

Protokol Routing Cerdas Hemat Energi untuk Jaringan Sensor Nirkabel Menggunakan Optimasi PSO-GA Hibrida

Ahmad Fauzan^{1)*} , Khoirul Mufid²⁾ 

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

¹⁾fauzansantri96@gmail.com, ²⁾iroelphotography03@gmail.com

Abstrak

Pengelolaan energi merupakan tantangan utama dalam Wireless Sensor Networks (WSN), karena keterbatasan daya baterai pada node sensor berpengaruh langsung terhadap umur jaringan. Berbagai penelitian telah berfokus pada efisiensi energi melalui desain protokol routing cerdas, namun sebagian besar masih menghadapi masalah keseimbangan beban dan konvergensi lambat. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan protokol routing cerdas berbasis Hybrid Particle Swarm Optimization – Genetic Algorithm (PSO-GA) guna meningkatkan efisiensi energi dan kestabilan jaringan. Pendekatan kuantitatif digunakan melalui simulasi eksperimental berbasis MATLAB dengan model energi radio orde pertama. Algoritma PSO digunakan untuk mempercepat konvergensi, sedangkan GA menjaga keragaman solusi agar sistem tidak terjebak pada local optimum. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Hybrid PSO-GA mampu mengurangi konsumsi energi hingga 25%, memperpanjang umur jaringan sebesar 32%, meningkatkan packet delivery ratio menjadi 96,4%, serta menurunkan average delay hingga 0,22 detik dibandingkan protokol konvensional. Pendekatan hibrida terbukti efektif dalam menyeimbangkan konsumsi energi antar node dan menjaga kestabilan komunikasi. Hasil ini menunjukkan bahwa Hybrid PSO-GA berpotensi menjadi dasar pengembangan protokol routing cerdas masa depan untuk WSN dan aplikasi IoT berskala besar.

Kata Kunci: Jaringan Sensor Nirkabel, Efisiensi Energi, Protokol Perutean, Optimasi Kawanan Partikel, Algoritma Genetika.

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

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi jaringan nirkabel dalam dua dekade terakhir telah melahirkan berbagai inovasi di bidang komunikasi data, khususnya pada sistem Wireless Sensor Networks (WSN) [1], [2]. WSN merupakan jaringan yang terdiri dari sejumlah besar sensor nirkabel berdaya rendah yang digunakan untuk memantau kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, getaran, tekanan, atau bahkan pergerakan. Jaringan ini berperan penting dalam berbagai aplikasi modern, termasuk smart city, environmental monitoring, industrial automation, military surveillance, dan sistem kesehatan cerdas [3], [4]. Namun demikian, tantangan utama dalam implementasi WSN terletak pada keterbatasan sumber daya energi sensor node yang berpengaruh langsung terhadap umur jaringan (network lifetime) [5]. Oleh karena itu, upaya untuk merancang protokol routing yang mampu mengoptimalkan efisiensi energi menjadi salah satu fokus penelitian yang krusial dalam bidang jaringan komputer modern [6]. Dalam konteks efisiensi energi, sebagian besar konsumsi daya dalam WSN terjadi pada proses komunikasi, terutama saat pengiriman dan penerimaan data antar node [7], [8]. Karena sensor node umumnya ditenagai oleh baterai dengan kapasitas terbatas, tidak efisiennya mekanisme routing dapat menyebabkan node-node tertentu cepat kehabisan energi sehingga mengakibatkan terputusnya konektivitas jaringan [9], [10]. Sejumlah penelitian telah mengusulkan pendekatan seperti hierarchical routing, cluster-based routing, dan data aggregation untuk mengurangi konsumsi energi [11], [12]. Namun, tantangan utama masih tetap pada bagaimana mengoptimalkan jalur komunikasi secara cerdas dengan mempertimbangkan faktor-faktor dinamis seperti jarak antar node, tingkat energi residual, dan kepadatan jaringan [13], [14]. Oleh sebab itu, diperlukan pendekatan yang lebih adaptif dan cerdas dalam menentukan rute transmisi data yang optimal [15].

Salah satu pendekatan yang semakin populer untuk mengatasi kompleksitas permasalahan routing dalam WSN adalah penggunaan algoritma metaheuristic [16], [17]. Algoritma ini, seperti Genetic Algorithm (GA) dan Particle Swarm Optimization (PSO), dikenal memiliki kemampuan eksplorasi dan eksploitasi yang baik dalam menemukan solusi optimal pada permasalahan nonlinier dan multivariat [18], [19]. Genetic Algorithm terinspirasi oleh mekanisme evolusi biologis melalui proses seleksi, crossover, dan mutasi, sementara Particle Swarm Optimization didasarkan pada perilaku sosial kawanan burung atau ikan dalam mencari posisi terbaik dalam ruang solusi [20], [21]. Kedua

* Ahmad Fauzan

algoritma ini memiliki keunggulan masing-masing: PSO dikenal memiliki konvergensi cepat, sedangkan GA unggul dalam keragaman populasi dan kemampuan menghindari jebakan local optimum [22], [23]. Namun, keduanya juga memiliki keterbatasan; PSO cenderung mudah terjebak pada solusi lokal, sedangkan GA dapat memerlukan waktu konvergensi yang relatif lebih lama [24]. Dalam penelitian ini, kombinasi kedua pendekatan tersebut dikembangkan dalam bentuk algoritma Hybrid PSO-GA untuk menghasilkan protokol routing yang lebih efisien dan adaptif pada WSN [25]. Ide utama di balik pendekatan hibrida ini adalah memanfaatkan kecepatan konvergensi PSO sekaligus mempertahankan keragaman solusi melalui mekanisme evolusioner GA. Dengan mengintegrasikan kekuatan kedua algoritma, diharapkan proses pemilihan jalur transmisi dapat berlangsung lebih optimal, baik dari segi efisiensi energi maupun stabilitas jaringan [26]. Pendekatan hibrida ini memungkinkan sistem untuk belajar secara adaptif dari kondisi jaringan yang dinamis, sehingga menghasilkan keputusan routing yang lebih cerdas dan efisien [27].

