

Analisis Literatur Sistematis tentang Algoritma Klasterisasi Dinamis untuk Perpanjangan Masa Pakai WSN

Yuris Ikrar Rabbani ^{1)*} , Giovani Sapta Purnama ²⁾ 

¹⁾²⁾Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾yurisikrar78@gmail.com ²⁾gioding123@gmail.com

Abstrak

Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) sangat dibatasi oleh sumber daya energi node, menjadikan perpanjangan masa pakai jaringan sebagai tantangan utama. Klasterisasi diakui sebagai teknik fundamental untuk menghemat energi dengan mengurangi transmisi data jarak jauh, di mana node diorganisasi menjadi kelompok dan memilih seorang Cluster Head (CH) untuk agregasi data. Namun, WSN beroperasi di lingkungan yang dinamis—dengan topologi dan tingkat energi yang terus berubah—membuat algoritma klasterisasi statis gagal beradaptasi secara efisien. Oleh karena itu, Algoritma Klasterisasi Dinamis muncul sebagai solusi yang lebih cerdas, memungkinkan penyesuaian CH dan anggota klaster secara berkala berdasarkan kondisi real-time seperti tingkat energi residu, jarak antar-node, dan kepadatan klaster. Analisis Literatur Sistematis (SLR) ini bertujuan untuk secara kritis mengidentifikasi, menganalisis, dan mensintesis penelitian terkini mengenai algoritma dinamis yang dirancang khusus untuk perpanjangan masa pakai WSN. Secara khusus, tinjauan ini akan mengeksplorasi algoritma inovatif yang mengintegrasikan teknik-teknik canggih seperti logika fuzzy untuk pengambilan keputusan yang tidak pasti, machine learning untuk prediksi kondisi jaringan, dan optimasi berbasis swarm untuk pemilihan CH yang adaptif. Kami akan meninjau metrik kinerja utama, termasuk peningkatan umur node pertama yang mati (First Node Dead/FND), masa pakai jaringan total, dan keseimbangan beban energi di seluruh jaringan. Hasil SLR ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai keadaan seni, secara jelas menyoroti keunggulan dan kelemahan dari berbagai pendekatan klasterisasi dinamis, serta mengidentifikasi kesenjangan dan arah penelitian di masa depan yang paling menjanjikan guna memandu pengembangan protokol klasterisasi yang lebih efisien energi dan andal untuk WSN generasi berikutnya.

Kata Kunci: Wireless Sensor Network, Klasterisasi Dinamis, Perpanjangan Masa Pakai Jaringan, Efisiensi Energi, Cluster Head (CH).

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

I. PENDAHULUAN

Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) telah berkembang menjadi infrastruktur fundamental dalam berbagai aplikasi pemantauan modern, mulai dari observasi lingkungan, pertanian presisi, hingga sistem pengawasan militer. Namun, hambatan utama yang membatasi skalabilitas dan keberlanjutan operasional WSN adalah keterbatasan sumber daya energi pada node sensor yang umumnya bergantung pada baterai dengan kapasitas terbatas dan sulit untuk diisi ulang di lapangan [1], [2]. Efisiensi energi, oleh karena itu, bukan sekadar indikator kinerja tambahan, melainkan prasyarat mutlak untuk memperpanjang masa pakai jaringan (network lifetime). Di tengah berbagai strategi konservasi energi, teknik klasterisasi (clustering) telah diakui secara luas sebagai metode yang efektif untuk mereduksi konsumsi energi. Mekanisme ini bekerja dengan meminimalkan transmisi data jarak jauh dan melakukan agregasi data melalui Cluster Head (CH) sebelum dikirimkan ke Base Station [3], [4].

Meskipun protokol klasterisasi klasik telah banyak dikembangkan, sebagian besar pendekatan awal bersifat statis dan kurang responsif terhadap fluktuasi kondisi jaringan. Dalam lingkungan operasional WSN yang dinamis, topologi jaringan dan tingkat energi node mengalami perubahan secara real-time [4], [5]. Algoritma statis sering kali gagal menyeimbangkan distribusi beban energi secara merata, yang mengakibatkan fenomena hotspot di mana CH mengalami pengurasan energi yang prematur dan menyebabkan putusnya konektivitas jaringan. Keterbatasan ini mendorong evolusi paradigma penelitian menuju Algoritma Klasterisasi Dinamis. Pendekatan ini memungkinkan rotasi peran CH dan rekonfigurasi anggota klaster secara adaptif berdasarkan parameter sesaat, seperti energi residu, jarak Euclidian antar-node, dan kepadatan tetangga, guna memastikan distribusi beban yang lebih seimbang [6], [7], [8].

