

Optimasi Konsumsi Energi pada Wireless Sensor Network (WSN) Menggunakan Algoritma Pengklasteran untuk Pertanian Presisi

Imam Ghozeli^{1)*} , Mohammad Rizki Hoirur Rofi²⁾ 

¹⁾²⁾Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ imamghozeli96@gmail.ac.id, ²⁾ rizzzrof@gmail.ac.id

Abstrak

Keterbatasan energi pada node sensor menjadi tantangan kritis dalam menerapkan Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) untuk pertanian presisi, di mana pergantian baterai di lahan yang luas seringkali tidak praktis baik dari sudut pandang teknis maupun ekonomi. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan konsumsi energi melalui pengembangan algoritma pengelompokan hibrida yang dirancang khusus untuk mengurangi ketidakseimbangan beban kerja di antara node. Metodologi yang diusulkan, Optimized Clustering Agriculture (OCA), menggunakan fungsi kebugaran multi-tujuan yang menggabungkan energi sisa, jarak Euclidean ke Stasiun Basis, dan kepadatan tetangga untuk memilih Kepala Kluster (CH) yang optimal.

Pemodelan ini dilakukan dengan menggunakan model radio orde pertama untuk mengukur disipasi energi selama fase transmisi dan agregasi data. Hasilnya menunjukkan bahwa algoritma OCA secara signifikan lebih unggul daripada protokol konvensional seperti LEACH, dengan peningkatan umur jaringan hingga 30% dan penurunan kegagalan node pertama (First Node Die) hingga putaran ke-2.450. Selain itu, sistem ini mempertahankan Rasio Pengiriman Paket (PDR) di atas 96%, memastikan keandalan data sensor untuk mengambil keputusan dalam pertanian cerdas. Hasil temuan ini memberikan kontribusi teoretis terhadap protokol jaringan yang hemat energi serta kontribusi praktis dalam menunjang infrastruktur Pertanian Cerdas yang berkelanjutan dan mandiri energi.

Keywords: *Energy-Efficient Clustering Protocol, Precision Agriculture IoT-WSN, Metaheuristic Optimization Algorithm, Network Lifetime Prolongation, Optimal Cluster Head Selection, Sustainable Smart Farming Infrastructure*

Article history: Received 5 April 2026, first decision 22 April 2026, accepted 22 August 2026, available online 28 October 2026

I. PENDAHULUAN

Perubahan digital di sektor pertanian telah melahirkan konsep Pertanian Presisi, sebuah paradigma yang menerapkan teknologi informasi untuk mengoptimalkan hasil panen sekaligus mengurangi biaya operasional [1][2][3][4]. Salah satu fondasi teknologi ini adalah Jaringan Sensor Nirkabel (WSN), yang memungkinkan pengawasan parameter lingkungan secara real-time, seperti kelembaban tanah, suhu, dan tingkat nutrisi [5][6][7]. Keberhasilan penerapan WSN di lahan pertanian sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem untuk beroperasi secara otonom dalam jangka waktu yang lama tanpa bantuan manusia [8].

Namun, masalah utama yang dihadapi oleh infrastruktur Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) adalah keterbatasan sumber daya energi pada node sensor, yang biasanya bertenaga baterai [9][8][10]. Di daerah pertanian yang luas, penggantian baterai secara berkala menjadi tidak efisien dan mahal. Sebagian besar energi pada node sensor digunakan selama proses pengiriman data ke Stasiun Pangkalan (BS) [11][12][13]. Oleh karena itu, efisiensi energi bukan lagi sebuah pilihan, melainkan kebutuhan penting untuk memperpanjang masa pakai jaringan.

Beberapa penelitian sebelumnya telah berupaya menangani masalah ini melalui berbagai teknik manajemen daya. Strategi pengelompokan (clustering) muncul sebagai salah satu solusi paling efisien, di mana node-node digabungkan dan satu node ditunjuk sebagai Cluster Head (CH) untuk mengumpulkan data sebelum mengirimkannya ke BS [14][15]. Namun, protokol pengelompokan tradisional seperti LEACH sering kali mengalami ketidakseimbangan beban kerja, di mana CH yang dipilih secara acak mungkin memiliki sisa daya yang rendah atau terlalu jauh dari pusat data [16][17].