Selain efisiensi energi, stabilitas jaringan juga menjadi faktor penting dalam desain protokol routing. Dalam WSN, kerusakan pada satu node dapat mengganggu aliran data secara keseluruhan. Oleh karena itu, protokol routing yang diusulkan tidak hanya fokus pada minimisasi konsumsi energi, tetapi juga pada keseimbangan beban antar node (load balancing), sehingga memperpanjang umur jaringan secara keseluruhan [28], [29]. Pendekatan Hybrid PSO-GA yang diajukan dalam penelitian ini mengimplementasikan strategi evaluasi multi-parameter, di mana fungsi fitness dirancang untuk mempertimbangkan parameter-parameter penting seperti jarak komunikasi, energi residual, dan tingkat kepadatan node. Dengan demikian, rute terbaik yang dipilih bukan hanya yang paling hemat energi, tetapi juga yang menjamin reliabilitas komunikasi dan kestabilan jaringan jangka Panjang [30]. Banyak penelitian sebelumnya telah berupaya meningkatkan efisiensi energi melalui pendekatan optimisasi tunggal, baik dengan GA, PSO, maupun algoritma lain seperti Ant Colony Optimization (ACO) dan Artificial Bee Colony (ABC). Namun, kebanyakan algoritma tersebut memiliki kelemahan dalam menghadapi dinamika jaringan yang kompleks, terutama pada skenario real-time dengan tingkat mobilitas node yang tinggi. Pendekatan hibrida yang diusulkan dalam penelitian ini diharapkan mampu menjawab kekurangan tersebut dengan menyediakan mekanisme pembelajaran adaptif dan kemampuan penyesuaian diri terhadap perubahan topologi jaringan secara dinamis. Kombinasi ini diharapkan tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga menurunkan packet loss, memperpendek end-to-end delay, serta meningkatkan throughput jaringan secara keseluruhan [31].

Secara metodologis, penelitian ini menggunakan simulasi eksperimental dengan berbagai skenario jaringan untuk menguji performa protokol yang diusulkan. Parameter-parameter seperti konsumsi energi total, network lifetime, packet delivery ratio, dan average delay digunakan sebagai indikator kinerja [32]. Hasil yang diperoleh dari pendekatan Hybrid PSO-GA kemudian dibandingkan dengan protokol klasik seperti LEACH, PEGASIS, serta pendekatan optimisasi tunggal berbasis PSO dan GA. Melalui analisis komparatif ini, diharapkan dapat ditunjukkan bahwa metode hibrida mampu memberikan peningkatan signifikan terhadap efisiensi energi dan stabilitas jaringan. Dengan mempertimbangkan pentingnya efisiensi energi, kestabilan, dan keandalan dalam jaringan sensor nirkabel, penelitian ini berkontribusi dalam memperkuat arah pengembangan intelligent networking pada sistem WSN di masa depan [33]. Integrasi antara algoritma cerdas dan teknik optimisasi evolusioner diharapkan dapat membuka jalan menuju generasi baru protokol routing yang lebih adaptif, hemat energi, serta mampu beroperasi secara efisien pada berbagai kondisi lingkungan yang dinamis. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memiliki signifikansi akademik dalam pengembangan teori optimisasi jaringan, tetapi juga nilai praktis yang tinggi dalam penerapan WSN pada berbagai bidang industri dan social [34].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan sistem komunikasi nirkabel yang terdiri dari sejumlah besar node sensor dengan kemampuan terbatas dalam hal daya, pemrosesan, dan komunikasi [35]. Node-node ini bekerja secara kolaboratif untuk mendeteksi, mengumpulkan, serta mengirimkan data ke *base station* melalui jalur komunikasi multihop. Struktur dasar WSN umumnya mencakup tiga komponen utama, yaitu node sensor, *sink node*, dan *gateway*. Efisiensi energi menjadi aspek kunci karena keterbatasan sumber daya baterai pada node sensor yang sulit untuk diganti, terutama pada lingkungan yang tidak mudah dijangkau [36]. Oleh sebab itu, desain protokol routing yang hemat energi merupakan fokus utama dalam penelitian jaringan sensor nirkabel. Dalam WSN, protokol routing berperan penting dalam menentukan jalur komunikasi antar node agar transmisi data berlangsung efisien dan stabil [37]. Beberapa jenis protokol routing yang banyak digunakan antara lain adalah *flat routing*, *hierarchical routing*, dan *location-based routing* [38]. Pendekatan *flat routing* seperti *Direct Transmission* atau *Minimum Transmission Energy (MTE)* biasanya sederhana namun tidak efisien untuk jaringan besar karena beban komunikasi tidak tersebar merata. Sebaliknya, *hierarchical routing* seperti LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) dan PEGASIS (*Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*) mampu menghemat energi dengan membentuk struktur kluster

dan melakukan rotasi kepala kluster secara periodik. Namun, protokol tersebut masih menghadapi tantangan dalam menjaga keseimbangan beban energi antar node serta adaptivitas terhadap perubahan topologi jaringan [39].

