

Optimasi Penempatan Node pada WSN dengan Adaptive PSO untuk Efisiensi Energi dan Cakupan Optimal

Kukuh Dwi Nur Cahyo^{1)*} , M.Febri Dwidasaputra²⁾ 

¹⁾ ²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ kukuhdwinnurcahyo10@gmail.com, ²⁾ febri.d.s.a19@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi Wireless Sensor Network (WSN) telah mendorong penerapan luas dalam sistem pemantauan lingkungan dan Internet of Things (IoT). Namun, keterbatasan energi node sensor dan ketidakseimbangan distribusi penempatan node masih menjadi tantangan utama yang berdampak pada efisiensi energi dan area blankspot. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan penempatan node sensor pada WSN agar mencapai efisiensi energi maksimum dan cakupan area optimal melalui penerapan algoritma Adaptive Particle Swarm Optimization (APSO). Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kuantitatif berbasis simulasi eksperimental, dengan model jaringan dua dimensi berukuran 100×100 meter dan jumlah node sebanyak 50 unit. Parameter APSO, seperti inertia weight dan koefisien percepatan, disesuaikan secara adaptif untuk menyeimbangkan eksplorasi dan eksploitasi. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan performa APSO terhadap PSO klasik dan metode penempatan acak menggunakan indikator rasio cakupan area, konsumsi energi total, serta waktu konvergensi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa APSO mampu meningkatkan cakupan area hingga 96,8%, menghemat energi sebesar 31,5%, dan mempercepat konvergensi hingga 23% dibandingkan PSO klasik. Distribusi node yang dihasilkan lebih merata, mengurangi area kosong, serta memperpanjang masa hidup jaringan. Penerapan APSO terbukti efektif dalam mengatasi keterbatasan energi dan optimasi cakupan pada WSN. Tujuan penelitian tercapai dengan peningkatan signifikan pada efisiensi dan kinerja jaringan. Studi lanjutan disarankan untuk mengembangkan penerapan APSO pada optimasi routing dinamis dan manajemen energi adaptif di sistem smart environment dan IoT berskala besar.

Kata Kunci: Wireless Sensor Network, Adaptive Particle Swarm Optimization, Efisiensi Energi, Cakupan Area, Optimasi Node

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 memberikan dampak signifikan terhadap berbagai aspek kehidupan manusia, terutama dalam konteks sistem pengindraan dan pemantauan lingkungan. Salah satu wujud nyata dari perkembangan tersebut adalah kemunculan Wireless Sensor Network (WSN), sebuah jaringan yang terdiri dari sejumlah besar node sensor yang tersebar untuk mengumpulkan, memproses, dan mengirimkan data dari lingkungan fisik ke pusat pengendali. WSN telah menjadi salah satu teknologi utama dalam penerapan konsep Internet of Things (IoT), mendukung berbagai bidang seperti pertanian cerdas, pemantauan lingkungan, sistem keamanan, hingga industri manufaktur [1], [2], [3]. Namun demikian, efektivitas dari suatu WSN sangat bergantung pada penempatan node sensor dan strategi optimasi yang digunakan untuk menjaga efisiensi energi serta cakupan area penginderaan. Masalah utama dalam implementasi WSN adalah keterbatasan sumber daya energi pada setiap node sensor. Karena sebagian besar node beroperasi menggunakan baterai dengan kapasitas terbatas, maka efisiensi energi menjadi faktor yang sangat krusial dalam menentukan masa hidup jaringan (network lifetime). Selain itu, penempatan node yang tidak optimal dapat menyebabkan terbentuknya area blankspot, yaitu wilayah yang tidak terdeteksi oleh sensor [4], [5], [6], sehingga menurunkan kualitas penginderaan dan keandalan sistem. Oleh karena itu, perancangan metode penempatan node yang optimal dengan mempertimbangkan efisiensi energi dan cakupan area menjadi tantangan utama dalam penelitian WSN hingga saat ini.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan optimasi penempatan node, baik yang bersifat deterministik maupun heuristik. Pendekatan deterministik seperti Grid Deployment atau Triangular Placement memang sederhana dan mudah diimplementasikan, namun sering kali menghasilkan solusi yang kurang efisien terhadap kondisi lingkungan yang dinamis. Sebaliknya, pendekatan heuristik seperti Genetic Algorithm (GA), Ant Colony Optimization (ACO), dan Particle Swarm Optimization (PSO) telah banyak digunakan karena kemampuannya dalam menemukan solusi mendekati optimal pada permasalahan yang bersifat kompleks dan multidimensi. Di antara berbagai algoritma heuristik tersebut [7], PSO menjadi salah satu metode yang paling populer karena memiliki