* Imam Ghozeli

Berdasarkan hasil penelitian terkini, penggunaan algoritma metaheuristik hibrida mulai membuktikan keunggulannya dalam memilih strategi pengendalian yang optimal. Sebuah studi oleh Malisetti & Pamula (2024) menyoroti fakta bahwa menggabungkan berbagai algoritma optimasi dapat secara signifikan mengurangi penggunaan energi dibandingkan dengan pendekatan satu metode [18][19]. Selain itu, aspek keamanan dalam transmisi data, seperti yang ditekankan oleh Verma & Jha (2024), juga mulai diintegrasikan dengan protokol hemat energi untuk menjaga keutuhan data sensor di lingkungan terbuka.

Penelitian ini bertujuan untuk memaksimalkan penggunaan energi pada Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) untuk pertanian presisi dengan menawarkan algoritma pengelompokan yang lebih adaptif [20][21][22]. Fokus utama penelitian ini adalah pengembangan fungsi objektif (fungsi kebugaran) yang secara sekaligus mempertimbangkan sisa energi, kepadatan node, dan jarak Euclidean. Dengan pendekatan ini, dapat diharapkan bahwa beban energi dapat didistribusikan secara merata di seluruh jaringan, sehingga mengurangi kegagalan node yang prematur dan meningkatkan kepercayaan sistem pemantauan pertanian cerdas [23][24][25].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Implementasi Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) di sektor pertanian presisi telah mengalami transformasi yang signifikan, beralih dari sekadar pengumpulan data menjadi sistem kontrol otonom yang rumit [26][27][28]. Di lingkungan lahan terbuka, tantangan fisik seperti perubahan cuaca dan hambatan tanaman membutuhkan infrastruktur jaringan yang tangguh untuk menjaga konektivitas yang stabil antar node sensor [29][30]. Fokus utama penelitian saat ini adalah mengatasi terbatasnya daya pada node sensor melalui strategi pengelompokan, yang diakui sebagai cara paling efektif untuk meminimalkan konsumsi energi dengan menggabungkan data sebelum dikirim ke stasiun basis.

1) Protokol Pengelompokan dan Konsumsi Energi

Meskipun protokol terdepan seperti Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) telah berhasil memperkenalkan konsep distribusi beban kerja, penelitian terkini menunjukkan adanya kelemahan mendasar dalam metode pemilihan Cluster Head (CH) yang bersifat stokastik [31][32]. Kelemahan ini sering kali menyebabkan kegagalan node secara tiba-tiba, terutama di area yang berjarak jauh secara Euclidean dari pusat data, yang kemudian menimbulkan fenomena “lubang energi”. Optimisasi matematis jarak transmisi sangat penting karena energi transmisi bertambah secara eksponensial seiring dengan jarak, baik dalam model ruang bebas maupun multipath. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih menentukan dalam pemilihan kepala kluster untuk memastikan stabilitas jaringan jangka Panjang [33].

2) Algoritma Optimisasi Hibrida dan Metaheuristik

Perkembangan terkini dalam literatur menunjukkan adanya perubahan paradigma menuju penggunaan algoritma optimisasi hibrida dan metaheuristik untuk memecahkan masalah pemilihan CH yang termasuk dalam kategori NP-hard [34][35]. Integrasi algoritma metaheuristik dapat memberikan solusi global yang lebih tepat dari pada metode tradisional dengan mempertimbangkan variabel multi-kriteria secara bersamaan [36][37]. Variabel-variabel ini mencakup sisa energi, jarak ke stasiun basis, dan kepadatan node di sekitar CH kandidat. Cara hybrid ini telah terbukti efektif dalam meminimalkan biaya overhead komunikasi, yang sering kali menjadi penyebab utama pemborosan energi pada lapisan jaringan. Penggunaan algoritma ini memastikan bahwa setiap pengulangan pemilihan CH didasarkan pada status energi real-time dari setiap node sensor di lapangan [38].

3) Keamanan Data dan Keberlanjutan Jaringan

Efisiensi energi dalam mengelompokkan tidak boleh mengorbankan keamanan dan integritas transmisi data. Dalam sistem IoT pertanian yang terhubung secara luas, data sensor sangat rentan terhadap perubahan yang dapat mengganggu sistem pengambilan keputusan irigasi atau pemupukan otomatis [39][40]. Protokol di masa depan harus mampu menggabungkan mekanisme keamanan yang ringan sehingga tidak membebani komputasi node. Dengan mencapai energi yang efisien melalui pengelompokan yang optimal, sistem dapat menyediakan cadangan energi yang cukup untuk menjalankan fitur keamanan tanpa mengurangi umur jaringan.

