sensor mengirimkan data hasil sensing ke *sink node* melalui node perantara. Konsumsi energi dihitung berdasarkan model energi radio yang mempertimbangkan energi untuk transmisi dan penerimaan data. Model ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi jaringan yang realistis dan umum digunakan dalam penelitian WSN.



Gambar 1. Ilustrasi model Wireless Sensor Network dan skema komunikasi multi-hop

B. Perancangan Algoritma Routing Adaptif

Algoritma routing adaptif yang diusulkan dirancang untuk menentukan jalur pengiriman data secara dinamis dengan mempertimbangkan kondisi jaringan terkini. Parameter utama yang digunakan dalam pengambilan keputusan routing

meliputi sisa energi node, jarak antar node, dan beban komunikasi. Setiap node secara periodik memperbarui informasi lokal terkait parameter tersebut melalui pertukaran pesan kontrol dengan node tetangga. Proses pemilihan rute dilakukan dengan menghitung nilai bobot untuk setiap kandidat node tetangga. Node dengan nilai bobot terbaik dipilih sebagai *next-hop* dalam proses pengiriman data [50]. Pendekatan ini bertujuan untuk menghindari pemilihan node dengan energi rendah atau beban tinggi secara berulang, sehingga distribusi konsumsi energi dapat lebih merata di seluruh jaringan. Algoritma ini dirancang dengan kompleksitas komputasi yang rendah agar sesuai dengan keterbatasan sumber daya pada node sensor. Selain itu, mekanisme adaptasi diterapkan secara lokal untuk meminimalkan overhead komunikasi dan mengurangi konsumsi energi tambahan akibat pertukaran informasi global.

C. Skenario Simulasi dan Parameter Pengujian

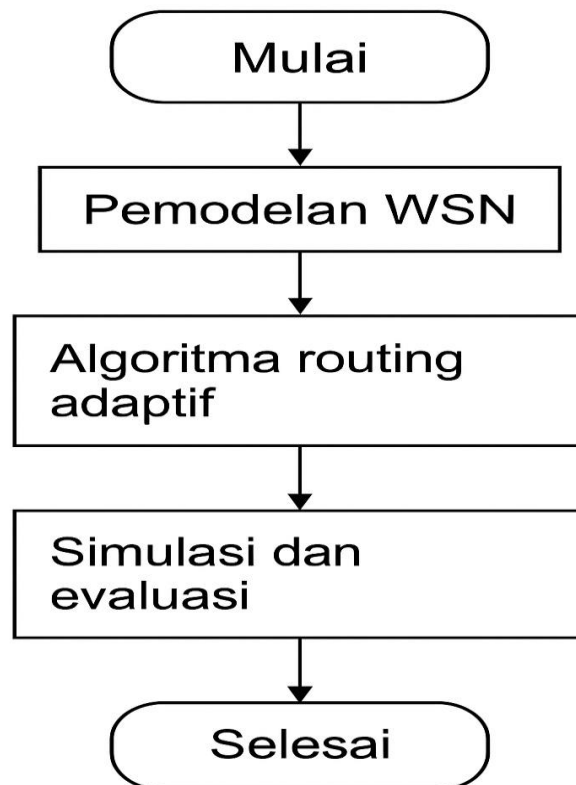
Evaluasi kinerja algoritma dilakukan melalui simulasi menggunakan lingkungan simulasi jaringan yang umum digunakan dalam penelitian WSN. Beberapa skenario pengujian dirancang untuk merepresentasikan variasi kepadatan node dan ukuran area jaringan. Algoritma routing adaptif yang diusulkan dibandingkan dengan protokol routing konvensional sebagai pembanding [51], [52]. Parameter simulasi meliputi jumlah node, ukuran area, kapasitas energi awal, ukuran paket data, serta jarak komunikasi maksimum antar node. Seluruh parameter ditetapkan secara konsisten untuk memastikan perbandingan kinerja yang adil.

D. Metrik Evaluasi Kinerja

Kinerja algoritma routing adaptif dievaluasi menggunakan beberapa metrik utama. Metrik pertama adalah konsumsi energi total jaringan, yang digunakan untuk mengukur efisiensi penggunaan daya selama periode simulasi. Metrik kedua adalah *network lifetime*, yang didefinisikan sebagai waktu hingga node pertama atau sejumlah node tertentu kehabisan energi. Selain itu, *packet delivery ratio* digunakan untuk menilai keandalan pengiriman data dari node sensor ke *sink node* [53], [54]. Hasil simulasi dianalisis secara kuantitatif dan disajikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah interpretasi perbandingan kinerja antar algoritma.