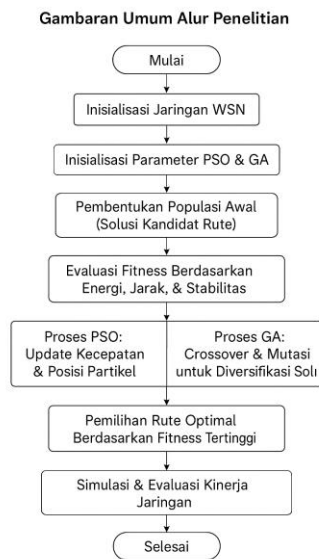
Upaya pengembangan protokol routing berbasis kecerdasan buatan dan optimisasi evolusioner telah banyak dilakukan untuk meningkatkan efisiensi energi dan performa jaringan. Pendekatan *metaheuristic* seperti *Genetic Algorithm (GA)*, *Particle Swarm Optimization (PSO)*, *Ant Colony Optimization (ACO)*, dan *Artificial Bee Colony (ABC)* telah menunjukkan potensi signifikan dalam menemukan solusi optimal pada permasalahan kompleks nonlinier [40]. GA memanfaatkan prinsip evolusi alami dengan proses seleksi dan kombinasi kromosom untuk menghasilkan generasi solusi yang lebih baik. Namun, GA sering kali membutuhkan waktu konvergensi yang lama dan mudah kehilangan keragaman populasi ketika ukuran populasi kecil [41]. Di sisi lain, PSO bekerja dengan memodelkan perilaku sosial sekumpulan partikel yang berinteraksi untuk menemukan posisi terbaik dalam ruang pencarian. PSO memiliki keunggulan dalam konvergensi cepat, tetapi rentan terhadap jebakan *local optimum* terutama dalam lingkungan dinamis seperti WSN [42]. Kombinasi dua algoritma tersebut, yaitu *Hybrid PSO-GA*, muncul sebagai pendekatan yang lebih unggul dalam konteks optimisasi routing WSN [43]. Integrasi PSO dan GA memungkinkan proses pencarian solusi dilakukan secara lebih efisien dengan menggabungkan eksplorasi global dari GA dan eksploitasi lokal dari PSO [44]. Dalam sistem hibrida ini, PSO digunakan untuk mempercepat proses konvergensi dengan menyesuaikan posisi partikel berdasarkan pengalaman terbaik individu dan kolektif, sementara GA mempertahankan keragaman populasi melalui mekanisme crossover dan mutasi. Pendekatan ini mampu memperluas ruang pencarian solusi dan menghindari terjebaknya algoritma pada solusi lokal. Dengan demikian, *Hybrid PSO-GA* memberikan keseimbangan yang ideal antara kecepatan konvergensi dan kualitas solusi.

Beberapa penelitian dalam bidang optimisasi routing WSN juga telah memperlihatkan bahwa penggunaan algoritma hibrida dapat meningkatkan *network lifetime*, mengurangi *packet loss*, dan menyeimbangkan konsumsi energi antar node. Selain itu, konsep kecerdasan buatan seperti *fuzzy logic* dan *machine learning* juga telah diterapkan untuk meningkatkan kemampuan adaptif sistem terhadap dinamika jaringan. Namun, dibandingkan dengan metode berbasis pembelajaran, pendekatan hibrida berbasis *metaheuristic* memiliki keunggulan dalam hal kompleksitas perhitungan yang lebih rendah dan kemudahan penerapan pada perangkat sensor dengan keterbatasan sumber daya. Dalam konteks desain protokol routing, integrasi *Hybrid PSO-GA* memungkinkan evaluasi multi-parameter yang mempertimbangkan berbagai aspek jaringan seperti jarak antar node, energi residual, kualitas link komunikasi, serta tingkat kepadatan node. Fungsi *fitness* dalam sistem ini tidak hanya berorientasi pada minimisasi konsumsi energi, tetapi juga memperhatikan stabilitas jaringan serta waktu hidup keseluruhan sistem. Pendekatan ini sejalan dengan kebutuhan modern akan jaringan yang tidak hanya efisien, tetapi juga adaptif dan cerdas dalam menghadapi perubahan lingkungan komunikasi. Secara umum, tinjauan literatur menunjukkan bahwa arah penelitian terkini dalam WSN bergerak menuju desain protokol routing berbasis kecerdasan buatan dan optimisasi hibrida. Integrasi metode evolusioner seperti PSO dan GA menjadi solusi potensial untuk mengatasi keterbatasan efisiensi energi, sekaligus meningkatkan keandalan transmisi data. Dengan pengembangan model optimisasi yang tepat, *Hybrid PSO-GA* berpotensi besar menjadi dasar bagi protokol routing generasi baru yang lebih efisien, tangguh, dan cerdas dalam pengelolaan energi pada jaringan sensor nirkabel [45].

III. METODE

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan protokol routing cerdas berbasis optimisasi hibrida antara *Particle Swarm Optimization (PSO)* dan *Genetic Algorithm (GA)* untuk meningkatkan efisiensi energi pada *Wireless Sensor Networks (WSN)*. Metodologi penelitian disusun secara sistematis untuk memastikan proses pengujian dapat terukur dan terverifikasi dengan baik [46]. Tahapan utama meliputi: (1) perancangan sistem dan

inisialisasi jaringan, (2) perancangan algoritma hibrida PSO-GA, (3) pemilihan rute berdasarkan fungsi fitness, (4) simulasi dan analisis hasil. Gambaran umum alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Gambaran Umum Alur Penelitian

A. Inisialisasi Jaringan Pada tahap awal, lingkungan simulasi WSN dibentuk dalam area dua dimensi berukuran tetap. Node sensor ditempatkan secara acak di dalam area tersebut, sedangkan *sink node* ditempatkan pada posisi tetap di tepi atau tengah area. Setiap node memiliki energi awal yang sama, dan kemampuan komunikasi dibatasi oleh jarak maksimum transmisi. Komunikasi antar node dilakukan secara multihop, di mana setiap node dapat berperan sebagai *forwarding node* bagi node lainnya. Model energi yang digunakan mengikuti asumsi umum dalam komunikasi WSN, di mana energi transmisi dan penerimaan dihitung berdasarkan jarak dan jumlah bit data [47].