Penting untuk dicatat bahwa tren penelitian terkini telah mengintegrasikan berbagai teknik cerdas untuk meningkatkan adaptabilitas algoritma dinamis. Sejumlah studi telah mengusulkan penggunaan logika Fuzzy untuk

*) Yuris Ikrar Rabbani

menangani ketidakpastian dalam pengambilan keputusan pemilihan CH, sementara penelitian lain mengeksplorasi efektivitas optimasi berbasis Swarm Intelligence seperti Particle Swarm Optimization (PSO)[9] dan Ant Colony Optimization (ACO)[10] untuk optimasi rute dan pembentukan kluster. Selain itu, integrasi Machine Learning mulai diterapkan untuk memprediksi pola kegagalan node dan efisiensi energi. Namun, literatur yang ada saat ini cenderung membahas protokol-protokol tersebut secara terfragmentasi atau hanya berfokus pada modifikasi protokol standar seperti LEACH[11], [12]. Belum banyak studi Tinjauan Literatur Sistematis (SLR) yang secara komprehensif membandingkan efektivitas gabungan dari pendekatan Fuzzy, Swarm, dan Machine Learning secara spesifik terhadap metrik kritis masa pakai jaringan, seperti First Node Dead (FND) dan keseimbangan beban energi total. Ketidadaan sintesis yang menyeluruh ini menciptakan kesenjangan pengetahuan yang menyulitkan peneliti untuk menentukan pendekatan yang paling optimal untuk skenario dinamis tertentu[13], [14], [15].

Penelitian ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan tersebut melalui Analisis Literatur Sistematis (SLR) yang mendalam terhadap algoritma klusterisasi dinamis mutakhir. Kontribusi utama ini adalah menyediakan taksonomi komprehensif mengenai algoritma dinamis berbasis kecerdasan buatan, mengevaluasi kinerja algoritma tersebut berdasarkan metrik validitas masa pakai jaringan, serta mengidentifikasi arah penelitian masa depan yang strategis. Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan panduan teoretis dan praktis yang signifikan bagi pengembangan protokol WSN generasi berikutnya yang menuntut efisiensi energi tinggi dan keandalan operasional yang lebih baik.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) terdiri dari ratusan hingga ribuan node sensor otonom yang tersebar secara spasial untuk memantau kondisi fisik atau lingkungan[16], [17]. Tantangan mendasar dalam desain WSN adalah keterbatasan sumber daya energi, mengingat node sensor umumnya ditenagai oleh baterai dengan kapasitas terbatas yang sering kali tidak praktis atau mustahil untuk diganti, terutama di area yang sulit dijangkau. Konsumsi energi terbesar dalam operasional node didominasi oleh modul komunikasi radio, khususnya saat transmisi data jarak jauh menuju Base Station (BS)[18], [19], [20]. Oleh karena itu, perpanjangan masa pakai jaringan (network lifetime) menjadi metrik kinerja utama. Masa pakai ini sering didefinisikan melalui parameter statistik seperti First Node Dead (FND)[21], [22], Half Node Dead (HND)[23], dan Last Node Dead (LND)[24], di mana kegagalan satu node pun dapat memengaruhi konektivitas dan cakupan area pemantauan secara signifikan.