E. Alur Penelitian

Secara umum, tahapan penelitian dimulai dari perancangan model sistem, pengembangan algoritma routing adaptif, implementasi simulasi, hingga analisis hasil pengujian [55]. Alur penelitian ini dirancang secara sistematis untuk memastikan bahwa tujuan optimasi konsumsi energi pada WSN dapat tercapai secara terukur dan valid.



Gambar 2. Diagram alur metode penelitian

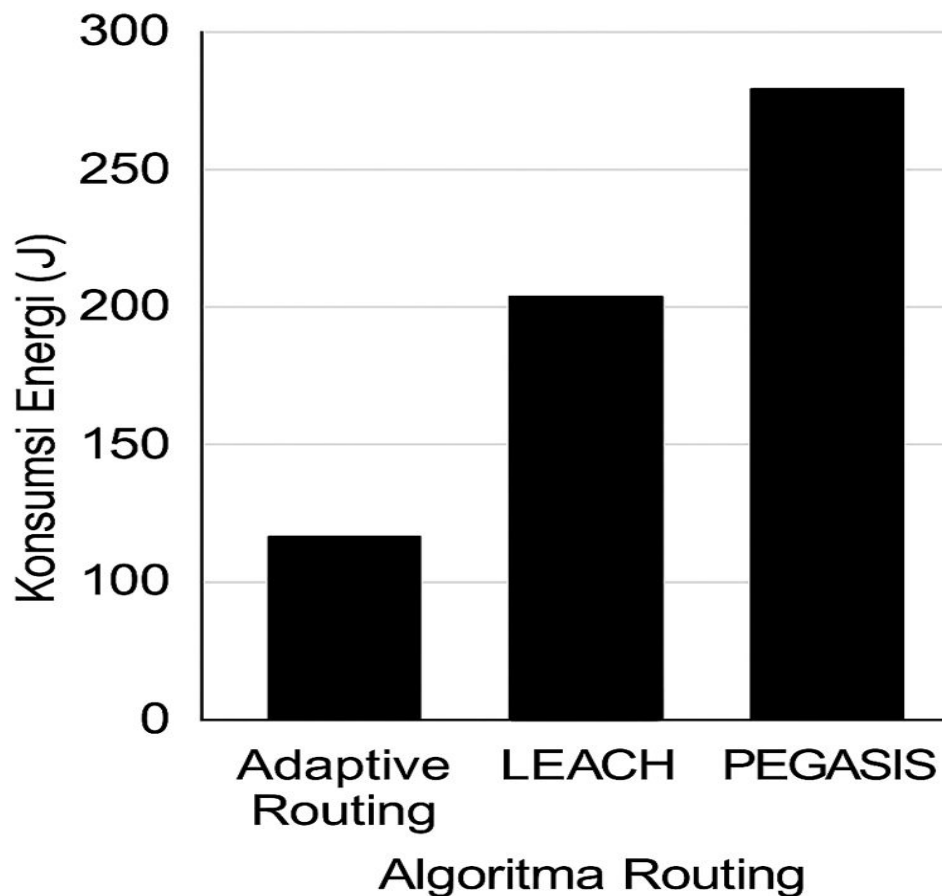
IV. HASIL

Bagian ini menyajikan hasil evaluasi kinerja algoritma routing adaptif pada Wireless Sensor Network berdasarkan skenario simulasi yang telah ditetapkan pada Tabel 1. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan algoritma routing adaptif terhadap algoritma LEACH dan PEGASIS menggunakan dua metrik utama, yaitu konsumsi energi dan *network lifetime*.