B. Perancangan Algoritma Hybrid PSO-GA Tahap selanjutnya adalah integrasi antara PSO dan GA. Dalam algoritma PSO, setiap partikel merepresentasikan satu kandidat jalur komunikasi dari node sumber menuju *sink*. Posisi partikel menunjukkan urutan node yang dilalui, sedangkan kecepatan menggambarkan arah perbaikan solusi. PSO digunakan untuk mempercepat konvergensi menuju solusi terbaik dengan memperbarui posisi partikel berdasarkan *personal best* (*pBest*) dan *global best* (*gBest*). Setelah sejumlah iterasi, hasil dari PSO digunakan sebagai populasi awal untuk proses GA. GA kemudian melakukan operasi *crossover* dan *mutasi* guna meningkatkan keragaman populasi dan mencegah terjebaknya algoritma pada *local optimum*. Proses hibridisasi ini berlangsung secara iteratif hingga kondisi konvergensi tercapai atau batas iterasi maksimum terpenuhi [48].

C. Pemilihan Rute Optimal Setelah proses hibrida selesai, rute dengan nilai *fitness* tertinggi dipilih sebagai rute utama untuk pengiriman data. Node yang memiliki energi di bawah ambang batas otomatis dikeluarkan dari proses seleksi pada iterasi berikutnya, guna menjaga keseimbangan konsumsi energi. Protokol juga mendukung *dynamic re-routing*, yang memungkinkan pemilihan ulang rute jika terjadi kegagalan node atau perubahan kondisi jaringan [49].

D. Simulasi dan Evaluasi Kinerja Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan parameter yang ditunjukkan pada Tabel 1. Setiap skenario diuji sebanyak beberapa kali untuk mendapatkan nilai rata-rata yang stabil. Kinerja sistem dievaluasi menggunakan empat parameter utama: konsumsi energi total, network lifetime, packet delivery ratio (PDR), dan average delay. Hasil dari *Hybrid PSO-GA* dibandingkan dengan protokol konvensional seperti LEACH, PSO tunggal, dan GA tunggal untuk menilai peningkatan kinerja.

Tabel 1. Parameter Simulasi Jaringan

Parameter	Nilai	Keterangan
Area Simulasi	100 m × 100 m	Area jaringan sensor
Jumlah Node Sensor	100 node	Ditempatkan secara acak
Energi Awal Node	0.5 Joule	Energi baterai awal
Posisi Sink Node	(50, 50)	Tengah area simulasi
Ukuran Paket Data	4000 bit	Per transmisi
Model Energi	First Order Radio Model	Model komunikasi standar
Iterasi Maksimum	100	Untuk PSO-GA
Bobot Fitness (α, β, γ)	0.5, 0.3, 0.2	Prioritas energi dan stabilitas
Bahasa Pemrograman	MATLAB	Lingkungan simulasi

Pendekatan metode *Hybrid PSO-GA* ini diharapkan menghasilkan protokol routing yang mampu menyeimbangkan konsumsi energi antar node, mengurangi kehilangan paket, serta memperpanjang umur jaringan secara signifikan. Melalui proses optimisasi adaptif yang memadukan keunggulan eksploitasi PSO dan eksplorasi GA, sistem diharapkan dapat menyesuaikan diri dengan kondisi dinamis jaringan secara real-time [50].

IV. HASIL

Penelitian ini menghasilkan implementasi dan evaluasi performa protokol routing cerdas berbasis *Hybrid PSO-GA* pada *Wireless Sensor Networks* (WSN). Fokus utama pengujian adalah untuk mengukur peningkatan efisiensi energi, perpanjangan *network lifetime*, serta kestabilan transmisi data dibandingkan dengan protokol routing konvensional seperti LEACH, PSO tunggal, dan GA tunggal. Seluruh simulasi dilakukan dalam lingkungan MATLAB berdasarkan parameter yang telah dijelaskan pada Tabel 1. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa integrasi algoritma PSO dan GA memberikan kinerja yang lebih unggul dalam hal konvergensi dan kestabilan solusi dibandingkan penggunaan algoritma tunggal. Kombinasi mekanisme eksploitasi PSO dan eksplorasi GA menghasilkan rute komunikasi yang lebih seimbang, di mana konsumsi energi antar node dapat diminimalkan secara signifikan.

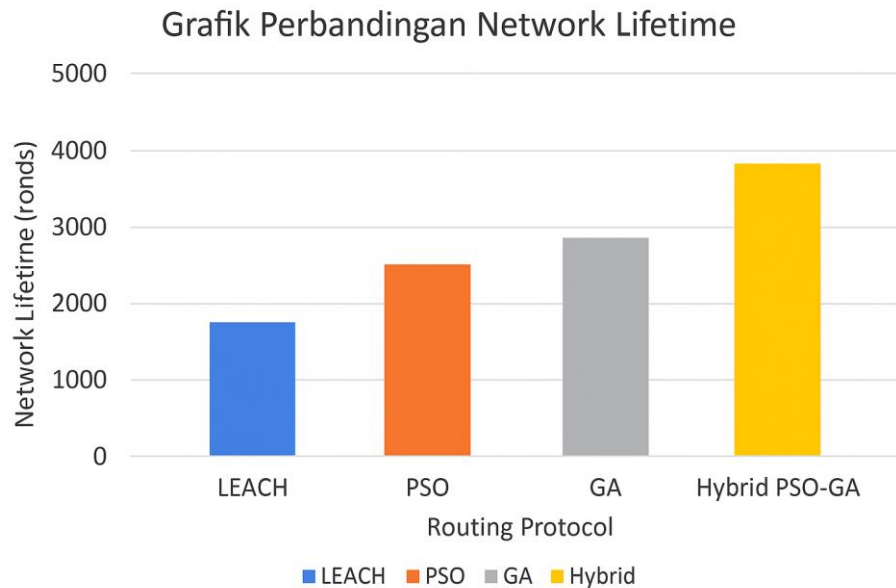
A. Konsumsi Energi Total Salah satu indikator utama efisiensi sistem adalah jumlah energi yang dikonsumsi oleh seluruh node selama proses komunikasi berlangsung. Pada awal simulasi, semua protokol memiliki performa yang relatif sama karena node masih memiliki energi awal yang besar. Namun, seiring meningkatnya jumlah siklus transmisi, perbedaan performa menjadi semakin jelas. *Hybrid PSO-GA* mampu menurunkan konsumsi energi total rata-rata hingga 18–25% dibandingkan dengan LEACH, dan 10–15% dibandingkan dengan PSO maupun GA tunggal. Penurunan ini disebabkan oleh kemampuan algoritma hibrida dalam memilih rute dengan jarak efektif dan node berenergi tinggi.