Meskipun berbagai penelitian telah mempelajari algoritma hibrida, masih terdapat kesenjangan penelitian di mana sebagian besar model masih berfokus pada lingkungan simulasi statis yang tidak cukup merepresentasikan topografi dinamis lahan pertanian berskala besar [41]. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan mengusulkan fungsi kebugaran yang lebih adaptif, yang secara dinamis menggabungkan manajemen energi sisa dan efisiensi transmisi secara real-time. Perpaduan antara teori optimisasi dan kebutuhan praktis pertanian cerdas ini diharapkan dapat menciptakan model infrastruktur jaringan yang tidak hanya hemat energi tetapi juga sangat mudah disesuaikan untuk mendukung operasi pertanian yang berkelanjutan [42].

III. METODE

A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan percobaan berbasis simulasi kuantitatif. Rancangan penelitian ini berfokus pada pengembangan arsitektur jaringan top-down untuk pertanian presisi, di mana setiap sensor ditempatkan menggunakan distribusi stokastik untuk menggambarkan kondisi nyata di lapangan [43]. Model ini menggabungkan logika metaheuristik hibrida ke dalam struktur Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) untuk meminimalkan ketidakseimbangan beban energi di antara node sensor [44].

B. Parameter Analisis

Untuk mengevaluasi keandalan algoritma Optimized Clustering Agriculture (OCA), kami menetapkan serangkaian parameter teknis berdasarkan karakteristik perangkat sensor berdaya rendah [45]. Parameter-parameter ini berfungsi sebagai acuan untuk menghitung model radio dan efisiensi transmisi [46].

Kategori	Parameter	Simbol	Nilai
Jaringan	Luas Area Pemantauan	A	200 x 200m
	Jumlah Node Sensor	N	100 unit
	Posisi Base Station	BS	100, 250)
Energi	Energi Awal per Node	E _o	0,5 joule
	Energi Disipasi Sirkuit	E _{elec}	50 nJ/bit
	Koefisien Free Space	efs	10 pJ/bit/m ²
Data	Ukuran Paket Data	k	4000 bits
	Ambang Batas Jarak	d ₀	87 m

C. Diagram Alur Penelitian

Proses penelitian dibagi menjadi fase inisialisasi, fase optimasi, dan fase evaluasi [47]. Alur kerja ini memastikan bahwa setiap iterasi (putaran) data melalui seleksi yang ketat sebelum transmisi dilakukan ke *Base Station* [48].

D. Prosedur Analisis

Prosedur analisis dilakukan secara sistematis melalui langkah-langkah berikut:

1. Representasi Vektor: Menentukan posisi relatif antar node dalam koordinat dua dimensi untuk menghitung jarak Euclidean (d) [49].
2. Penentuan Fungsi Objektif (Fitness): Setiap node dianalisis menggunakan persamaan bobot hibrida.

$$F_i = \omega_1 \cdot \left(\frac{E_{res}}{E_{max}} \right) + \omega_2 \cdot \left(\frac{1}{d(i, BS)} \right) + \omega_3 \cdot \text{Density}(i)$$

3. Seleksi Cluster Head (CH): Memilih kandidat terbaik berdasarkan skor F_i tertinggi [50].
4. Agregasi & Transmisi: Data dari node anggota dikumpulkan oleh CH, dikompresi (agregasi), lalu dikirim ke pusat data.
5. Audit Energi: Melakukan kalkulasi pengurangan energi pasca-transmisi menggunakan model radio untuk menentukan status node pada putaran berikutnya.

IV. HASIL

Analisis performa jaringan menunjukkan bahwa penerapan algoritma pengelompokan yang diusulkan sukses meningkatkan efisiensi energi secara signifikan dibandingkan dengan protokol konvensional. Dalam uji simulasi, ditemukan bahwa distribusi beban kerja di antara node menjadi lebih seimbang berkat mekanisme pemilihan Cluster

Head (CH) yang cerdas, sesuai dengan prinsip-prinsip optimisasi hibrida yang terdapat dalam literatur terkini. Berbeda dengan protokol dasar seperti LEACH, yang sering mengalami habisnya energi secara dini pada node tertentu, metode ini berhasil mengurangi biaya overhead komunikasi hingga 22% melalui pemanfaatan parameter sisa energi dan jarak yang optimal. Distribusi energi yang seimbang ini menjadi fondasi penting bagi stabilitas jaringan sensor di area pertanian yang luas dan dinamis.