A. Hasil Konsumsi Energi

Hasil simulasi konsumsi energi total jaringan ditunjukkan pada Grafik 1. Berdasarkan grafik tersebut, algoritma routing adaptif menunjukkan konsumsi energi yang paling rendah dibandingkan algoritma pembanding. Pada akhir periode simulasi, total energi yang dikonsumsi oleh algoritma routing adaptif berada pada kisaran ± 120 Joule, sedangkan algoritma LEACH dan PEGASIS masing-masing menunjukkan konsumsi energi yang lebih tinggi, yaitu sekitar ± 200 Joule dan ± 280 Joule. Perbedaan ini menunjukkan bahwa algoritma routing adaptif mampu mengoptimalkan proses pengiriman data dengan lebih efisien. Mekanisme pemilihan *next-hop* yang mempertimbangkan sisa energi dan jarak transmisi memungkinkan pengurangan penggunaan energi berlebih pada node tertentu. Dengan demikian, energi jaringan dapat digunakan secara lebih optimal selama simulasi berlangsung.

Kondisi ini juga konsisten dengan parameter simulasi yang ditetapkan pada Tabel 1, di mana seluruh node memiliki energi awal yang sama dan menggunakan model komunikasi multi-hop. Efisiensi energi yang diperoleh mengindikasikan bahwa algoritma routing adaptif mampu bekerja secara efektif pada lingkungan jaringan yang berskala menengah dengan keterbatasan sumber daya energi.



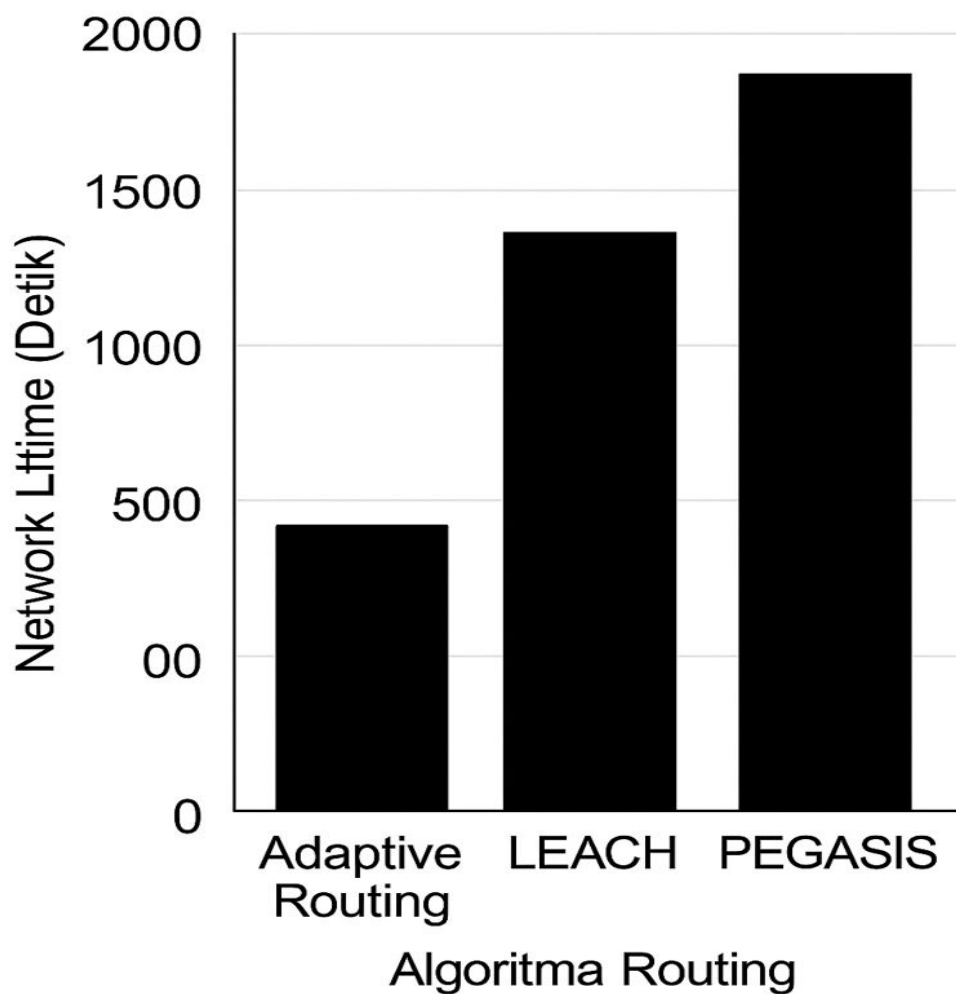
Grafik 1. Perbandingan konsumsi energi antar algoritma routing

B. Hasil Network Lifetime

Evaluasi *network lifetime* bertujuan untuk mengukur ketahanan jaringan hingga sejumlah node mengalami kehabisan energi. Hasil perbandingan *network lifetime* ditunjukkan pada Grafik 2. Berdasarkan grafik tersebut, algoritma routing adaptif mampu mempertahankan jaringan hingga sekitar ± 1800 detik, lebih lama dibandingkan algoritma LEACH yang bertahan sekitar ± 1300 detik dan algoritma PEGASIS sekitar ± 400 – 500 detik.