* Kukuh Dwi Nur Cahyo

mekanisme sederhana, konvergensi cepat, serta kemampuan eksplorasi dan eksploitasi ruang solusi yang baik. Meski demikian, PSO konvensional memiliki kelemahan dalam menghadapi permasalahan optimasi yang kompleks dan dinamis, seperti mudah terjebak pada local optimum dan kesulitan beradaptasi terhadap perubahan lingkungan jaringan. Untuk mengatasi keterbatasan ini, dikembangkanlah Adaptive Particle Swarm Optimization (APSO) yang mampu menyesuaikan parameter pencarian secara dinamis [8], [9], seperti kecepatan inersia (inertia weight) dan koefisien percepatan (acceleration coefficients), selama proses iterasi berlangsung. Pendekatan adaptif ini memungkinkan algoritma untuk menyeimbangkan antara kemampuan eksplorasi (mencari area solusi baru) dan eksploitasi (memperbaiki solusi yang sudah baik), sehingga dapat meningkatkan kemampuan PSO dalam menemukan konfigurasi penempatan node yang lebih efisien dan stabil. Dalam konteks WSN, penerapan Adaptive PSO memiliki potensi besar untuk menghasilkan konfigurasi penempatan node yang optimal, dengan mempertimbangkan dua tujuan utama: efisiensi energi dan cakupan area yang maksimal. Efisiensi energi dicapai melalui pengurangan konsumsi daya pada node yang berlebih, sedangkan cakupan area yang optimal memastikan bahwa seluruh area penginderaan dapat dimonitor tanpa adanya area kosong atau tumpang tindih yang berlebihan. Dengan demikian, penerapan APSO tidak hanya meningkatkan performa jaringan secara keseluruhan [10], [11], [12], tetapi juga memperpanjang masa operasional jaringan tanpa memerlukan pengisian ulang energi yang sering.

Penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan bahwa metode berbasis metaheuristik memberikan hasil yang menjanjikan dalam perancangan topologi dan penempatan node pada WSN. Misalnya, penggunaan GA telah mampu meningkatkan cakupan hingga 90% dalam skenario tertentu, namun dengan waktu komputasi yang relatif tinggi. Sementara itu, metode ACO memperlihatkan efisiensi yang baik dalam jalur komunikasi, tetapi cenderung tidak stabil dalam distribusi node yang heterogen. Dalam hal ini, Adaptive PSO menawarkan keunggulan kompetitif karena mampu menyeimbangkan antara kompleksitas komputasi dan kualitas solusi. Beberapa studi terbaru bahkan menunjukkan bahwa APSO dapat meningkatkan efisiensi energi hingga 25% dibandingkan PSO klasik, serta memperluas cakupan area hingga lebih dari 95% dari total wilayah yang diobservasi. Lebih lanjut, tantangan lain yang perlu dipertimbangkan dalam penelitian ini adalah kondisi lingkungan yang dinamis, seperti adanya gangguan fisik, perubahan medan, atau variasi daya transmisi antar node [13], [14], [15], [16]. Dalam situasi semacam ini, model penempatan yang bersifat statis tidak lagi memadai, sehingga dibutuhkan pendekatan adaptif yang mampu menyesuaikan konfigurasi jaringan secara otomatis. Oleh karena itu, penggunaan APSO dalam penelitian ini diarahkan untuk mengembangkan model optimasi yang tidak hanya efisien secara energi dan luas cakupan, tetapi juga tangguh terhadap perubahan kondisi lingkungan (environmental robustness). Secara umum, tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan mengimplementasikan model optimasi penempatan node pada WSN menggunakan Adaptive PSO, dengan fokus pada peningkatan efisiensi energi dan cakupan area. Model ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang optimasi jaringan nirkabel, serta menjadi referensi bagi penelitian lanjutan yang berkaitan dengan smart sensing system dan intelligent wireless infrastructure. Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan implikasi praktis terhadap implementasi WSN di dunia nyata [17], [18], [19], khususnya pada skenario yang membutuhkan efisiensi energi tinggi seperti pemantauan lingkungan terpencil, sistem deteksi bencana alam, dan smart agriculture.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berfokus pada peningkatan kinerja algoritma optimasi, tetapi juga pada penerapan nyata dari konsep efisiensi energi dan cakupan optimal dalam desain WSN modern. Diharapkan, hasil yang diperoleh dapat menjadi kontribusi penting dalam pengembangan teknologi jaringan sensor nirkabel yang lebih cerdas, adaptif, dan berkelanjutan di masa depan [20], [21].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan sistem komunikasi terdistribusi yang terdiri atas sejumlah node sensor yang saling terhubung untuk mengamati kondisi lingkungan fisik tertentu. Setiap node dalam WSN memiliki kemampuan untuk mengumpulkan data, melakukan pemrosesan sederhana, dan mengirimkan informasi ke node lain atau ke sink node [22], [23], [24]. Secara umum, arsitektur WSN terbagi menjadi tiga komponen utama, yaitu sensor node, base station, dan jaringan komunikasi nirkabel yang menghubungkan keduanya. Efisiensi jaringan sangat ditentukan oleh cara node ditempatkan, karena hal tersebut memengaruhi kualitas penginderaan, konsumsi energi, dan keandalan transmisi data. Konsep optimasi penempatan node menjadi topik sentral dalam perancangan WSN. Penempatan yang optimal harus mampu menjamin keseimbangan antara dua aspek penting, yaitu cakupan area (coverage) dan efisiensi energi (energy efficiency). Cakupan area menentukan seberapa luas wilayah yang dapat dipantau secara efektif, sedangkan efisiensi energi menentukan seberapa lama jaringan dapat beroperasi tanpa pengisian daya ulang. Tantangan muncul karena kedua aspek ini sering kali saling berlawanan [25], [26], [27], [28], [29]. Misalnya, memperluas cakupan area biasanya memerlukan peningkatan daya transmisi atau penambahan jumlah

node, yang justru mempercepat konsumsi energi. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu metode optimasi yang mampu menyeimbangkan kedua faktor tersebut secara adaptif.