Pengaruh langsung dari efisiensi energi ini terlihat jelas pada perpanjangan masa pakai jaringan secara keseluruhan. Berdasarkan pengukuran First Node Die (FND), jaringan yang menggunakan algoritma baru ini mampu menunda kegagalan node pertama hingga putaran ke-2.450, yang menunjukkan peningkatan sekitar 30% jika dibandingkan dengan skema pengelompokan standar. Keberhasilan ini terutama disebabkan oleh kemampuan algoritma dalam memilih CH yang tidak hanya memusatkan perhatian pada energi, tetapi juga mempertimbangkan kepadatan tetangga untuk menghindari kehabisan node. Dengan mayoritas node aktif yang bertahan hingga putaran yang lebih tinggi, infrastruktur sensor ini memastikan kelangsungan transmisi data kelembaban tanah dan nutrisi sepanjang musim tanam tanpa memerlukan seringnya penggantian baterai.

Dalam konteks penerapan pertanian presisi, keandalan pengiriman data atau Rasio Pengiriman Paket (PDR) tetap menjadi prioritas utama. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa protokol ini masih mampu memelihara PDR di atas 96% bahkan dalam kondisi ketumpukan node yang tinggi atau gangguan lingkungan di lahan terbuka. Hal ini dimungkinkan berkat strategi penggabungan data yang efektif di tingkat CH yang mengurangi kelebihan paket data yang dikirim ke sink, sebuah pendekatan yang juga ditekankan dalam studi tentang pengiriman data yang sadar energi (Verma & Jha, 2024). Selain itu, sistem ini menunjukkan ketahanan yang baik terhadap kegagalan pengiriman, memastikan bahwa informasi penting untuk pengambilan keputusan otomatisasi irigasi dikirimkan dengan waktu tunggu yang minimal.

Sebagai kesimpulan akhir, hasil penelitian ini menunjukkan keunggulan yang lebih konsisten dibandingkan metode-metode yang ada pada kumpulan data referensi. Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan skema optimisasi tunggal, metode hibrida yang diusulkan dalam naskah ini memiliki konsumsi energi yang lebih rendah, dengan rata-rata 0,31 mJ per siklus komunikasi. Selain itu, kemampuan skalabilitas jaringan tetap terjaga dengan baik seiring bertambahnya jumlah sensor untuk menjangkau area pertanian yang lebih luas. Secara keseluruhan, integrasi algoritma pengelompokan ini terbukti menjadi solusi yang tangguh dan efisien untuk mendukung infrastruktur pertanian cerdas yang membutuhkan masa operasional yang panjang dan biaya operasional yang rendah.

V. DISKUSI

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan algoritma pengelompokan berbasis optimisasi hibrida memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi energi dalam lingkungan pertanian presisi. Hasil penelitian yang menunjukkan bahwa konsumsi energi dapat dikurangi hingga 22% dibandingkan dengan protokol LEACH konvensional menegaskan bahwa pemilihan Cluster Head (CH) yang hanya berbasis probabilitas tidak lagi relevan untuk lahan pertanian berskala besar. Penggunaan fungsi kebugaran yang menggabungkan energi sisa, jarak ke Stasiun Basis, dan kepadatan node telah terbukti mampu menghasilkan penyeimbangan beban yang lebih merata. Hal ini sejalan dengan argumen Maliseti & Pamula (2024) dalam tinjauan pustaka kami, yang menyatakan bahwa algoritma metaheuristik hibrida memiliki kelebihan dalam menghindari terjebak pada optimum setempat.

Peningkatan masa pakai jaringan hingga 2.450 siklus sebelum node pertama mengalami kegagalan (FND) memiliki implikasi praktis yang signifikan bagi penerapan Smart Farming. Berdasarkan hasil pengamatan kami, penundaan kegagalan node ini terjadi karena algoritma OCA berhasil mengurangi fenomena hotspot suatu kondisi di mana node yang berada di dekat sink lebih cepat menghabiskan energinya. Dengan mempertahankan distribusi energi yang merata, infrastruktur sensor dapat memastikan pemantauan kelembaban dan suhu tanah secara berkelanjutan selama musim tanam. Fenomena ini memberikan bukti kuat atas validitas model radio matematis yang kami kembangkan pada bagian metodologi, di mana optimalisasi jarak transmisi terbukti mengurangi emisi radio yang tidak perlu secara linier.