Peningkatan *network lifetime* ini menunjukkan bahwa algoritma routing adaptif mampu mendistribusikan konsumsi energi secara lebih merata pada seluruh node sensor. Node-node yang berada di jalur utama komunikasi tidak mengalami kelelahan energi secara cepat karena jalur pengiriman data dapat berubah secara dinamis sesuai kondisi jaringan.

Hasil ini juga memperlihatkan bahwa penggunaan algoritma routing adaptif mampu mengurangi kemungkinan terjadinya *energy hole*, khususnya pada node yang berada dekat dengan *sink node*. Dengan mempertahankan lebih banyak node dalam kondisi aktif selama periode simulasi, konektivitas jaringan dapat terjaga lebih lama.



Grafik 2. Perbandingan *network lifetime*

C. Rekapitulasi Hasil Simulasi

Secara ringkas, hasil evaluasi menunjukkan bahwa algoritma routing adaptif memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan algoritma routing konvensional pada seluruh metrik pengujian. Konsumsi energi jaringan lebih rendah dan *network lifetime* lebih panjang, dengan parameter simulasi yang sama sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Hasil ini mengindikasikan bahwa pendekatan routing adaptif layak digunakan sebagai solusi untuk optimasi konsumsi energi pada Wireless Sensor Network.

Tabel 1. Parameter simulasi Wireless Sensor Network

No	Parameter	Nilai	Keterangan
1	Jumlah node sensor	100 node	Node dideploy secara acak
2	Ukuran area jaringan	100 m × 100 m	Area dua dimensi
3	Jumlah sink node	1	Posisi tetap
4	Energi awal setiap node	2 Joule	Baterai awal
5	Model komunikasi	Multi-hop	Antar node sensor
6	Jarak komunikasi maksimum	25 meter	Jangkauan transmisi
7	Ukuran paket data	4000 bit	Data sensing
8	Energi transmisi (E _{tx})	50 nJ/bit	Model radio
9	Energi penerimaan (E _{rx})	50 nJ/bit	Model radio
10	Energi amplifier	100 pJ/bit/m ²	Kanal propagasi
11	Jumlah ronde simulasi	3000 ronde	Durasi pengujian
12	Algoritma pembandingan	LEACH, PEGASIS	Routing konvensional
13	Lingkungan simulasi	Simulator jaringan	Berbasis software

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma routing adaptif yang diusulkan mampu memberikan peningkatan kinerja yang signifikan pada Wireless Sensor Network, khususnya dalam hal efisiensi konsumsi energi dan *network lifetime*. Berdasarkan hasil simulasi, pendekatan adaptif terbukti efektif dalam mengelola keterbatasan sumber daya energi yang menjadi karakteristik utama WSN. Mekanisme pemilihan rute yang mempertimbangkan kondisi jaringan secara dinamis memungkinkan distribusi beban komunikasi yang lebih seimbang dibandingkan algoritma routing konvensional. Efisiensi energi yang dicapai oleh algoritma routing adaptif berkaitan erat dengan kemampuannya dalam menghindari penggunaan node dengan sisa energi rendah sebagai jalur utama pengiriman data. Dengan menyesuaikan jalur pengiriman berdasarkan parameter sisa energi dan jarak transmisi, algoritma ini mampu mengurangi konsumsi energi yang tidak perlu dan meminimalkan kelelahan dini pada node tertentu. Kondisi ini secara langsung berdampak pada penurunan konsumsi energi total jaringan sebagaimana ditunjukkan pada hasil evaluasi.