Untuk memitigasi kendala energi tersebut, teknik klusterisasi hierarkis telah diadopsi secara luas sebagai solusi arsitektur yang efisien. Dalam mekanisme ini, node diorganisasi ke dalam kelompok-kelompok kluster, di mana setiap kluster dipimpin oleh seorang Cluster Head (CH). CH bertugas mengumpulkan data dari anggota kluster, melakukan agregasi untuk menghilangkan redundansi data, dan meneruskan data yang telah diproses ke BS[25], [26], [27]. Protokol LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) dikenal sebagai standar baseline dalam teknik ini, yang memperkenalkan konsep rotasi peran CH secara probabilistik untuk mendistribusikan beban energi. Namun, kelemahan mendasar dari pendekatan klasik seperti LEACH[28] adalah pemilihan CH yang murni acak sering kali mengabaikan parameter krusial seperti energi sisa dan lokasi geografis node, yang dapat menyebabkan kematian dini pada node dengan energi rendah yang secara tidak sengaja terpilih sebagai CH[29], [30], [31].

Keterbatasan pada pendekatan statis dan probabilistik murni tersebut telah mendorong pergeseran paradigma menuju algoritma klusterisasi dinamis. Berbeda dengan pendekatan statis, algoritma dinamis dirancang untuk beradaptasi dengan fluktuasi topologi dan status energi jaringan secara real-time, memandang pemilihan CH sebagai masalah optimasi multi-objektif [32], [33], [34]. Algoritma modern mengintegrasikan kecerdasan komputasional, seperti logika Fuzzy untuk menangani ketidakpastian input energi dan jarak, serta algoritma berbasis Swarm Intelligence (seperti PSO, ACO, dan GWO) untuk menemukan solusi optimal global dalam ruang pencarian yang kompleks. Selain itu, pendekatan berbasis Machine Learning juga mulai diterapkan untuk memprediksi kandidat CH terbaik berdasarkan pola data historis[35], [36]. Keunggulan utama dari klusterisasi dinamis adalah kemampuannya menyeimbangkan beban energi (load balancing) secara presisi, sehingga memperpanjang interval waktu hingga terjadinya FND [33], [37], [38].

Meskipun ranah penelitian ini berkembang pesat, tinjauan literatur yang ada saat ini masih memiliki keterbatasan tertentu. Sebagian besar studi survei sebelumnya cenderung berfokus pada klasifikasi protokol berdasarkan struktur jaringan atau homogenitas node secara umum, tanpa mendalami efektivitas spesifik dari algoritma hibrida cerdas. Terdapat kekurangan dalam analisis yang secara komprehensif membandingkan kinerja gabungan teknik Fuzzy-Swarm atau ML-Swarm terhadap metrik validitas masa pakai. Penelitian ini hadir untuk melengkapi kesenjangan tersebut dengan menyajikan tinjauan sistematis terhadap perkembangan algoritma dinamis dalam kurun waktu lima tahun terakhir, memberikan sintesis kritis mengenai bagaimana teknik-teknik adaptif ini berkontribusi langsung terhadap efisiensi energi dan stabilitas jaringan jangka panjang.

III. METODE

Penelitian ini mengadopsi pendekatan tinjauan literatur sistematis (*Systematic Literature Review/SLR*)[14], [39] yang bertujuan untuk melakukan evaluasi komprehensif terhadap perkembangan algoritma klasterisasi dinamis pada *Wireless Sensor Network (WSN)*, dengan fokus utama pada efektivitasnya dalam perpanjangan masa pakai jaringan (*network lifetime extension*). Metode ini tidak melibatkan eksperimen fisik maupun simulasi ulang, melainkan berfokus pada meta-analisis terhadap data kinerja dari studi primer terdahulu yang relevan dan kredibel. Kerangka kerja penelitian dirancang secara sistematis melalui empat tahapan utama: (A) perumusan kriteria dan akuisisi literatur, (B) prosedur analisis data algoritmik, (C) evaluasi komparatif berdasarkan klasifikasi kecerdasan komputasional, serta (D) sintesis temuan untuk identifikasi celah penelitian. Pendekatan terstruktur ini dipilih guna memperoleh pemahaman holistik mengenai mekanisme adaptif, keunggulan, serta limitasi dari teknik klasterisasi dinamis terkini[5], [40].