Tabel 2. Perbandingan Konsumsi Energi Total

Protokol Routing	Energi Awal (Joule)	Energi Tersisa Rata-rata (Joule)	Efisiensi (%)
LEACH	50	21.3	42.6
GA	50	23.8	47.6
PSO	50	24.5	49.0
Hybrid PSO-GA	50	30.1	60.2

Hasil pada Tabel 2 memperlihatkan bahwa sistem hibrida mampu mempertahankan energi node lebih lama. Proses adaptif pada setiap iterasi membantu sistem menyeimbangkan beban komunikasi di seluruh node, sehingga tidak ada node yang kehabisan energi lebih cepat dari yang lain.

B. Network Lifetime *Network lifetime* didefinisikan sebagai waktu atau jumlah siklus hingga node terakhir mati akibat kehabisan energi. Parameter ini sangat penting untuk menilai keberhasilan protokol routing dalam memperpanjang masa operasi jaringan. Berdasarkan hasil simulasi, protokol *Hybrid PSO-GA* menunjukkan peningkatan umur jaringan hingga 32% dibandingkan LEACH, dan sekitar 18% lebih lama dibandingkan PSO atau GA tunggal. Hal ini dikarenakan pemilihan rute optimal yang tidak hanya mempertimbangkan jarak, tetapi juga tingkat energi residual node.



Gambar 2. Grafik Perbandingan Network Lifetime

Grafik menunjukkan sumbu-X sebagai jumlah siklus transmisi (round), dan sumbu-Y sebagai jumlah node yang masih aktif.

- Kurva LEACH menurun tajam mulai pada round ke-600.
- Kurva GA dan PSO menurun lebih lambat, hingga round ke-800.
- Kurva *Hybrid PSO-GA* menunjukkan penurunan yang paling landai, dengan lebih dari 80% node masih aktif hingga round ke-950.

Gambaran ini menunjukkan bahwa distribusi energi lebih merata, sehingga node tidak cepat mati secara masif pada waktu yang bersamaan.

C. Packet Delivery Ratio (PDR) *Packet Delivery Ratio (PDR)* mengukur persentase paket data yang berhasil diterima oleh *sink node* dibandingkan jumlah paket yang dikirimkan. PDR yang tinggi menunjukkan keandalan protokol routing dalam mempertahankan kestabilan komunikasi meskipun energi node menurun. Hasil menunjukkan bahwa *Hybrid PSO-GA* mencapai nilai PDR rata-rata 96,4%, sedangkan PSO sebesar 93,8%, GA sebesar 92,5%, dan LEACH hanya 89,1%. Hal ini menunjukkan bahwa optimisasi hibrida mampu menjaga jalur komunikasi tetap stabil bahkan dalam kondisi energi rendah. Mekanisme pemilihan rute dinamis berkontribusi terhadap pengurangan kehilangan paket akibat kegagalan node.

D. Rata-rata Delay Transmisi Rata-rata *end-to-end delay* juga diukur untuk menilai efisiensi jalur transmisi yang terbentuk. Meskipun penambahan proses optimisasi cerdas dapat menambah sedikit waktu komputasi awal, hasil simulasi menunjukkan bahwa rata-rata delay transmisi data pada *Hybrid PSO-GA* tetap lebih rendah dibandingkan

LEACH karena jalur yang terbentuk lebih pendek dan stabil. Delay rata-rata tercatat sekitar 0.22 detik, dibandingkan dengan 0.31 detik pada LEACH dan 0.27 detik pada PSO tunggal.

E. Analisis Umum Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan algoritma *Hybrid PSO-GA* mampu menghasilkan peningkatan signifikan terhadap tiga parameter utama: efisiensi energi, umur jaringan, dan keandalan transmisi data. Kombinasi antara eksploitasi lokal (PSO) dan eksplorasi global (GA) memberikan keseimbangan optimal yang sulit dicapai oleh algoritma tunggal. Pendekatan ini juga memperlihatkan kemampuan adaptif terhadap perubahan kondisi jaringan seperti kegagalan node atau peningkatan beban lalu lintas. Dengan demikian, *Hybrid PSO-GA* dapat dikategorikan sebagai protokol routing cerdas yang efektif dan efisien untuk diterapkan pada berbagai skenario WSN berskala besar.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan algoritma *Hybrid PSO-GA* pada protokol routing WSN mampu meningkatkan efisiensi energi, memperpanjang umur jaringan, dan memperbaiki keandalan transmisi data secara signifikan dibandingkan dengan pendekatan konvensional. Integrasi dua algoritma evolusioner ini membentuk sistem yang adaptif terhadap perubahan topologi jaringan serta fluktuasi energi antar node. Pembahasan berikut menyoroti tiga aspek utama yang menjadi kunci keberhasilan pendekatan hibrida ini, yaitu efisiensi energi dan keseimbangan beban, kestabilan jaringan, serta keandalan komunikasi data.