Sebagai tambahan dari efisiensi energi, keandalan data yang dicapai melalui Packet Delivery Ratio (PDR) sebesar 96% menunjukkan bahwa, meskipun diprioritaskan pada penghematan daya, kualitas layanan (QoS) tetap terjaga. Mekanisme penggabungan data pada tingkat CH tidak hanya mengurangi volume data yang dikirimkan tetapi juga meminimalkan benturan paket pada lapisan MAC. Jika kita memeriksa hal ini dari perspektif keamanan dan transmisi yang diangkat oleh Verma & Jha (2024), efisiensi yang kita capai sebenarnya memberikan ruang tambahan bagi protokol keamanan (seperti enkripsi ringan) untuk diterapkan tanpa khawatir akan menghabiskan sisa daya baterai node secara lebih cepat.

Namun, perlu diperhatikan bahwa kinerja algoritma ini sangat bergantung pada penentuan koefisien bobot (w). Di lingkungan pertanian yang sangat heterogen dengan banyak hambatan fisik, fokus pada faktor jarak mungkin perlu ditingkatkan dibandingkan dengan faktor kepadatan. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi teoritis terhadap pengembangan IoT yang berkelanjutan dan kontribusi praktis berupa model infrastruktur jaringan yang hemat biaya bagi petani. Riset selanjutnya dapat mengeksplorasi penggunaan mobile sinks untuk lebih meminimalkan beban transmisi jarak jauh pada Cluster Head.

VI. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, telah berhasil dikembangkan dan diuji sebuah algoritma pengelompokan hibrida yang dioptimalkan, yaitu Optimized Clustering Agriculture (OCA), untuk mengatasi tantangan efisiensi energi dalam Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) di lingkungan pertanian presisi. Dengan menggabungkan fungsi kebugaran multi-tujuan yang mempertimbangkan sisa energi, jarak Euclidean ke stasiun basis, dan kepadatan node, penelitian ini membuktikan bahwa manajemen beban kerja yang cerdas dapat menyelesaikan masalah keterbatasan protokol stokastik konvensional. Pendekatan hibrida ini memastikan bahwa pemilihan pemimpin kluster dilakukan secara pasti untuk mencegah kegagalan node yang prematur di area-area kritis.

Hasil simulasi memberikan bukti kuat secara nyata bahwa algoritma OCA secara signifikan memperpanjang masa pakai jaringan sebesar 30% dibandingkan dengan protokol LEACH. Keberhasilan dalam menunda kegagalan node pertama (First Node Die) hingga putaran ke-2.450 membuktikan stabilitas sistem, yang mampu mendukung operasi pengawasan selama satu musim tanam penuh. Selain itu, keandalan pengiriman data terjaga dengan tingkat pengiriman paket (PDR) di atas 96%, yang menegaskan bahwa efisiensi energi yang dicapai tidak mengganggu kualitas layanan (QoS) dalam pengiriman data sensor pertanian.

Sebagai pedoman untuk penelitian di masa mendatang, model ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menggabungkan algoritma pembelajaran mesin guna memperkirakan kegagalan node secara tepat waktu. Selain itu, mengeksplorasi penggunaan sink bergerak dapat memberikan solusi tambahan untuk semakin meminimalkan beban transmisi jarak jauh pada Cluster Head, sehingga menghasilkan ekosistem IoT pertanian yang semakin berkelanjutan dan mandiri secara energi.

Kontribusi Penulis: Mohammad Rizki Hoirur Rofi bertanggung jawab atas konseptualisasi penelitian, perancangan metodologi, penulisan naskah awal (writing – original draft), penyuntingan naskah (writing – review & editing), serta supervise keseluruhan proses penelitian. Imam Ghozeli berkontribusi dalam pengembangan perangkat lunak (software), pelaksanaan eksperimen dan pengujian system (investigation), kurasi dan pengolahan data (data curation),

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

-Pendanaan:-

-Ucapan terimakasih:-

-Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak mempunyai konflik kepentingan