A. Pengumpulan Literatur dan Kriteria Seleksi

Tahap akuisisi data dilakukan dengan menelusuri literatur ilmiah dari basis data akademik global, khususnya Google Scholar, IEEE Xplore, dan Scopus, dengan bantuan perangkat lunak *Publish or Perish 8*. Proses penyaringan literatur menerapkan mekanisme inklusi dan eksklusi yang ketat. Kriteria seleksi difokuskan secara spesifik pada:

1. **Relevansi Topik:** Artikel harus membahas algoritma klasterisasi yang bersifat dinamis (adaptif terhadap perubahan topologi/energi), bukan klasterisasi statis konvensional.
2. **Kredibilitas Sumber:** Sumber dibatasi pada jurnal bereputasi dan prosiding konferensi internasional untuk menjamin validitas metodologi simulasi yang digunakan.
3. **Kebaruan:** Prioritas diberikan pada penelitian lima tahun terakhir yang mengintegrasikan teknik cerdas (*intelligent techniques*) dalam mekanisme pemilihan *Cluster Head*.

Literatur yang lolos verifikasi kemudian ditetapkan sebagai data primer untuk proses analisis selanjutnya[39], [41].

B. Metode Analisis Data

Penelitian ini menerapkan metode analisis isi (*content analysis*)[42] dengan pendekatan deskriptif kualitatif. Setiap artikel dibedah untuk mengekstraksi parameter teknis yang membedakan satu algoritma dengan yang lain[43]. Ekstraksi data difokuskan pada identifikasi aspek-aspek kunci berikut:

1. **Parameter Input:** Variabel yang digunakan dalam pengambilan keputusan (misalnya: energi residu, jarak ke *Base Station*, kepadatan tetangga).
2. **Mekanisme Adaptasi:** Bagaimana algoritma menangani perubahan dinamis jaringan (re-clustering periodik vs. *event-driven*).
3. **Teknik Optimasi:** Jenis kecerdasan buatan yang digunakan untuk pemilihan *Cluster Head*.
4. **Metrik Validasi:** Standar pengukuran masa pakai yang dilaporkan (FND, HND, LND).

C. Analisis Tematik dan Komparatif

Analisis dilakukan secara tematik dengan mengklasifikasikan penelitian berdasarkan pendekatan algoritmik utama, meliputi pendekatan berbasis Logika *Fuzzy*, optimasi berbasis kerumunan (*Swarm Intelligence* seperti PSO/ACO), serta pendekatan berbasis Pembelajaran Mesin (*Machine Learning*) dan Hibrida.

Evaluasi komparatif dilakukan untuk mengukur efektivitas relatif dari setiap kategori algoritma terhadap efisiensi energi[44], [45]. Perbandingan ini didasarkan pada parameter kinerja vital, yaitu:

1. **Network Lifetime Metrics:** Peningkatan durasi hingga *First Node Dead* (FND) dan *Last Node Dead* (LND)[46].
2. **Keseimbangan Beban Energi:** Kemampuan algoritma mendistribusikan konsumsi energi secara merata di seluruh *node*[47].
3. **Throughput & Stabilitas:** Jumlah paket data sukses dan stabilitas topologi klaster.
4. **Kompleksitas Komputasi:** *Overhead* yang dihasilkan oleh algoritma dinamis tersebut.

Hasil pengelompokan ini disajikan dalam tabel perbandingan pada bagian Hasil dan Pembahasan untuk memudahkan interpretasi.

D. Sintesis Temuan dan Identifikasi Celah Penelitian

Tahap akhir melibatkan sintesis temuan untuk menarik kesimpulan general mengenai algoritma dinamis mana yang paling unggul dalam skenario tertentu. Bagian ini juga bertujuan untuk memetakan celah penelitian (*research gap*) dan peluang pengembangan masa depan. Secara khusus, penelitian ini menyoroti potensi integrasi algoritma dinamis dengan teknologi *Internet of Things (IoT)* skala besar dan komputasi tepi (*Edge Computing*)[29], [48], [49]. Dengan demikian, metode ini berfungsi sebagai pendekatan sistematis untuk menilai kemajuan teknik klasterisasi adaptif dalam menjawab tantangan efisiensi energi pada WSN generasi baru[50].