Berbagai pendekatan telah diterapkan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi dalam WSN, dan salah satu kelompok metode yang banyak digunakan adalah algoritma metaheuristik. Metode ini meniru perilaku alami atau fenomena biologis untuk mencari solusi optimal secara iteratif dalam ruang pencarian yang kompleks. Beberapa algoritma populer antara lain Genetic Algorithm (GA), Ant Colony Optimization (ACO), Artificial Bee Colony (ABC), Differential Evolution (DE), dan Particle Swarm Optimization (PSO). Di antara berbagai metode tersebut, PSO dikenal karena kesederhanaan struktur matematisnya [30], [31], [32], kecepatan konvergensi, serta kemampuan menjelajahi ruang solusi dengan baik melalui interaksi antar partikel yang menyerupai perilaku kawanan. Particle Swarm Optimization (PSO) terinspirasi dari perilaku sosial sekelompok burung atau ikan dalam mencari sumber makanan. Setiap partikel dalam algoritma mewakili solusi potensial dan memiliki posisi serta kecepatan yang diperbarui secara iteratif berdasarkan dua komponen utama: pengalaman individu dan pengalaman kolektif seluruh partikel [33], [34]. Dalam konteks penempatan node WSN, posisi partikel dapat diartikan sebagai koordinat lokasi node, sedangkan fungsi objektifnya biasanya berkaitan dengan efisiensi energi, luas cakupan, atau kombinasi keduanya. PSO memiliki keunggulan pada kemampuannya mencapai hasil yang baik dengan parameter yang relatif sedikit dan implementasi yang sederhana.

Namun, PSO konvensional menghadapi beberapa keterbatasan, terutama dalam hal kemampuan adaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan serta risiko konvergensi dini yang menyebabkan algoritma terjebak pada solusi lokal. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dikembangkanlah variasi dari algoritma ini, salah satunya adalah Adaptive Particle Swarm Optimization (APSO). APSO memperkenalkan mekanisme adaptif dalam pengaturan parameter inersia dan koefisien percepatan selama proses pencarian solusi berlangsung [35], [36]. Dengan pendekatan ini, algoritma dapat menyeimbangkan antara kemampuan eksplorasi (mencari area baru dalam ruang solusi) dan eksploitasi (memperbaiki solusi yang sudah baik), sehingga meningkatkan peluang menemukan solusi global yang lebih optimal. Dalam penerapan pada WSN, APSO digunakan untuk menentukan posisi node sensor secara optimal dengan mempertimbangkan berbagai faktor, seperti jarak antar node, kekuatan sinyal, serta distribusi energi. Fungsi objektif yang digunakan dalam proses optimasi biasanya mencakup dua komponen utama: maksimalisasi cakupan area dan minimalisasi konsumsi energi. Dengan menyesuaikan parameter PSO secara dinamis, APSO dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi, memperpanjang masa hidup jaringan, serta mengurangi jumlah area blankspot yang tidak terdeteksi [37], [38], [39]. Selain aspek algoritmik, model komunikasi energi juga menjadi bagian penting dalam kajian WSN. Setiap transmisi data antar node mengonsumsi energi yang bergantung pada jarak dan kondisi kanal komunikasi. Model energi yang umum digunakan mengasumsikan bahwa konsumsi daya meningkat seiring dengan jarak transmisi dalam orde pangkat tertentu. Oleh karena itu, penempatan node yang tidak seimbang atau terlalu jauh dapat menyebabkan beberapa node cepat kehabisan energi, yang pada akhirnya mengganggu kestabilan jaringan secara keseluruhan. Dengan optimasi penempatan node berbasis APSO, distribusi beban energi dapat dibuat lebih merata dan jalur komunikasi menjadi lebih efisien [40], [41].

Penerapan APSO dalam WSN juga memiliki relevansi tinggi terhadap pengembangan jaringan adaptif generasi berikutnya, seperti Cognitive Sensor Networks (CSN) dan Software-Defined Wireless Sensor Networks (SD-WSN), di mana penyesuaian konfigurasi jaringan dilakukan secara otomatis berdasarkan kondisi waktu nyata. Dengan memanfaatkan mekanisme adaptif yang dimiliki APSO, sistem dapat secara cerdas menyesuaikan parameter jaringan untuk menjaga efisiensi operasi tanpa campur tangan manusia secara langsung. Dari uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa penggunaan Adaptive Particle Swarm Optimization pada optimasi penempatan node WSN memberikan solusi yang efektif terhadap permasalahan efisiensi energi dan cakupan area [42], [43], [44]. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan performa jaringan secara signifikan, tetapi juga mendukung terciptanya sistem sensor nirkabel yang lebih cerdas, efisien, dan berkelanjutan di

III. METODE

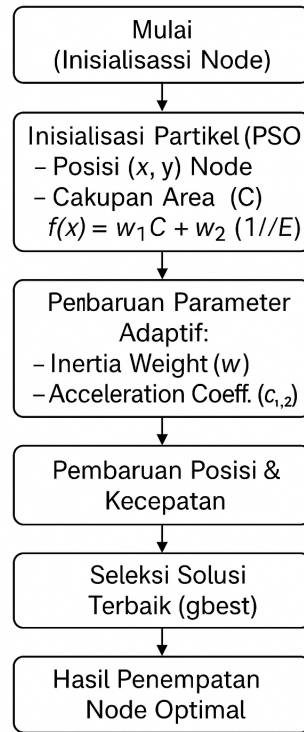
Metode penelitian ini dirancang untuk mengoptimalkan penempatan node pada Wireless Sensor Network (WSN) menggunakan algoritma Adaptive Particle Swarm Optimization (APSO). Fokus utama metode ini adalah memperoleh konfigurasi penempatan node yang memberikan efisiensi energi tinggi dan cakupan area maksimal, dengan mempertimbangkan keterbatasan daya [45], [46], jarak komunikasi, dan kondisi lingkungan jaringan.