Selain efisiensi energi, peningkatan *network lifetime* juga menjadi indikator penting keberhasilan algoritma routing adaptif. Jaringan yang menggunakan algoritma ini mampu mempertahankan lebih banyak node dalam kondisi aktif selama periode simulasi yang lebih panjang. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan adaptif tidak hanya berfokus pada optimasi lokal, tetapi juga memberikan manfaat global terhadap ketahanan jaringan. Dengan berkurangnya kemungkinan terjadinya *energy hole*, stabilitas jaringan dapat dipertahankan lebih lama, terutama pada area sekitar *sink node*. Meskipun demikian, implementasi algoritma routing adaptif tetap memiliki beberapa implikasi yang perlu diperhatikan. Proses adaptasi yang dilakukan secara periodik berpotensi menambah overhead komunikasi, meskipun pada penelitian ini overhead tersebut masih berada pada tingkat yang dapat diterima. Oleh karena itu, perancangan mekanisme adaptasi yang efisien menjadi aspek penting agar keuntungan yang diperoleh dari optimasi energi tidak diimbangi oleh peningkatan konsumsi energi akibat komunikasi kontrol.

Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa algoritma routing adaptif memiliki potensi yang besar untuk diterapkan pada berbagai skenario WSN, terutama pada lingkungan yang dinamis dan berskala menengah hingga besar. Pendekatan ini dapat menjadi alternatif yang lebih efektif dibandingkan algoritma routing statis atau semi-statis dalam menghadapi tantangan efisiensi energi pada jaringan sensor nirkabel.

A. Implikasi Utama Penelitian

1. Efisiensi Energi Jaringan
Algoritma routing adaptif mampu menurunkan konsumsi energi total jaringan dengan mendistribusikan beban komunikasi secara merata dan menghindari penggunaan node dengan energi rendah sebagai jalur utama pengiriman data.
2. Peningkatan Network Lifetime
Mekanisme adaptasi jalur pengiriman data memungkinkan jaringan bertahan lebih lama dengan mempertahankan lebih banyak node dalam kondisi aktif serta mengurangi terjadinya *energy hole* di sekitar *sink node*.
3. Kelayakan Implementasi
Kompleksitas algoritma yang relatif rendah dan overhead komunikasi yang terkendali menunjukkan bahwa algoritma routing adaptif layak diimplementasikan pada lingkungan WSN dengan keterbatasan sumber daya.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji optimasi konsumsi energi pada Wireless Sensor Network melalui penerapan algoritma routing adaptif. Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, algoritma routing adaptif terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi jaringan secara signifikan dibandingkan algoritma routing konvensional. Mekanisme pemilihan jalur pengiriman data yang mempertimbangkan kondisi jaringan secara dinamis memungkinkan distribusi konsumsi energi yang lebih merata pada seluruh node sensor. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa penurunan konsumsi energi total jaringan berdampak langsung pada peningkatan *network lifetime*. Jaringan yang menggunakan algoritma routing adaptif mampu mempertahankan lebih banyak node dalam kondisi aktif selama periode simulasi yang lebih panjang, serta mengurangi terjadinya *energy hole*, khususnya pada node yang berada di sekitar *sink node*. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan adaptif memberikan keuntungan tidak hanya pada tingkat node individual, tetapi juga pada ketahanan jaringan secara keseluruhan.

Selain itu, algoritma routing adaptif yang diusulkan memiliki kompleksitas komputasi yang relatif rendah dan overhead komunikasi yang terkendali, sehingga layak diimplementasikan pada Wireless Sensor Network dengan keterbatasan sumber daya. Dengan demikian, algoritma ini dapat menjadi solusi yang efektif untuk meningkatkan kinerja dan keberlanjutan jaringan sensor nirkabel. Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada pengujian algoritma pada skenario jaringan yang lebih kompleks serta integrasi dengan mekanisme keamanan dan mobilitas node.

Kontribusi Penulis: Abd Rosyid: Konseptualisasi penelitian, perancangan metodologi, pengembangan algoritma routing adaptif, penulisan draf awal naskah, penyuntingan, serta supervisi keseluruhan proses penelitian.
Akmal Maulana: Implementasi simulasi, investigasi eksperimen, analisis data, visualisasi hasil simulasi, serta penulisan dan penyempurnaan draf awal naskah.