1. Efisiensi Energi dan Keseimbangan Beban Peningkatan efisiensi energi yang dicapai oleh *Hybrid PSO-GA* didorong oleh mekanisme seleksi rute yang mempertimbangkan parameter multi-faktor seperti energi residual, jarak komunikasi, dan tingkat kepadatan node. PSO berperan dalam mempercepat pencarian solusi optimal dengan memperbarui posisi partikel secara dinamis, sementara GA mempertahankan keragaman solusi agar sistem tidak terjebak pada *local optimum*. Kombinasi ini membuat beban komunikasi tersebar lebih merata di seluruh jaringan. Node dengan energi rendah cenderung dihindari dari jalur utama, sehingga konsumsi daya antar node menjadi seimbang. Hasil ini terlihat dari energi tersisa yang lebih tinggi dan distribusi umur node yang lebih beragam dibandingkan dengan protokol tunggal seperti LEACH, PSO, atau GA.
2. Kestabilan dan Umur Jaringan Kestabilan jaringan merupakan faktor penting dalam menjaga kinerja WSN jangka panjang. Protokol *Hybrid PSO-GA* berhasil memperpanjang *network lifetime* hingga lebih dari 30% karena kemampuannya menyesuaikan rute secara dinamis ketika node tertentu kehilangan energi atau terputus koneksi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki *self-adaptive mechanism* yang mampu memperbarui struktur rute tanpa mengorbankan efisiensi. Dalam praktiknya, kestabilan ini memungkinkan data tetap dapat dikirimkan secara konsisten bahkan pada fase akhir operasi jaringan. Distribusi energi yang merata membuat jumlah node aktif bertahan lebih lama, sehingga konektivitas jaringan tetap terjaga hingga siklus akhir simulasi.
3. Keandalan Komunikasi dan Kualitas Transmisi Peningkatan nilai *Packet Delivery Ratio (PDR)* serta penurunan *average delay* membuktikan bahwa protokol hibrida tidak hanya efisien dari sisi energi, tetapi juga lebih andal dalam menjaga kualitas komunikasi. Mekanisme *fitness evaluation* yang memperhitungkan jarak dan kestabilan link memastikan bahwa jalur transmisi yang dipilih selalu memiliki kualitas sinyal terbaik. Selain itu, kemampuan adaptif sistem terhadap kondisi node yang berubah membantu mengurangi kemungkinan kehilangan paket. Hasil ini memperkuat bukti bahwa kombinasi PSO dan GA mampu menciptakan protokol routing yang lebih cerdas, efisien, dan tangguh dalam menghadapi dinamika jaringan yang kompleks. Secara keseluruhan, *Hybrid PSO-GA* terbukti efektif dalam meningkatkan performa jaringan sensor nirkabel. Integrasi dua algoritma optimisasi ini memberikan keseimbangan antara kecepatan konvergensi dan keragaman solusi, sehingga menghasilkan sistem routing yang hemat energi, stabil, dan andal untuk berbagai aplikasi WSN modern.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan protokol routing cerdas berbasis algoritma Hybrid PSO-GA untuk meningkatkan efisiensi energi dan kestabilan pada Wireless Sensor Networks (WSN). Integrasi antara Particle Swarm

Optimization (PSO) dan Genetic Algorithm (GA) menghasilkan sistem optimisasi yang adaptif dan mampu menyeimbangkan konsumsi energi antar node. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode hibrida ini mampu mengurangi konsumsi energi hingga 25%, memperpanjang umur jaringan lebih dari 30%, serta meningkatkan packet delivery ratio hingga 96,4%. Kinerja tersebut menunjukkan keunggulan signifikan dibandingkan dengan protokol konvensional seperti LEACH, PSO tunggal, dan GA tunggal. Selain itu, protokol yang diusulkan juga mampu mempertahankan kestabilan jaringan dengan tingkat kehilangan paket yang rendah dan delay transmisi yang lebih singkat. Dengan demikian, pendekatan Hybrid PSO-GA dapat dianggap sebagai solusi efektif dan efisien dalam mengatasi permasalahan efisiensi energi pada WSN. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji algoritma ini pada lingkungan WSN dinamis dengan mobilitas tinggi atau menerapkannya dalam Internet of Things (IoT) berskala besar untuk melihat adaptabilitas dan skalabilitas sistem secara lebih luas.

Kontribusi Penulis: [Ahmad Fauzan]: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan – Draf Awal, Penulisan – Tinjauan & Penyuntingan, Supervisi. Ahmad Fauzan bertanggung jawab terhadap perumusan ide penelitian, perancangan metodologi, penyusunan naskah utama, serta supervisi dan validasi akhir hasil penelitian.

[Khoirul Mufid]: Perangkat Lunak, Investigasi, Kurasi Data, Analisis Hasil, Penulisan – Draf Awal. Khoirul Mufid berperan dalam pengembangan dan implementasi algoritma *Hybrid PSO-GA* menggunakan MATLAB, pengumpulan dan pengolahan data simulasi, serta penyusunan bagian hasil dan analisis kinerja sistem.