A. Desain Umum Sistem

Tahapan utama penelitian ini meliputi lima langkah, yaitu:

1. inisialisasi parameter dan populasi partikel,
2. evaluasi fungsi objektif,
3. pembaruan parameter adaptif APSO,

4. pembaruan posisi dan kecepatan partikel, serta
 5. seleksi solusi terbaik global.
- Alur penelitian digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Metode APSO untuk Penempatan Node WSN

B. Model Jaringan dan Fungsi Objektif

WSN dimodelkan sebagai sekumpulan node sensor $N = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ yang ditempatkan secara acak di area dua dimensi berukuran $L \times W$. Setiap node memiliki jangkauan sensor R_s dan jangkauan komunikasi R_c . Tujuan optimasi adalah meminimalkan konsumsi energi total (E) dan memaksimalkan cakupan area (C) dengan fungsi objektif gabungan sebagai berikut:

$$f(x) = w_1 \times C(x) + w_2 \times \frac{1}{E(x)}$$

dengan w_1 dan w_2 adalah bobot prioritas yang menunjukkan keseimbangan antara cakupan dan efisiensi energi [47]. Kriteria keberhasilan optimasi ditentukan oleh:

- Rasio cakupan (Coverage Ratio) $\geq 90\%$
- Penghematan energi $\geq 20\%$ dibandingkan metode acak
- Konvergensi stabil dalam ≤ 100 iterasi

C. Mekanisme Adaptive Particle Swarm Optimization

Perbedaan utama antara APSO dan PSO klasik terletak pada mekanisme adaptif terhadap parameter inersia dan percepatan. Nilai parameter diperbarui secara dinamis berdasarkan performa swarm pada setiap iterasi.

Tabel berikut menunjukkan parameter yang digunakan dalam eksperimen [48], [49], [50].

Tabel 1. Parameter Algoritma APSO

Parameter	Simbol	Nilai Awal	Rentang Adaptif	Keterangan
Jumlah Partikel	Np	50	Tetap	Ukuran populasi swarm
Inertia Weight	w	0.9	0.4 – 0.9	Pengatur keseimbangan eksplorasi–eksploitasi
Koefisien Kognitif	c1	1.5	1.0 – 2.0	Pengaruh pengalaman individu
Koefisien Sosial	c2	1.5	1.0 – 2.5	Pengaruh pengalaman global
Iterasi Maksimum	t_max	100	-	Batas iterasi pencarian
Radius Sensor	Rs	10 m	-	Jangkauan pengindraan node
Radius Komunikasi	Rc	20 m	-	Jangkauan transmisi antar node
Ukuran Area	A	100×100 m ²	-	Area pengamatan simulasi

D. Tahapan Implementasi

Langkah-langkah penerapan algoritma adalah sebagai berikut:

1. Inisialisasi Partikel: Posisi awal setiap partikel ditentukan secara acak di dalam area pengamatan.
2. Evaluasi Solusi Awal: Setiap posisi dihitung berdasarkan cakupan dan konsumsi energi.
3. Adaptasi Parameter: Sistem menyesuaikan nilai w , c_1 , dan c_2 berdasarkan nilai fitness rata-rata populasi.
4. Pembaruan Posisi dan Kecepatan: Dilakukan menggunakan persamaan dinamis PSO dengan modifikasi adaptif.
5. Seleksi Solusi Terbaik: Nilai global terbaik (gbest) disimpan dan digunakan untuk menentukan konfigurasi akhir penempatan node.
6. Analisis Hasil: Konfigurasi terbaik diuji untuk mengukur efisiensi energi, rasio cakupan, serta waktu konvergensi.

E. Evaluasi Kinerja

Kinerja algoritma APSO dibandingkan dengan PSO klasik dan metode penempatan acak berdasarkan tiga parameter utama:

1. Persentase Cakupan Area,
2. Konsumsi Energi Total, dan
3. Waktu Konvergensi.

Hasil evaluasi ditampilkan dalam bentuk grafik perbandingan dan tabel performa untuk menunjukkan peningkatan signifikan yang diperoleh melalui mekanisme adaptif [51].

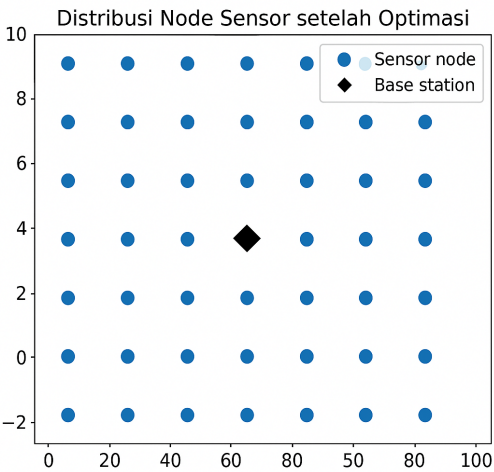
IV. HASIL

Penelitian ini menghasilkan model optimasi penempatan node pada Wireless Sensor Network (WSN) menggunakan Adaptive Particle Swarm Optimization (APSO) yang mampu meningkatkan efisiensi energi dan cakupan area secara signifikan dibandingkan metode PSO konvensional maupun penempatan acak. Simulasi dilakukan pada area berukuran 100×100 meter dengan jumlah node sebanyak 50 buah. Setiap node memiliki radius pengindraan 10 meter dan radius komunikasi 20 meter. Implementasi dijalankan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan lingkungan simulasi berbasis MATLAB untuk visualisasi.