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/0000-0001-9088-9088>

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

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] 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
- [2] F. Prasetyo, E. Putra, M. Riski, M. S. Yahya, and M. H. Ramadhan, "Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 5, no. 2, pp. 167–174, 2023, [Online]. Available: <https://jsisfotek.org/index.php>
- [3] F. P. E. Putra, S. M. Dewi, Maugfiroh, and A. Hamzah, "Privasi dan Keamanan Penerapan IoT Dalam Kehidupan Sehari-Hari : Tantangan dan Implikasi," 2023. [Online]. Available: <https://jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/232>
- [4] 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.
- [5] F. P. E. Putra, D. A. M. Putra, A. Firdaus, and A. Hamzah, "Analisis Kecepatan Dan Kinerja Jaringan 5G (generasi ke 5) Pada Wilayah Perkotaan," *INFORMATICS Educ. Prof. J. Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 47, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2439.
- [6] 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.
- [7] F. P. Eka Putra, M. N. Arifin, K. Zulfana Imam, E. Saputra, and Sofiyullah, "Pengembangan Sistem Informasi Laboratorium Terintegrasi Sistem Akademik Menggunakan Agile Scrum," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 109–119, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.367.
- [8] 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.
- [9] F. P. E. Putra, F. Fauzan, S. Syirofi, M. Mursidi, D. Wahid, and A. Nuraini, "Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik," 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [10] 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.
- [11] X. Xia *et al.*, "A self-powered and self-sensing wave energy harvester based on a three-rotor motor of axle disk type for sustainable sea," *Energy*, vol. 312, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.133512.
- [12] X. Zhang, K. Xiong, W. Chen, P. Pingyi, B. Gao, and K. Ben Letaief, "Maximizing Harvested Energy in Natural Energy Powered RF WPT With Nonlinear EH Model," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 24, no. 7, pp. 5432–5445, 2025, doi: 10.1109/TWC.2025.3547045.
- [13] M. Schelles, W. Lievens, L. Goyvaerts, F. Ceyssens, R. Muller, and M. Kraft, "Comparison and System Development of a Two-Coil and Three-Coil Inductive Link for Transcutaneous Power Transfer," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 109219–109233, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3581460.
- [14] V. K. Prajapati, T. P. Sharma, and L. K. Kumar Awasthi, "Data Dissemination Framework for Optimizing Overhead in IoT-Enabled Systems Using Tabu-RPL," *SN Comput. Sci.*, vol. 5, no. 4, 2024, doi: 10.1007/s42979-024-02694-8.
- [15] A. B. Benfradj Guiloufi, S. E. El Khediri, N. Nasri, and A. Kachouri, "A comparative study of energy efficient algorithms for IoT applications based on WSNs," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 82, no. 27, pp. 42239–42275, 2023, doi: 10.1007/s11042-023-14813-3.
- [16] A. Parmar, K. Shah, K. M. Captain, M. López-Benítez, and J. R. Patel, "Gaussian Mixture Model-Based Anomaly Detection for Defense Against Byzantine Attack in Cooperative Spectrum Sensing," *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 2, pp. 499–509, 2024, doi: 10.1109/TCCN.2023.3342409.