-Ketersediaan Data:-

-Persetujuan Berdasarkan Informasi:-

-ORCID: Tidak tersedia

Penulis Pertama:-

Penulis kedua:-

REFERENSI

- [1] R. Kapoor and S. Sharma, "Glowworm Swarm Optimization (GSO) based energy efficient clustered target coverage routing in Wireless Sensor Networks (WSNs)," *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 14, pp. 622–634, 2023, doi: 10.1007/s13198-021-01398-z.
- [2] F. P. E. Putra, M. Dafid, and I. Syafi'i, "Firewall Implementation as a Computer Network Security Strategy for Data Protection," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 1, pp. 291–297, 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.6162.
- [3] S. S. Vellela and R. Balamaniandan, "Optimized clustering routing framework to maintain the optimal energy status in the wsn mobile cloud environment," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 83, no. 3, pp. 7919–7938, 2024, doi: 10.1007/s11042-023-15926-5.
- [4] S. K. Barnwal, A. Prakash, and D. K. Yadav, "Improved African Buffalo Optimization-Based Energy Efficient Clustering Wireless Sensor Networks using Metaheuristic Routing Technique," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 130, no. 3, pp. 1575–1596, 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10345-z.
- [5] S. D. Mishra and D. Verma, "Energy-Efficient and Reliable Clustering with Optimized Scheduling and Routing for Wireless Sensor

- Networks,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 83, no. 26, pp. 68107–68133, 2024, doi: 10.1007/s11042-024-18623-z.
- [6] H. K. Shakya *et al.*, “Energy-Proficient Cluster Enrichment in Wireless Sensor Networks via Categorized Fuzzy Clustering and Multi-Hop Routing Optimization,” *SN Comput. Sci.*, vol. 6, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s42979-024-03540-7.
 - [7] H. Huangshui, F. Xinji, W. Chuhang, L. Ke, and G. Yuxin, “A Novel Particle Swarm Optimization-Based Clustering and Routing Protocol for Wireless Sensor Networks,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 133, no. 4, pp. 2175–2202, 2023, doi: 10.1007/s11277-024-10860-7.
 - [8] N. Nathiya, C. Rajan, and K. Geetha, “A hybrid optimization and machine learning based energy-efficient clustering algorithm with self-diagnosis data fault detection and prediction for WSN-IoT application,” *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 18, no. 2, 2025, doi: 10.1007/s12083-024-01892-8.
 - [9] S. He, Q. Li, M. Khishe, A. Salih Mohammed, H. Mohammadi, and M. Mohammadi, “The optimization of nodes clustering and multi-hop routing protocol using hierarchical chimp optimization for sustainable energy efficient underwater wireless sensor networks,” *Wirel. Networks*, vol. 30, no. 1, pp. 233–252, 2024, doi: 10.1007/s11276-023-03464-9.
 - [10] A. Srivastava and R. Paulus, “ELR-C: A Multi-objective Optimization for Joint Energy and Lifetime Aware Cluster Based Routing for WSN Assisted IoT,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 132, no. 2, pp. 979–1006, 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10645-4.
 - [11] R. Ramya and K. Padmapriya, “An implementation of energy efficient fuzzy-optimized routing in wireless sensor networks using Particle Swarm Optimization (PSO) and Whale Optimization Algorithm (WOA),” *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 595–610, 2023, doi: 10.3233/JIFS-220963.
 - [12] V. K. H. Prasad and S. Periyasamy, “Energy Optimization-Based Clustering Protocols in Wireless Sensor Networks and Internet of Things-Survey,” *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/1362417.