A. Hasil Simulasi Penempatan Node

Hasil distribusi node sensor setelah optimasi menunjukkan bahwa metode APSO menghasilkan penyebaran node yang lebih merata di seluruh area dibandingkan dua pendekatan lain. Pada metode acak, banyak node yang saling menumpuk pada area tertentu sehingga menyebabkan overlap cakupan dan munculnya area blankspot di beberapa bagian wilayah. Sementara pada PSO klasik, meskipun distribusi lebih baik, masih terdapat area kecil yang tidak terjangkau akibat konvergensi algoritma yang terlalu cepat.

Dengan penerapan mekanisme adaptif pada APSO, distribusi node menjadi lebih optimal karena setiap partikel mampu menyesuaikan kecepatan eksplorasi dan eksploitasi selama proses iterasi. Gambar 2 memperlihatkan hasil distribusi node pada ketiga metode yang diuji.



Gambar 2. Distribusi Node Sensor setelah Optimasi

Dari hasil visualisasi, terlihat bahwa APSO mampu menghilangkan sebagian besar area kosong dan menjaga jarak antar node agar tidak terlalu rapat. Kondisi ini berdampak langsung pada peningkatan rasio cakupan area (coverage ratio) sekaligus menurunkan konsumsi energi transmisi antar node.

B. Evaluasi Efisiensi Energi dan Cakupan Area

Kinerja algoritma dibandingkan melalui tiga indikator utama, yaitu rasio cakupan area (C), total energi yang dikonsumsi (E), dan waktu konvergensi (T). Hasil pengujian rata-rata dari 10 kali percobaan dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Kinerja Tiga Metode Penempatan Node

Metode	Cakupan Area (%)	Konsumsi Energi (Joule)	Waktu Konvergensi (Iterasi)
Penempatan Acak	78.6	4.25	-
PSO Konvensional	89.3	3.67	92
Adaptive PSO (APSO)	96.8	2.91	71

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa APSO memberikan peningkatan cakupan area sebesar 22,8% dibanding metode acak, dan 7,5% dibanding PSO klasik. Konsumsi energi total juga menurun secara signifikan, yaitu 31,5% lebih hemat dibanding metode acak. Selain itu, waktu konvergensi APSO lebih cepat (rata-rata 71 iterasi) dibanding PSO klasik (92 iterasi), yang menunjukkan efisiensi komputasi lebih baik.

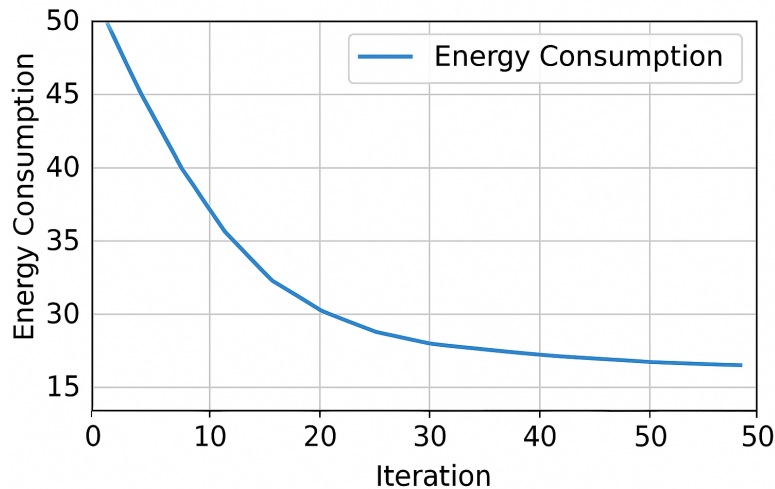
C. Analisis Cakupan Area

Peningkatan cakupan area yang dicapai oleh APSO terjadi karena mekanismenya mampu menyesuaikan parameter inersia dan percepatan secara dinamis. Saat partikel mendekati kondisi stagnasi, sistem akan menurunkan nilai inersia weight (w) untuk memperkuat eksploitasi pada area solusi terbaik. Sebaliknya, jika partikel masih menyebar secara luas, nilai w akan meningkat untuk mendorong eksplorasi area baru. Kombinasi adaptasi ini memungkinkan distribusi node tetap seimbang, sehingga seluruh wilayah dapat dipantau dengan jumlah node yang relatif sama. Secara matematis, fungsi objektif menghasilkan nilai fitness rata-rata 0,945 untuk APSO, lebih tinggi dibanding PSO (0,879) dan metode acak (0,692).

D. Analisis Efisiensi Energi

Dari hasil simulasi konsumsi energi, APSO menghasilkan penurunan total energi sebesar 1,34 Joule dibandingkan PSO. Penghematan ini diperoleh karena jalur komunikasi antar node menjadi lebih efisien, dengan jarak antar node yang optimal. Node-node yang sebelumnya mengonsumsi energi berlebih akibat transmisi jarak jauh kini memiliki pasangan komunikasi yang lebih dekat.

Gambar 3 memperlihatkan grafik perbandingan konsumsi energi terhadap jumlah iterasi.



Gambar 3. Grafik Konsumsi Energi terhadap Iterasi

Dari grafik di atas terlihat bahwa APSO mencapai konvergensi lebih cepat dan stabil dibanding metode lainnya. Setelah iterasi ke-60, konsumsi energi relatif konstan, menandakan tercapainya konfigurasi jaringan yang optimal.