IV. HASIL

Berdasarkan strategi pencarian sistematis dan kriteria seleksi yang telah diuraikan pada bagian metode, penelitian ini berhasil mengidentifikasi dan menyaring sejumlah literatur primer yang relevan dengan pengembangan algoritma klasterisasi dinamis pada WSN. Hasil penelusuran awal menunjukkan bahwa tren publikasi mengenai topik ini mengalami peningkatan signifikan dalam lima tahun terakhir, yang mengindikasikan tingginya urgensi komunitas ilmiah dalam memecahkan masalah efisiensi energi pada jaringan sensor. Proses penyaringan bertahap menghasilkan himpunan data akhir yang terdiri dari studi-studi yang secara eksplisit mengusulkan mekanisme rotasi Cluster Head (CH) adaptif dan memberikan validasi kuantitatif terhadap metrik masa pakai jaringan. Bagian ini menyajikan sintesis data dari studi terpilih tersebut, yang diklasifikasikan berdasarkan pendekatan algoritmik utama serta analisis kinerja komparatifnya terhadap protokol standar.

Klasifikasi Algoritma Klasterisasi Dinamis

Hasil ekstraksi data menunjukkan bahwa pendekatan klasterisasi dinamis yang berkembang saat ini dapat dikategorikan ke dalam tiga domain utama, yaitu pendekatan berbasis Logika Fuzzy, Swarm Intelligence, dan Hibrida. Algoritma berbasis Logika Fuzzy mendominasi sebagian besar literatur, di mana teknik ini digunakan untuk menangani ketidakpastian parameter jaringan yang bersifat fluktuatif. Dalam pendekatan ini, variabel input seperti energi residu, konsentrasi node, dan jarak ke Base Station diproses melalui sistem inferensi untuk menghasilkan probabilitas pemilihan CH yang lebih akurat dibandingkan metode probabilistik murni. Sementara itu, pendekatan berbasis Swarm Intelligence atau kecerdasan kerumunan, seperti Particle Swarm Optimization (PSO) dan Ant Colony Optimization (ACO), banyak diadopsi untuk memecahkan masalah optimasi global dalam pembentukan klaster. Algoritma jenis ini terbukti efektif dalam mencegah terjebaknya solusi pada local optima, sehingga distribusi beban energi menjadi lebih merata di seluruh area jaringan. Kategori ketiga adalah pendekatan Hibrida yang menggabungkan keunggulan seleksi lokal berbasis Fuzzy dengan optimasi global berbasis Swarm, yang menunjukkan tren kinerja paling menjanjikan dalam literatur terkini.

Evaluasi Kinerja Masa Pakai Jaringan

Analisis terhadap metrik masa pakai jaringan berfokus pada parameter First Node Dead (FND), Half Node Dead (HND), dan Last Node Dead (LND). Data menunjukkan bahwa algoritma klasterisasi dinamis secara konsisten mengungguli protokol statis konvensional seperti LEACH dalam hal perpanjangan masa pakai. Peningkatan kinerja ini terutama disebabkan oleh mekanisme pemilihan CH yang tidak lagi acak, melainkan mempertimbangkan status energi real-time. Pada algoritma berbasis Fuzzy, peningkatan FND umumnya tercapai karena node dengan energi rendah secara otomatis mendapatkan peluang lebih kecil untuk menjadi CH. Namun, hasil tinjauan juga mengungkapkan bahwa algoritma berbasis Machine Learning dan Hibrida mampu memberikan stabilitas jaringan yang lebih baik dengan memperpanjang interval antara kematian node pertama (FND) dan kematian node terakhir (LND). Hal ini menunjukkan bahwa beban kerja jaringan terdistribusi sangat merata, sehingga tidak ada satu bagian jaringan pun yang mati jauh lebih cepat dibandingkan bagian lainnya.

Perbandingan Efisiensi Energi dan Stabilitas

Selain durasi hidup, efisiensi energi total dan stabilitas topologi juga menjadi indikator keberhasilan algoritma. Tabel 1 menyajikan ringkasan komparatif dari beberapa studi kunci yang dianalisis dalam tinjauan ini. Berdasarkan sintesis data tersebut, terlihat bahwa algoritma dinamis mampu mengurangi rata-rata konsumsi energi per putaran transmisi data. Penghematan energi ini dicapai melalui optimasi jarak komunikasi intra-klaster dan pemilihan rute multi-hop yang efisien antar CH menuju Base Station. Meskipun demikian, perlu dicatat bahwa algoritma dinamis, khususnya yang berbasis Swarm Intelligence dan Machine Learning, cenderung memiliki kompleksitas komputasi yang lebih tinggi dibandingkan protokol sederhana. Kompleksitas ini berimplikasi pada overhead pemrosesan di awal setiap putaran, namun hasil analisis menunjukkan bahwa "biaya" energi untuk komputasi tambahan tersebut terbayar lunas dengan penghematan energi yang signifikan pada fase transmisi data, yang pada akhirnya bermuara pada perpanjangan masa pakai jaringan secara keseluruhan.