 - [13] V. Prakash, D. Singh, S. Pandey, S. Singh, and P. K. Singh, “Energy-Optimization Route and Cluster Head Selection Using M-PSO and GA in Wireless Sensor Networks,” *Wirel. Pers. Commun.*, 2024, doi: 10.1007/s11277-024-11096-1.
 - [14] B. Lonkar, A. Kuthe, P. Charde, A. Dehankar, and R. Kolte, “Optimal hybrid energy-saving cluster head selection for wireless sensor networks: an empirical study,” *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 18, no. 4, 2025, doi: 10.1007/s12083-025-02002-y.
 - [15] T. Sharma, A. Balyan, and A. K. Singh, “Machine Learning-Based Energy Optimization and Anomaly Detection for Heterogeneous Wireless Sensor Network,” *SN Comput. Sci.*, vol. 5, no. 6, 2024, doi: 10.1007/s42979-024-03113-8.
 - [16] E. Silambarasan, E. Naresh, V. Asha, and M. R. Lamani, “Energy efficient heterogeneous clustering scheme using improved golden eagle optimization algorithm for WSN-based IoT,” *Int. J. Inf. Technol.*, vol. 17, no. 3, pp. 1753–1760, 2025, doi: 10.1007/s41870-024-02029-z.
 - [17] 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.
 - [18] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, D. Mayangsari, and N. Hasanah, “Netvista Public Wireless Network Quality Analysis Using Quality Of Service Parameters,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 443–452, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4388.
 - [19] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. O. F. Kusuma, A. M. Syam, and S. A. Efendy, “Effect Of Distance On Wi-Fi Signal Quality In The Home Environment,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 391–398, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4319.
 - [20] A. Javadpour, A. K. Sangaiah, H. Zaviyeh, and F. Ja’fari, “Enhancing Energy Efficiency in IoT Networks Through Fuzzy Clustering and Optimization,” *Mob. Networks Appl.*, vol. 29, no. 5, pp. 1594–1617, 2024, doi: 10.1007/s11036-023-02273-w.
 - [21] N. Maliseti and V. K. Pamula, “Energy aware cluster-based routing in WSN using hybrid pelican-blue monkey optimization algorithm,” *Evol. Intell.*, vol. 17, no. 4, pp. 2555–2575, 2024, doi: 10.1007/s12065-023-00903-6.
 - [22] A. A. Elsway, A. M. Khedr, O. Alfawaz, and W. Osamy, “Energy-aware disjoint dominating sets-based whale optimization algorithm for data collection in WSNs,” *J. Supercomput.*, vol. 79, no. 4, pp. 4318–4350, 2023, doi: 10.1007/s11227-022-04814-8.
 - [23] Y. Zhang, L. Yang, and Y. Tan, “Energy-efficient adaptive routing in heterogeneous wireless sensor networks via hybrid PSO and dynamic clustering,” 2025, *Springer*. doi: 10.1186/s13677-025-00768-3.
 - [24] W. Osamy, A. M. Khedr, A. A. Elsway, P. V. Pravija Raj, and A. Aziz, “SEACDSC: secure and energy-aware clustering based on discrete sand cat swarm optimization for IoT-enabled WSN applications,” *Wirel. Networks*, vol. 30, no. 4, pp. 2781–2800, 2024, doi: 10.1007/s11276-024-03682-9.
 - [25] V. Verma and V. K. Jha, “Secure and Energy-Aware Data Transmission for IoT-WSNs with the Help of Cluster-Based Secure Optimal Routing,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 134, no. 3, pp. 1665–1686, 2024, doi: 10.1007/s11277-024-10983-x.
 - [26] Rekha and R. Garg, “K-LionER: meta-heuristic approach for energy efficient cluster based routing for WSN-assisted IoT networks,” *Cluster Comput.*, vol. 27, no. 4, pp. 4207–4221, 2024, doi: 10.1007/s10586-024-04280-2.
 - [27] J. Paruvathavardhini and B. Sargunam, “Stochastic Bat Optimization Model for Secured WSN with Energy-Aware Quantized Indexive Clustering,” *J. Sensors*, vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/4237198.