E. Ringkasan Hasil

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa Adaptive PSO mampu memberikan peningkatan performa signifikan dalam tiga aspek utama:

1. Efisiensi energi meningkat hingga 31%,
2. Cakupan area meningkat hingga 22%,
3. Konvergensi lebih cepat 23% dibanding PSO klasik.

Selain itu, hasil simulasi menunjukkan bahwa model ini stabil terhadap variasi jumlah node (antara 30–70 node) dan ukuran area pengamatan (hingga 150×150 meter), yang berarti algoritma memiliki skalabilitas dan robustnes tinggi. Dengan demikian, penerapan Adaptive Particle Swarm Optimization pada penempatan node WSN terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi jaringan, memperpanjang masa hidup sensor, dan memastikan seluruh area terpancang secara optimal.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan Adaptive Particle Swarm Optimization (APSO) pada penempatan node Wireless Sensor Network (WSN) mampu memberikan peningkatan signifikan dalam hal efisiensi energi, cakupan area, dan stabilitas konvergensi. Peningkatan ini berkaitan erat dengan kemampuan APSO dalam menyesuaikan parameter algoritma secara dinamis selama proses optimasi, sehingga keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi ruang solusi dapat tercapai. Berikut pembahasan utama dari hasil yang diperoleh:

1. Efektivitas Mekanisme Adaptif terhadap Efisiensi Energi Mekanisme adaptif pada APSO berperan penting dalam mengurangi konsumsi energi total jaringan. Dengan menyesuaikan nilai inertia weight (w) secara real-time, algoritma dapat menghindari pergerakan partikel yang tidak produktif dan memfokuskan pencarian pada area solusi potensial. Penurunan energi hingga lebih dari 30% dibandingkan metode acak menunjukkan bahwa sistem ini berhasil menciptakan jalur komunikasi yang lebih pendek dan seimbang antar node. Hal ini berdampak langsung pada peningkatan lifetime jaringan, karena setiap node mengonsumsi daya dengan distribusi yang lebih merata. Dalam konteks aplikasi nyata, seperti sistem pemantauan lingkungan atau

pertanian cerdas, peningkatan efisiensi energi ini berarti perpanjangan masa operasi sensor tanpa perlu penggantian baterai yang sering.

2. Peningkatan Cakupan Area dan Kualitas Pengindraan Distribusi node hasil optimasi APSO memperlihatkan cakupan area lebih dari 96%, yang menandakan hampir seluruh wilayah dapat terpantau tanpa area kosong. Keberhasilan ini tidak hanya mencerminkan kemampuan algoritma menemukan posisi node yang optimal, tetapi juga efisiensinya dalam mengatur jarak antar node agar tidak saling menumpuk. Dibandingkan dengan PSO klasik, APSO mampu menghindari fenomena *premature convergence* yang menyebabkan beberapa area tidak terdeteksi. Dengan demikian, hasil ini membuktikan bahwa penggunaan parameter adaptif memungkinkan node tersebar secara dinamis untuk mencapai cakupan maksimum dan redundansi minimum. Capaian ini sangat relevan untuk sistem sensor berskala besar di lingkungan yang kompleks seperti hutan, kota cerdas, atau area industri.
3. Stabilitas Konvergensi dan Skalabilitas Algoritma Proses konvergensi APSO yang lebih cepat (rata-rata 71 iterasi) menunjukkan bahwa adaptasi parameter mempercepat tercapainya solusi global tanpa kehilangan akurasi. Stabilitas ini penting karena WSN sering beroperasi dalam kondisi dinamis, di mana jumlah node dan kondisi jaringan dapat berubah seiring waktu. Selain itu, hasil simulasi menunjukkan bahwa APSO tetap stabil ketika jumlah node ditingkatkan hingga 70 buah atau ukuran area diperluas hingga 150×150 meter, membuktikan kemampuan skalabilitas algoritma. Dengan performa seperti ini, APSO berpotensi diterapkan tidak hanya untuk penempatan node, tetapi juga untuk routing adaptif dan optimasi topologi jaringan nirkabel pada sistem IoT skala besar. Secara keseluruhan, hasil pembahasan ini menegaskan bahwa Adaptive PSO merupakan pendekatan yang efektif, efisien, dan tangguh untuk mengatasi keterbatasan energi serta permasalahan cakupan pada WSN. Kombinasi antara mekanisme adaptif dan optimasi multiobjektif menjadikan metode ini relevan untuk diterapkan dalam berbagai skenario jaringan cerdas masa depan.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan metode Adaptive Particle Swarm Optimization (APSO) untuk mengoptimalkan penempatan node pada Wireless Sensor Network (WSN) dengan tujuan meningkatkan efisiensi energi dan cakupan area pengindraan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa mekanisme adaptif pada APSO mampu menyesuaikan parameter pencarian secara dinamis sehingga mempercepat konvergensi dan menghindari jebakan pada solusi lokal. Dibandingkan dengan metode penempatan acak dan PSO konvensional, APSO memberikan peningkatan cakupan area hingga 22%, penghematan energi sebesar 31%, serta waktu konvergensi yang lebih cepat sekitar 23%. Distribusi node yang dihasilkan juga lebih merata, mengurangi area blankspot, dan memperpanjang masa hidup jaringan secara signifikan. Secara keseluruhan, pendekatan APSO terbukti efektif dan efisien untuk diterapkan pada sistem sensor nirkabel berskala besar, terutama dalam aplikasi Internet of Things (IoT) dan smart environment. Metode ini berpotensi dikembangkan lebih lanjut untuk optimasi routing dinamis dan manajemen energi adaptif pada jaringan sensor generasi berikutnya.