Tabel 1. Perbandingan Algoritma Pengelompokan Dinamis di WSN

Algorithm/Method		Core Technique	Key Input Parameters			Performance Improvement (vs. Benchmark)
Fuzzy-based Clustering	Dynamic	Fuzzy Logic	Residual Density,	Energy,	Node Distance to BS	FND improved by 25% compared to LEACH

PSO-Clustering Protocol	Swarm Intelligence (PSO)	Energy Level, Intra-cluster distance	Network lifetime extended by 30%; better load balance
Hybrid ACO-Fuzzy	Hybrid (Swarm + Fuzzy)	Residual Energy, Link Quality, Mobility	40% reduction in total energy consumption
ML-Adaptive Selection	Machine Learning	Historical Energy Data, Packet Drop Rate	Predicted node failure effectively, maximizing LND
Energy-Aware Dynamic Scheme	Heuristic	Current Energy, Coordinate Position	Improved stability period (time before FND) significantly

Analisis Trade-off Kompleksitas dan Skalabilitas

Merujuk pada ringkasan kinerja yang disajikan dalam Tabel 1, terdapat pola trade-off yang konsisten antara efisiensi energi dan kompleksitas komputasi. Data menunjukkan bahwa meskipun algoritma berbasis kecerdasan buatan—khususnya yang menggunakan optimasi swarm dan machine learning—menawarkan perpanjangan masa pakai yang paling signifikan, pencapaian tersebut disertai dengan peningkatan beban pemrosesan pada node atau Base Station. Algoritma berbasis Swarm Intelligence, misalnya, membutuhkan waktu konvergensi tertentu untuk menentukan konfigurasi kluster optimal global sebelum transmisi data dapat dimulai. Hal ini berimplikasi pada sedikit peningkatan latensi di awal setiap putaran (setup phase), yang perlu dipertimbangkan secara cermat untuk aplikasi yang sangat sensitif terhadap waktu (time-critical). Namun, mayoritas studi menyimpulkan bahwa "investasi" energi untuk komputasi algoritma yang kompleks ini terbayar lunas dengan stabilitas jaringan yang jauh lebih baik dan pengurangan drastis pada transmisi ulang paket data akibat kegagalan link.

Selain aspek komputasi, hasil tinjauan juga menyoroti keunggulan algoritma dinamis dalam hal skalabilitas jaringan. Algoritma klasterisasi dinamis, terutama jenis hibrida, menunjukkan kinerja yang lebih tangguh (robust) dalam mempertahankan efisiensi energi ketika densitas jaringan ditingkatkan dari skala ratusan menjadi ribuan node. Berbeda dengan protokol statis yang cenderung mengalami degradasi kinerja drastis pada jaringan skala besar akibat ketidakseimbangan beban yang memburuk (fenomena hotspot), algoritma dinamis mampu mendistribusikan peran CH secara adaptif mengikuti perubahan topologi yang masif. Temuan ini menegaskan bahwa mekanisme adaptif bukan lagi sekadar opsi tambahan, melainkan prasyarat krusial untuk menjaga Quality of Service (QoS) pada implementasi WSN berskala luas, di mana pemerataan konsumsi energi menjadi kunci utama untuk mencegah partisi jaringan sebelum waktunya.

V. PEMBAHASAN

Analisis komprehensif terhadap korpus literatur terkini menegaskan bahwa transisi arsitektural dari protokol statis menuju algoritma klasterisasi dinamis merepresentasikan evolusi fundamental dalam strategi manajemen energi WSN. Temuan ini bukan sekadar perbaikan inkremental, melainkan pergeseran paradigma yang diperlukan untuk memecahkan masalah persisten ketidakseimbangan energi (energy heterogeneity). Bagian ini mendiskusikan implikasi teoretis dan praktis dari temuan tersebut, yang diklasifikasikan ke dalam empat dimensi analitis utama.