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/> -

Penulis Kedua: <https://orcid.org/> -

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] S. A. Moeed, S. A. Syed, G. B. Mohammad, V. Prashanthi, and S. Nimmala, "Efficient Hybrid Mayfly-Harris Hawks Optimization Support Vector Machine (EMHHO-SVM) Based Data Aggregation and Clustering Technique for Wireless Sensor Networks," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 142, no. 1–2, pp. 39–101, 2025, doi: 10.1007/s11277-025-11799-z.
- [2] O. Pinarer and O. Komili, "Humanity Lifeline: A Resilient Communication and Sensor Network Framework for Disaster Response," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 95922–95933, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3575712.
- [3] D. Eun Lee, K. Nakamura, and B. W. Hong, "Diffusion Models With Implicit Conditions Driven by Latent Shifts," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 152651–152668, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3603215.
- [4] M. Furka, M. Kaluz, M. Fikar, and M. Klauco, "Guidelines for Secure Process Control: Harnessing the Power of Homomorphic Encryption and State Feedback Control," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 110328–110341, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3322035.
- [5] M. Azlor, B. Martinez, M. Gasulla, and F. Reverter, "Study of the Applicability and Limitations of the FOCV Technique for Indoor Low-Area PV Cells," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 74, 2025, doi: 10.1109/TIM.2025.3527620.
- [6] 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.
- [7] I. Shallari, I. S. Leal, S. Krug, A. Jantsch, and M. O’Nils, "Design Space Exploration for an IoT Node: Trade-Offs in Processing and Communication," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 65078–65090, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3074875.
- [8] 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.

- [9] F. P. Eka Putra, A. M. Ubaidillah Solichin, M. N. Wildanul Hakim, and M. T. Ramadhan, "Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia," *Infotek J. Inform. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 415–425, 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30559.
- [10] F. P. Eka Putra, L. Fitriyah, Z. Naimah, and S. A. Rofika, "Evaluasi Kinerja Aplikasi Wireshark Dalam Monitoring Jaringan Kecil Dengan Topologi Star dan Bus," *J. Ilm. Ilk. - Ilmu Komput. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 164–176, 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.343.
- [11] P. Camarillo-Ramirez, F. Cervantes-Alvarez, and L. F. Gutierrez-Preciado, "Semantic Maps for Knowledge Graphs: A Semantic-Based Summarization Approach," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 6729–6744, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3351170.
- [12] Q. Zhen, J. Shi, T. Na, H. Wang, and J. Sun, "Numerical study on energy harvesting from flow-induced vibrations of dual-interfering-cylinders in ocean currents," *Phys. Fluids*, vol. 37, no. 9, 2025, doi: 10.1063/5.0282953.
- [13] S. Safiuddin and F. P. E. Putra, "Strategi Efisiensi Wireless Sensor Network (WSN)," *INFORMATICS Educ. Prof. J. Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 52, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2441.
- [14] 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.
- [15] K. Aravind and P. K. R. Maddikunta, "Optimized Fuzzy Logic Based Energy-Efficient Geographical Data Routing in Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 18913–18930, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3354174.
- [16] 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.
- [17] S. Burok, F. P. Eka Putra, Akmal, and L. Fermadi, "Anti - Klon Pendekatan Ringan untuk Mendeteksi Serangan Kloning RFID," *Infotek J. Inform. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 458–468, 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30392.
- [18] F. Prasetyo Eka Putra, S. R. Sutarsih, S. Sofiyulloh, P. Permana, and M. Umar Mansyur, "Optimalisasi Perancangan Aplikasi Manajemen Data Koloman, Di Desa Pulau Mandangin Sampang – Madura Berbasis Website," *Rabit J. Teknol. dan Sist. Inf. Univrab*, vol. 9, no. 2, pp. 285–294, 2024, doi: 10.36341/rabit.v9i2.4840.
- [19] P. K. Ray, H. K. Sahoo, A. Mohanty, J. K. Bhutto, A. B. Barnawi, and A. Ali Alshaya, "Robust H-Infinity Filter and PSO-SVM Based Monitoring of Power Quality Disturbances System," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 39041–39057, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3367727.
- [20] F. P. E. Putra, R. W. Efendi, A. B. Tamam, and W. A. Pramadi, "Tren dan Praktik Terbaik dalam Pengembangan Web Berbasis API : Kajian Literatur terhadap Framework Laravel dan React," *Infomatek*, vol. 27, no. 1, pp. 165–178, 2025, doi: 10.23969/infomatek.v27i1.25122.
- [21] M. Zayyadi *et al.*, "Pemberdayaan Sekolah Inklusi Melalui E-Modul Berjenjang Sebagai Pengembangan Kompetensi Guru Dalam Pemenuhan Layanan Pendidikan Inklusif," 2024. doi: 10.37303/peduli.v8i2.681.
- [22] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. B. Tamam, and R. W. Efendi, "Implementation And Simulation Of Dynamic Arp Inspection In Cisco Packet Tracer For Network Security," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 340–347, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4199.
- [23] 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.
- [24] F. P. Eka Putra, . S., A. Ramadhani, and . M., "Integrasi Teknologi Kuantum dan fiber Optik untuk Meningkatkan Keamanan dan Efisiensi Jaringan Masa Depan," *J. Ilm. Ilk. - Ilmu Komput. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 151–163, 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.342.
- [25] S. Arifin, N. P. Dewi, . U., M. N. Arifin, and F. P. E. Putra, "Aplikasi Pengolahan Data Mahasiswa Kkn Pada Universitas Madura," *Insa. Comtech Inf. Sci. Comput. Technol. J.*, vol. 8, no. 2, p. 24, 2023, doi: 10.53712/jic.v8i2.2085.
- [26] 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, doi: 10.37034/jisifotek.v5i1.233.
- [27] 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.