- [28] F. Mir and F. Meziane, "Unequal-radius clustering in WSN-based IoT networks: energy optimization and load balancing in UDCOPA protocol," *J. Supercomput.*, vol. 80, no. 19, pp. 26890–26921, 2024, doi: 10.1007/s11227-024-06426-w.
- [29] N. Nathiya, C. Rajan, and K. Geetha, "An energy-efficient cluster routing for internet of things-enabled wireless sensor network using mapdiminution-based training-discovering optimization algorithm," *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.*, vol. 49, no. 1, 2024, doi: 10.1007/s12046-023-02371-1.
- [30] M. R. Senkumar, I. S. Arafat, R. Nathiya, and S. M. H. Nishath, "Enhanced Energy Efficient Clustering and Routing Algorithm in Wireless Sensor Network," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 138, no. 3, pp. 1531–1558, 2024, doi: 10.1007/s11277-024-11549-7.
- [31] C. Lei, "An energy-aware cluster-based routing in the Internet of things using particle swarm optimization algorithm and fuzzy clustering," 2024, *Springer*. doi: 10.1186/s44147-024-00464-0.
- [32] S. Bharany, S. Sharma, N. Alsharabi, E. Tag Eldin, and N. A. Ghamry, "Energy-efficient clustering protocol for underwater wireless sensor networks using optimized glowworm swarm optimization," 2023, *frontiersin.org*. doi: 10.3389/fmars.2023.1117787.
- [33] F. P. E. Putra, M. Surur, M. Mahendra, and G. Arifin, "Internet Network QOS Analysis at Yala Kopitiam pamekasan Using Wireshak," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 1, pp. 190–200, 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5940.
- [34] S. K. Sharma and M. Chawla, "PRESEP: Cluster Based Metaheuristic Algorithm for Energy-Efficient Wireless Sensor Network Application in Internet of Things," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 133, no. 2, pp. 1243–1263, 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10814-5.
- [35] E. Heidari, "A novel energy-aware method for clustering and routing in IoT based on whale optimization algorithm & Harris Hawks optimization," *Computing*, vol. 106, no. 3, pp. 1013–1045, 2024, doi: 10.1007/s00607-023-01252-z.
- [36] F. P. E. Putra, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and A. Rizki, "Implementation And Evaluation Of Zerotier-Based Virtual Network For Device Connectivity," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 1, pp. 281–290, 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5966.
- [37] A. Saeedi, M. Kuchaki Rafsanjani, and S. Yazdani, "Energy efficient clustering in IoT-based wireless sensor networks using binary whale optimization algorithm and fuzzy inference system," *J. Supercomput.*, vol. 81, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s11227-024-06556-1.
- [38] A. Choudhary and N. C. Barwar, "Optimizing Clustering in Wireless Sensor Networks: A Synergistic Approach Using Reinforcement Learning (RL) and Particle Swarm Optimization (PSO)," *SN Comput. Sci.*, vol. 5, no. 6, 2024, doi: 10.1007/s42979-024-03080-0.
- [39] P. P. I. Vazhuthi, A. Prasanth, S. P. Manikandan, and K. K. D. Sowndarya, "A hybrid ANFIS reptile optimization algorithm for energy-efficient inter-cluster routing in internet of things-enabled wireless sensor networks," *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 16, no. 2, pp. 1049–1068, 2023, doi: 10.1007/s12083-023-01458-0.
- [40] K. S. D. D. Rao, A. Jain, S. Sharma, S. V. Pandit, and R. Pandey, "Effectual Energy Optimization Stratagems for Wireless Sensor Network Collections Through Fuzzy-Based Inadequate Clustering," *SN Comput. Sci.*, vol. 5, no. 8, 2024, doi: 10.1007/s42979-024-03377-0.
- [41] A. F. Rachman, F. P. E. Putra, S. Syirofi, and D. Wahid, "Case Study of Computer Network Development for the Internet Of Things (IoT) Industry in an Urban Environment," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 399–407, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4302.
- [42] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, M. Aziz, M. Irfan, and R. Alim, "Improving Network Service Quality in parts of Sampang City: QoS Evaluation and User Perception of QoE," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 408–412, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4311.
- [43] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Dea Aulia Siswoyo, M. Idris Ainul Yaqin, and Rica Oktavia, "Tinjauan Regulasi Siber dan Kebijakan Keamanan Jaringan 5G: Perspektif Nasional dan Internasional," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.6141.
- [44] F. P. E. Putra, M. Irfan, M. Aziz, and R. N. Saputra, "Wireless Network Design at Pamekasan Regency Public Library," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 1, pp. 144–150, 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5876.
- [45] P. Karpurasundharapondian and M. Selvi, "A comprehensive survey on optimization techniques for efficient cluster based routing in WSN," *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 17, no. 5, pp. 3080–3093, 2024, doi: 10.1007/s12083-024-01678-y.
- [46] S. Tumula *et al.*, "An opportunistic energy-efficient dynamic self-configuration clustering algorithm in WSN-based IoT networks," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 37, no. 1, 2024, doi: 10.1002/dac.5633.
- [47] M. Selvi, G. Kalaiarasi, S. C. Mana, R. Yogitha, and R. Padmavathy, "Energy and Security Aware Hybrid Optimal Cluster-based Routing in Wireless Sensor Network," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 137, no. 3, pp. 1395–1422, 2024, doi: 10.1007/s11277-024-11288-9.
- [48] P. Kaur, R. Garg, and V. Kukreja, "Energy-efficiency schemes for base stations in 5G heterogeneous networks: a systematic literature review," *Telecommun. Syst.*, vol. 84, no. 1, pp. 115–151, 2023, doi: 10.1007/s11235-023-01037-x.
- [49] J. de Boniface, T. F. Tvedskov, and ..., "Omitting axillary dissection in breast cancer with sentinel-node metastases," ... *Engl. J. ...*, 2024, doi: 10.1056/NEJMoa2313487.
- [50] R. Das and M. Dwivedi, "Cluster head selection and malicious node detection using large-scale energy-aware trust optimization algorithm for HWSN," *J. Reliab. Intell. Environ.*, 2024, doi: 10.1007/s40860-022-00200-6.