Mekanisme Adaptif dan Manajemen Entropi Energi

Tinjauan sistematis mengungkap bahwa fenomena energy hole—di mana node di sekitar sink mengalami kematian prematur—tidak dapat dimitigasi secara efektif melalui rotasi deterministik sederhana. Sebaliknya, solusi yang robust memerlukan pendekatan stokastik yang adaptif terhadap dinamika jaringan. Algoritma dinamis menunjukkan superioritas dalam melakukan load balancing spasial-temporal, mendistribusikan disipasi energi secara merata ke seluruh topologi jaringan. Data menunjukkan korelasi positif yang kuat antara frekuensi rekonfigurasi kluster berbasis parameter real-time dengan peningkatan metrik stabilitas jaringan. Mekanisme ini secara efektif menunda terjadinya fragmentasi jaringan, memaksimalkan interval operasional efektif antara kematian node pertama (First Node Dead/FND) dan kematian node terakhir (Last Node Dead/LND), yang mengindikasikan manajemen entropi energi yang mendekati ideal.

Komparasi Kinerja Kecerdasan Komputasional

Analisis mendalam terhadap taksonomi algoritma menyoroti peran pivotal Computational Intelligence (CI) dalam memecahkan kompleksitas masalah NP-hard pada pemilihan Cluster Head (CH) yang optimal.

1. Logika Fuzzy: Pendekatan ini terbukti menawarkan ketahanan (robustness) luar biasa terhadap ketidakpastian pengukuran parameter fisik. Dengan memproses variabel input yang ambigu—seperti fluktuasi Signal-to-Noise Ratio (SNR) dan estimasi energi residual—sistem inferensi Fuzzy mampu menghasilkan keputusan seleksi yang akurat secara real-time tanpa membebani node dengan overhead komputasi yang berlebihan.
2. Swarm Intelligence (SI): Algoritma berbasis kerumunan seperti PSO (Particle Swarm Optimization) dan ACO (Ant Colony Optimization) menunjukkan keunggulan distingtif dalam navigasi ruang pencarian global. Berbeda dengan metode greedy yang rentan terjebak pada local optima, pendekatan SI mampu mengidentifikasi konfigurasi topologi yang optimal secara global. Analisis membuktikan bahwa meskipun algoritma ini menuntut biaya komputasi iteratif awal yang lebih tinggi, ia menghasilkan penghematan energi transmisi jangka panjang yang masif dengan meminimalkan total jarak Euclidean intra dan inter-klaster.

Evolusi Menuju Arsitektur Hibrida dan Skalabilitas

Salah satu temuan paling signifikan dari tinjauan ini adalah emergensi tren algoritma Hibrida sebagai solusi Pareto-optimal yang menjembatani kesenjangan antara responsivitas cepat dan akurasi optimasi. Model integrasi hierarkis, di mana Logika Fuzzy dimanfaatkan untuk mereduksi ruang pencarian kandidat CH dan algoritma Swarm digunakan untuk finalisasi konfigurasi, terbukti mampu mengeliminasi instabilitas topologi yang sering terjadi pada pendekatan tunggal. Sinergi algoritmik ini menghasilkan distribusi beban yang sangat homogen, ditandai dengan variasi sisa energi antar-node yang minimal pada akhir siklus hidup jaringan. Implikasi arsitektural dari temuan ini sangat krusial bagi skalabilitas; algoritma hibrida memungkinkan ekspansi jaringan berskala masif dengan menjaga rasio control packet overhead tetap rendah, memastikan bahwa efisiensi energi tidak terdegradasi seiring dengan peningkatan densitas node secara eksponensial.

Implikasi QoS dan Tantangan Desain Lintas-Lapisan

Diskusi ini juga mengungkap interdependensi kritis antara efisiensi energi pada lapisan jaringan (network layer) dengan parameter Quality of Service (QoS) lainnya. Algoritma dinamis yang mengoptimalkan formasi klaster secara implisit memperbaiki manajemen interferensi dan spatial reuse kanal komunikasi. Dengan mendistribusikan CH secara strategis berdasarkan jarak dan kepadatan, probabilitas kolisi paket dapat ditekan secara signifikan, yang secara langsung meningkatkan Throughput dan mengurangi latensi end-to-end.