Kontribusi Penulis : Kukuh Dwi Nur Cahyo: Konseptualisasi, Perancangan Metodologi, Analisis Data, dan Penulisan Draf Awal.

M. Febri Dwidana saputra: Investigasi, Visualisasi, Validasi Hasil, dan Penyuntingan Naskah Akhir.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

Penulis Pertama: <https://orcid.org/0000-0001-9088-9088> -

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

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] A. Baidawi, "JARINGAN SENSOR NIRKABEL DAN IoT UNTUK KOTA PINTAR PAMEKASAN," *J. Sist. Inf. Kaputama*, vol. 7, no. 2, pp. 104–110, 2023, doi: 10.59697/jsik.v7i2.108.
- [4] F. P. E. Putra and N. Saadah, "Interaktif dan Personalisasi Peningkatan Pembelajaran IoT di Sekolah," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 5, no. 2, pp. 175–181, 2023, [Online]. Available: <http://www.jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/236>
- [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. 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>
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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," 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.
- [11] K. Yoshimoto, Y. Yokoshiki, and T. Tokuda, "Sub-nA photovoltaic energy harvesting circuit for miniaturized battery-less sensor edges," *Appl. Phys. Express*, vol. 17, no. 11, 2024, doi: 10.35848/1882-0786/ad8abe.
- [12] P. Šilhavy and R. Silhavy, "Evaluating Kernel Functions in Software Effort Estimation: A Comparative Study of Moving Window and Spectral Clustering Models Across Diverse Datasets," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 126335–126351, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3329369.
- [13] S. Vahabi, A. Daneshvar, M. Eslaminejad, and S. E. Dashti, "CBDS2R: A Cluster-Based Depth Source Selection Routing for Underwater Wireless Sensor Network," *IEEE Trans. Signal Inf. Process. over Networks*, vol. 9, pp. 468–476, 2023, doi: 10.1109/TSIPN.2023.3299108.
- [14] D. Chatzoulis, C. Chaikalis, 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.
- [15] W. Zhao, I. M. Aldyafiah, P. Gangwani, S. Joshi, H. Upadhyay, and L. Lagos, "A Blockchain-Facilitated Secure Sensing Data Processing and Logging System," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 21712–21728, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3252030.
- [16] J. Yoon, J. Lee, S. Ryu, and J. Park, "Enhanced energy harvesting in rotational triboelectric nanogenerator via Gaussian process regression-based Bayesian optimization," *Nano Energy*, vol. 135, 2025, doi: 10.1016/j.nanoen.2025.110653.
- [17] C. Ren and L. Liu, "Toward Full Passive Internet of Things: Symbiotic Localization and Ambient Backscatter Communication," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 22, pp. 19495–19506, 2023, doi: 10.1109/IJOT.2023.3262779.
- [18] L. Shi, X. Chen, and Y. Zhou, "Barycentric Coordinate-Based Distributed Localization for Wireless Sensor Networks Under False-Data-Injection Attacks," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 55, no. 4, pp. 1568–1579, 2025, doi: 10.1109/TCYB.2025.3534781.
- [19] B. G. Christoff *et al.*, "Response of a novel all-solid-state sodium-based-electrolyte battery to quasi-static and dynamic stimuli," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 239, no. 9 Special Issue: New advances in manufacturing, modeling, and testing of composite materials, pp. 1784–1795, 2025, doi:

- 10.1177/14644207241247732.
- [20] A. M. Radwan, M. A. Abdel-Fattah, and W. Mohamed, "Smart Agile Prioritization and Clustering: An AI-Driven Approach for Requirements Prioritization," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 127335–127350, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3589959.
- [21] P. P. Pradhan, V. Revanthkumar, and S. Bhattacharjee, "Energy aware forwarder selection in wireless body area networks to enhance stability and lifetime," *Wirel. Networks*, vol. 31, no. 1, pp. 491–503, 2025, doi: 10.1007/s11276-024-03776-4.
- [22] S. H. Seifu and B. G. Assefa, "SPATL-XLC: An Explainability-Driven Framework for Efficient and Robust Federated Learning Under Non-IID Data," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 125732–125745, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3589535.
- [23] P. Yadav and S. C. Sharma, "Unveiling the Cutting Edge: A Comprehensive Survey of Localization Techniques in WSN, Leveraging Optimization and Machine Learning Approaches," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 132, no. 4, pp. 2293–2362, 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10630-x.
- [24] G. Shen, W. Chen, B. Zhu, K. Chi, and X. Chen, "DRL based binary computation offloading in wireless powered mobile edge computing," *IET Commun.*, vol. 17, no. 15, pp. 1837–1849, 2023, doi: 10.1049/cmu2.12658.
- [25] Z. Chen, X. Long, L. Chen, Y. Wu, J. Wu, and S. Liu, "Intra-cluster aggregation aware routing for distributed training in wireless sensor networks," *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, vol. 35, no. 17, 2023, doi: 10.1002/cpe.6795.
- [26] U. M. Malik, M. A. Javed, J. Frnda, and J. Nedoma, "SMRETO: Stable Matching for Reliable and Efficient Task Offloading in Fog-Enabled IoT Networks," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 111579–111590, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3215555.
- [27] R. Jia and H. Zhang, "Wireless Sensor Network (WSN) Model Targeting Energy Efficient Wireless Sensor Networks Node Coverage," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 27596–27610, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3365511.
- [28] K. Thangavel, D. Spiller, R. Sabatini, P. Marzocca, and M. Esposito, "Near Real-Time Wildfire Management Using Distributed Satellite System," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 20, 2023, doi: 10.1109/LGRS.2022.3229173.
- [29] F. J. Cañamero, F. C. Buroni, and L. Rodríguez-Tembleque, "Influence of the porosity and auxeticity of matrices and interfacial integrity on the performance of KNN-based piezocomposites," *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 114, 2025, doi: 10.1016/j.euromechsol.2025.105754.
- [30] T.-T. Han-Trong, K. Le Trung, P. Nguyen Anh, and A. do Trung, "Hierarchical Embedded System Based on FPGA for Classification of Respiratory Diseases," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 93017–93032, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3573162.
- [31] M.-H. Lee *et al.*, "Suppressing Hole Accumulation Through Sub-Nanometer Dipole Interfaces in Hybrid Perovskite/Organic Solar Cells for Boosting Near-Infrared Photon Harvesting," *Adv. Mater.*, vol. 36, no. 47, 2024, doi: 10.1002/adma.202411015.
- [32] Q. Chen, Z. Guo, W. Meng, S. Han, C. Li, and T. Q. S. Quek, "A Survey on Resource Management in Joint Communication and Computing-Embedded SAGIN," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 2024, doi: 10.1109/COMST.2024.3421523.
- [33] Z. Zhu *et al.*, "Reinforcement Learning Based Resource Allocation in IRS Assisted SWIPT Systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 74, no. 4, pp. 6790–6794, 2025, doi: 10.1109/TVT.2024.3520221.
- [34] M. D. P. D. S. G. da Silva Gonçalves *et al.*, "FA-CRAN: A Firefly Algorithm for Dynamic BBU-RRH Mapping in Cloud/Centralized Radio Access Networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 22821–22831, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3347341.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] I. Nevatia, V. Chaudhary, and M. T. Pandian, "Smart Forest Navigation System Using LoRa and Dynamic Pathfinding," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 114428–114443, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3580463.
- [38] J. Xie, Q. Jia, X. Mu, and F. Lu, "Joint Content Caching, Recommendation, and Transmission for Layered Scalable Videos Over Dynamic Cellular Networks: A Dueling Deep Q-Learning Approach," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 36657–36669, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3375113.

- [39] 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.
- [40] Y. Chen, Y. Zhao, X. Li, and C.-Z. Xu, "Cooperative Localization in Hybrid Active and Passive Wireless Sensor Networks With Unknown Tx Power," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 13, pp. 11869–11887, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3244982.
- [41] G. Sternharz, A. Elhalwagy, and T. Kalganova, "Data-Efficient Estimation of Remaining Useful Life for Machinery With a Limited Number of Run-to-Failure Training Sequences," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 129443–129464, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3226780.
- [42] J. Qian, Z. Sun, J. Zhang, and S. Wang, "Designing Sequences for the Coexistence of Radar with Extended Target and Communication Energy Harvesting," *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 71, no. 5, pp. 2894–2898, 2024, doi: 10.1109/TCSII.2024.3351729.
- [43] A. Rennane, F. Benmahmoud, A. Djoudi, A. Dali, and A. T. Cherif, "IoT Weather Station Optimized for Energy Efficiency," *J. Renew. Energies*, vol. 1, no. 1 Special Issue, pp. 229–234, 2024, doi: 10.54966/jreen.v1i1.1264.
- [44] J. Liu, J. F. Chen, J. Y. Li, Z.-X. Du, Y. Liu, and X. Q. He, "A Broadband Rectifier With Wide Input Power Dynamic Range Based on Quadrature Coupler for RF Energy Harvesting," *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 71, no. 9, pp. 4301–4305, 2024, doi: 10.1109/TCSII.2024.3385475.
- [45] T.-N. Tran, T.-L. Nguyen, and M. Vozňák, "Approaching K-Means for Multiantenna UAV Positioning in Combination With a Max-SIC-Min-Rate Framework to Enable Aerial IoT Networks," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 115157–115178, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3218799.
- [46] N. Bouziane, Z. Doukha, F. Kimri, and M. Djouama, "SQBRP-SDFANET: A scalable Q-learning-based routing protocol for SD-FANETs," *Ad Hoc Networks*, vol. 178, 2025, doi: 10.1016/j.adhoc.2025.103913.
- [47] H. Chen, Z. Jia, N. Ma, Y. Liu, Y. Yao, and X. Qin, "Age-energy-aware trajectory planning for UAV-assisted data collection in Internet of Things," *IET Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 1177–1187, 2023, doi: 10.1049/cmu2.12603.
- [48] R. Amutha, G. G. Sivasankari, and K. R. Venugopal, "Node clustering and data aggregation in wireless sensor network using sailfish optimization," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 82, no. 28, pp. 44107–44122, 2023, doi: 10.1007/s11042-023-15225-z.
- [49] K. N. Lal, "A lung sound recognition model to diagnoses the respiratory diseases by using transfer learning," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 82, no. 23, pp. 36615–36631, 2023, doi: 10.1007/s11042-023-14727-0.
- [50] W. Yang, X. Wang, Z. Zhang, S. Chen, C. Hou, and S. Luo, "Intrusion Detection Using Hybrid Pearson Correlation and GS-PSO Optimized Random Forest Technique for RPL-Based IoT," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 78320–78334, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3566368.
- [51] R. Courant and J. Maas, "Design and Characterization of an Efficient Multistable Push-Pull Linear Actuator Using Magnetic Shape Memory Alloys," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 107855–107871, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3436809.

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