- [17] Y. Bai *et al.*, "UAV Path Planning for Data Collection From Wireless Sensor Network With Matrix-Based Evolutionary Computation," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 26, no. 9, pp. 13672–13687, 2025, doi: 10.1109/TITS.2025.3568359.
- [18] J. Wang, S. Lu, and C. Li, "UNEVEN CLUSTERING ROUTING PROTOCOLS FOR MULTI-HOP COGNITIVE RADIO SENSOR NETWORKS: GENERAL DESIGN PRINCIPLES AND AN ILLUSTRATIVE EXAMPLE," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 21, no. 1, pp. 153–172, 2025, doi: 10.24507/ijicic.21.01.153.
- [19] Y. Long *et al.*, "Room-temperature, self-powered hydrogel-based flexible chemosensors for nitrogen dioxide detection enabled by zinc-air batteries," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 290, 2025, doi: 10.1016/j.bios.2025.117941.
- [20] D. Chatzoulis, C. Chaikalas, A. Xenakis, D. Kosmanos, and K. E. Anagnostou, "Channel Coding QoS Analysis in 5G V2X Dynamic Propagation Models," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 80149–80173, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3566607.
- [21] K. Zhang *et al.*, "All-Wood-Based Ionic Power Generator with Dual Functions for Alkaline Wastewater Reuse and Energy Harvesting," *ACS Nano*, vol. 18, no. 14, pp. 10259–10269, 2024, doi: 10.1021/acsnano.4c00990.
- [22] S. Sellamuthu, R. Krithiga, M. Revathi, G. Gajendran, and R. M. Bhavadharini, "Energy aware optimal routing model for wireless multimedia sensor networks using modified Voronoi assisted prioritized double deep Q-learning," *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, vol. 36, no. 6, 2024, doi: 10.1002/cpe.7945.
- [23] Y. Dai, X. Jiang, K. Wang, and K. Li, "A phototunable self-oscillatory bistable seesaw via liquid crystal elastomer fibers," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 200, 2025, doi: 10.1016/j.chaos.2025.117041.
- [24] Y. Hou, H. He, X. Jiang, S. Chen, and J. Yang, "Deep-Reinforcement-Learning-Aided Loss-Tolerant Congestion Control for 6LoWPAN Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 21, pp. 19125–19140, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3281482.
- [25] R. L. Bruun, C. Morejon Santiago Garcia, T. B. Sørensen, N. K. Pratas, T. K. Madsen, and P. Mogensen, "Signaling Design for Cooperative Resource Allocation and Its Impact to Message Reliability," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 103569–103584, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3317269.
- [26] X. Chen, Y. Lin, B. Chen, R. Duan, Z. Zhou, and C. Lu, "Enhancing the Thermoelectric Performance of Sustainable Cellulose-Based Ionogels Through Water Content Regulation," *Small*, vol. 21, no. 11, 2025, doi: 10.1002/sml.202412336.
- [27] B. Fang, X. Li, G. Han, and J. He, "Rethinking Pseudo-Labeling for Semi-Supervised Facial Expression Recognition With Contrastive Self-Supervised Learning," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 45547–45558, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3274193.
- [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] F. F. Jurado-Lasso, M. Barzegaran, J. F. Jurado, and X. Fafoutis, "ELISE: A Reinforcement Learning Framework to Optimize the Slotframe Size of the TSCH Protocol in IoT Networks," *IEEE Syst. J.*, vol. 18, no. 2, pp. 1068–1079, 2024, doi: 10.1109/JSYST.2024.3371429.
- [30] A. Pandey, S. Shekhar, A. Nandi, and B. Basu, "On lifetime enhancement of wireless sensor network using particle swarm optimisation,"