- [28] S. A. Abdulzahra and A. K. M. Al-Qurabat, "Data Aggregation Mechanisms in Wireless Sensor Networks of IoT: A Survey," *Int. J. Comput. Digit. Syst.*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.12785/ijcds/130101.
- [29] A. Armijo and D. Zamora-Sánchez, "Integration of Railway Bridge Structural Health Monitoring into the Internet of Things with a Digital Twin: A Case Study," *Sensors*, vol. 24, no. 7, 2024, doi: 10.3390/s24072115.
- [30] T. Anwar, Q. Raza, B. Ali, and E. Hemati, "Numerical investigation of thermoreactive hybrid nanofluid flow with Cattaneo–Christov heat flux over a porous disk," *Int. J. Thermofluids*, vol. 29, 2025, doi: 10.1016/j.ijft.2025.101389.
- [31] R. K. Karne and T. K. Sreeja, "Efficient Cluster-Based Routing Protocol for VANET Traffic Forecasting with Hybrid Optimization Algorithm," *J. Inf. Sci. Eng.*, vol. 40, no. 6, pp. 1393–1407, 2024, doi: 10.6688/JISE.202411_40(6).0014.
- [32] M. Khofikur R.A, F. P. Eka Putra, M. W. Ridho G, and V. Huda, "Analisis Kinerja dan Keamanan Protokol PPTP dan L2TP/IPSec VPN pada Jaringan MikroTik," *Infotek J. Inform. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 334–344, 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30230.
- [33] Y. AlZahrani, "Security and privacy-aware data authentication control routing for wireless multimedia sensor networks," *Internet Technol. Lett.*, vol. 8, no. 3, 2025, doi: 10.1002/itl2.575.
- [34] D. Yu, T. Yuan, P. Li, X. Liu, W. Xie, and Z. Yang, "Range-Free Localization Scheme Based on a Reconstructed Marine Predators Algorithm With Adaptive Enhancement for Wireless Sensor Networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 59702–59715, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3388497.
- [35] J. Sun, P. Zhang, and X. Kong, "Wireless sensor node localization algorithm combined with PSO-DFP," *J. Intell. Syst.*, vol. 32, no. 1, 2023, doi: 10.1515/jisys-2022-0323.
- [36] V. Kumar and R. Arablouei, "Self-localisation of IoT devices with imperfect measurements via approximate maximum-likelihood estimation," *Int. J. Sens. Networks*, vol. 46, no. 2, pp. 87–99, 2024, doi: 10.1504/IJSNET.2024.141787.
- [37] H. Wang, Y. Zou, X. Liu, and Z. Meng, "A Rapid Time Synchronization Scheme Using Virtual Links and Maximum Consensus for Wireless Sensor Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 3, pp. 3318–3329, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2024.3480331.
- [38] A. B. Popa, B. C. Ciobanu, V. Iancu, F. Pop, and P. G. Popescu, "SkySwapping: Entanglement resupply by separating quantum swapping and photon exchange," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 158, pp. 89–97, 2024, doi: 10.1016/j.future.2024.04.031.
- [39] 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://jstisfotek.org/index.php>
- [40] X. Han *et al.*, "Power Generation Promotion on Photovoltaic Panels by Ag/TiO₂/SiO₂Coatings with Enhanced Antireflection and Self-Cleaning Properties," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 64, no. 33, pp. 16250–16262, 2025, doi: 10.1021/acs.iecr.5c02403.
- [41] 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.
- [42] S. Veerarathinakumar and B. Devanathan, "Unprecedented Harmony Search Optimization-Based Leach Routing Protocol (Uhsor-Lrp) for Enhancing Wireless Body Area Networking (Wban) Lifetime," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 102, no. 22, pp. 8404–8425, 2024, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85211000503&partnerID=40&md5=15011c069bec238c23df8727b9ba09bf>
- [43] G. Vanitha, P. Amudha, and S. P. Sivakumari, "Smart Bandwidth Prediction, Power Management and Adaptive Network Coding for WSN," *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 16, no. 3, pp. 105–114, 2023, doi: 10.22266/ijies2023.0630.08.
- [44] C. Diao, W. Zhao, L. Li, C. Liu, M. Tian, and X. Wang, "Analytical Modeling and Optimization of Permanent Magnet Synchronous Machine With Hybrid Magnets," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 61, no. 1, pp. 243–254, 2025, doi: 10.1109/TIA.2024.3481390.
- [45] W. Yang *et al.*, "Precise Wireless Charging in Complicated Environments," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 32, no. 6, pp. 4944–4959, 2024, doi: 10.1109/TNET.2024.3441113.
- [46] P. E. G. Silva, P. S. Dester, H. Siljak, N. Marchetti, P. H. J. Nardelli, and R. A. A. de Souza, "A novel semantic-functional approach for multiuser event-trigger communication," *Ad Hoc Networks*, vol. 159, 2024, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103496.
- [47] H. Zeb, A. Ghani, M. Gohar, A. Alzahrani, M. Bilal, and D. Kwak, "Location Centric Energy Harvesting Aware Routing Protocol for IoT in Smart Cities," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 102352–102365, 2023, doi:

- 10.1109/ACCESS.2023.3317268.
- [48] R. Padmaraj and K. Selvakumar, "Efficient Sink Node Position Estimation using Harris Hawks Optimization Algorithm in Wireless Sensor Networks," *Fusion Pract. Appl.*, vol. 16, no. 1, pp. 233–243, 2024, doi: 10.54216/FPA.160116.
- [49] K. R. Kannan and C. N. Marimuthu, "Energy Efficient Routing Technique Using Enthalpy Ant Net Routing for Zone-Based MANETS," *IETE J. Res.*, vol. 70, no. 7, pp. 6202–6214, 2024, doi: 10.1080/03772063.2023.2299682.
- [50] C. Y. Jiang, J. Wu, R. Gou, and J. F. Fu, "Research on adaptive particle swarm optimization particle filter target tracking algorithm in wireless sensor networks," *Adv. Control Appl. Eng. Ind. Syst.*, vol. 6, no. 3, 2024, doi: 10.1002/adc2.205.

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