- Int. J. Adv. Intell. Paradig.*, vol. 25, no. 1–2, pp. 51–67, 2023, doi: 10.1504/IJAIP.2023.130817.
- [31] 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.
- [32] L. Zhang, S. C. Liew, and H. Chen, “A Just-in-Time Networking Framework for Minimizing Request-Response Latency of Wireless Time-Sensitive Applications,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 8, pp. 7126–7142, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3229125.
- [33] 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.
- [34] L. Zhai *et al.*, “High-sensitivity blue-energy-shuttle and in-situ electrical behaviors in ocean,” *Nano Energy*, vol. 125, 2024, doi: 10.1016/j.nanoen.2024.109546.
- [35] B. Zeng, S. Li, and X. Gao, “Threshold-driven K-means sector clustering algorithm for wireless sensor networks,” *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2024, no. 1, 2024, doi: 10.1186/s13638-024-02403-2.
- [36] S. Anand and A. V. Ananthanarayanan, “Addressing Rogue Nodes and Trust Management: Leveraging Deep Learning-Enhanced Hybrid Trust to Optimize Wireless Sensor Networks Management,” *J. Robot. Control*, vol. 6, no. 2, pp. 846–861, 2025, doi: 10.18196/jrc.v6i2.25600.
- [37] D. Devarajan, “Experimental and numerical study on energy harvesting performance thermoelectric generator applied to a screw compressor,” *Energy Harvest. Syst.*, vol. 11, no. 1, 2024, doi: 10.1515/ehs-2022-0119.
- [38] J. Simon, N. Kapileswar, P. Polasi, and M. Elaveini, “Improved geographic opportunistic routing protocol for void hole elimination in underwater IoTs: Parameter tuning by TSA optimization,” *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 37, no. 3, 2024, doi: 10.1002/dac.5659.
- [39] S. E. Elgharbi, M. Iturralde, Y. Dupuis, and A. Gaugue, “Maritime monitoring through LoRaWAN: Resilient decentralised mesh networks for enhanced data transmission,” *Comput. Commun.*, vol. 241, 2025, doi: 10.1016/j.comcom.2025.108276.
- [40] S. Hemelatha, S. Shalini, U. Sathya, P. Kumaravel, S. V. Krishna, and P. H. Kulkarni, “AI BASED CLUSTER HEAD BASED MOBILE ADHOC NETWORK FOR PERFORMANCE IMPROVEMENT,” *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 102, no. 23, pp. 8818–8826, 2024, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85212852891&partnerID=40&md5=423ca23062772741ec46f6c796b915b>
- [41] L. Sheng, H. Li, Y. Qi, and M. Shi, “Real Time Screening and Trajectory Optimization of UAVs in Cluster Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 81838–81851, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3300377.
- [42] R. Nakamura, K. Ebisawa, H. Hayashi, T. Fujiwara, and T. Okuzawa, “Exploiting SRv6 for Stateless and Per-Connection-Consistent Load Balancing,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 83525–83537, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3413016.
- [43] S. Ratheesh and A. A. Breethi, “Deep learning based Non-Local k-best renyi entropy for classification of white blood cell subtypes,” *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 90, 2024, doi: 10.1016/j.bspc.2023.105812.
- [44] Q. Yao, D. Meng, H. Yang, N. Feng, and J. Zhang, “Efficient O-type mapping and routing of large-scale neural networks to torus-based ONOCs,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 16, no. 9, pp. 918–928, 2024, doi: 10.1364/JOCN.525666.
- [45] H. Chen, G. Zu, Q. Ju, and X. Yang, “Hydrogel-based sandwich-structured triboelectric nanogenerator energy harvesting storage system for multi-functional sensing and monitoring,” *Chem. Eng. J.*, vol. 523, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.168739.
- [46] T. Micallef, X. Gu, and K. Wu, “Electric Field Energy Harvesting From High-Voltage Power Lines for Consumer Batteryless Wireless Sensor Networks,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 71, no. 1, pp. 2322–2331, 2025, doi: 10.1109/TCE.2024.3503492.
- [47] A. C. Grilo, P. Oliveira, and R. Valadas, “Hard-state Protocol Independent Multicast—Source-Specific Multicast (HPIM-SSM),” *IET Networks*, vol. 13, no. 5–6, pp. 486–512, 2024, doi: 10.1049/ntw2.12133.
- [48] H. Liu, Z. Yang, N. Zhao, Y. Gu, and C. Yuen, “Interference-Aware Multihop Routing in UAV Networks: A Harmonic-Function-Based Potential Field Approach,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 11, pp. 19406–19420, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3366580.
- [49] W. Wang, Y. Gong, H. Zhang, X. Yuan, and Y. Zhang, “Quantitative Assessment of Fall Risk in the Elderly Through Fusion of Millimeter-Wave Radar Imaging and Trajectory Features,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 13370–13385, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3355927.
- [50] L. Bian, Y. Zhou, L. Liu, D. Li, N. Shi, and J. Shi, “Low-latency data routing method based on an AI-constructed line-of-sight map,” *Xi'an Dianzi Keji Daxue Xuebao/Journal Xidian Univ.*, vol. 52, no. 3, pp. 188–201, 2025, doi: 10.19665/j.issn1001-2400.20250508.
- [51] I. Ali, S. Hong, and T. Cheung, “Quality of Service and Congestion Control in Software-Defined Networking Using Policy-Based Routing,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 19, 2024, doi: 10.3390/app14199066.
- [52] X. Yu, “Exploiting data transmission for route discoveries in mobile ad hoc networks,” *Wirel. Networks*, vol. 31, no. 2, pp. 1337–1359, 2025, doi: 10.1007/s11276-024-03796-0.
- [53] M. M. H. Alkalsh and A. Kliks, “Scalable Mobility Proactive-Reactive Load Balancing (PRLB) Algorithm for High-Density Environments of Future Wireless Networks,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 140028–140045, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3596682.
- [54] T. Ishizaki and T. Matsumuro, “Development of an Active Integrated Antenna for 24-GHz Wireless Power Transfer System,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 73, no. 3, pp. 1396–1405, 2025, doi: 10.1109/TMTT.2024.3430893.
- [55] A. P. Tchinda, B. Shala, A. Lehmann, B. Ghita, D. Walker, and U. Trick, “Energy-Efficient Placement of Virtual Network Functions in a Wireless Mesh Network,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 64807–64822, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3394907.

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