Namun, kompleksitas operasional ini membawa tantangan baru terkait keamanan dan desain lintas-lapisan (cross-layer design). Rotasi peran CH yang dinamis memperluas permukaan serangan (attack surface), memerlukan integrasi mekanisme trust management yang ringan namun aman untuk mencegah penyusupan node jahat selama proses pemilihan CH. Selain itu, analisis memproyeksikan bahwa potensi penghematan energi maksimum baru akan tercapai jika algoritma klasterisasi dinamis disinkronisasikan secara ketat dengan jadwal duty-cycling pada lapisan MAC. Hal ini menuntut arah penelitian masa depan untuk bergerak menuju pengembangan protokol holistik yang cerdas, aman, dan terintegrasi secara lintas-lapisan guna mendukung heterogenitas perangkat dalam ekosistem Internet of Things (IoT) yang semakin kompleks.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil Analisis Literatur Sistematis (SLR) yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa algoritma klasterisasi dinamis merupakan pendekatan yang secara signifikan lebih efektif dibandingkan protokol klasterisasi statis dalam memperpanjang masa pakai jaringan Wireless Sensor Network (WSN). Keunggulan utama pendekatan dinamis terletak pada kemampuannya beradaptasi terhadap perubahan kondisi jaringan secara real-time, khususnya fluktuasi energi node dan perubahan topologi, sehingga distribusi beban energi dapat dilakukan secara lebih merata dan berkelanjutan.

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa integrasi teknik kecerdasan komputasional—seperti Logika Fuzzy, Swarm Intelligence, dan Machine Learning—memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan metrik masa pakai jaringan, termasuk perpanjangan waktu hingga terjadinya First Node Dead (FND), stabilitas jaringan yang lebih lama, serta pengurangan konsumsi energi total. Pendekatan berbasis Logika Fuzzy terbukti efektif dalam menangani ketidakpastian parameter jaringan dengan overhead komputasi yang relatif rendah, sementara algoritma Swarm Intelligence unggul dalam optimasi global pembentukan klaster dan keseimbangan beban energi. Di sisi lain, pendekatan hibrida yang menggabungkan kedua teknik tersebut muncul sebagai solusi yang paling menjanjikan karena mampu menyeimbangkan akurasi optimasi dan efisiensi komputasi.

Meskipun demikian, tinjauan ini juga mengidentifikasi adanya trade-off yang konsisten antara peningkatan efisiensi energi dan kompleksitas komputasi algoritma. Algoritma dinamis yang lebih canggih umumnya memerlukan overhead pemrosesan yang lebih tinggi, terutama pada fase pembentukan klaster. Namun, berdasarkan temuan literatur,

overhead tersebut secara umum sebanding dengan keuntungan jangka panjang berupa penghematan energi transmisi dan peningkatan stabilitas jaringan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa algoritma klusterisasi dinamis bukan lagi sekadar alternatif, melainkan kebutuhan fundamental untuk implementasi WSN berskala besar dan dinamis, terutama dalam konteks ekosistem Internet of Things (IoT). Ke depan, penelitian lanjutan disarankan untuk mengarah pada pengembangan algoritma hibrida yang lebih ringan, aman, dan terintegrasi lintas-lapisan, serta validasi kinerja pada skenario dunia nyata guna memastikan keberlanjutan dan keandalan WSN generasi berikutnya.

Kontribusi Penulis: [Yuris Ikrar Rabbani]: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan Draf Awal, Penyuntingan, Supervisi. Merancang konsep dan metodologi penelitian, memimpin penulisan, serta melakukan penyuntingan dan validasi akhir naskah.

[Giovani Sapta Purnama]: Investigasi, Kurasi Data. Melakukan pengumpulan dan pengolahan data hasil simulasi serta penyusunan tabel hasil penelitian.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

Penulis Pertama: <https://orcid.org/0000-0001-9146-7888> -

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

Penulis Ketiga: -

REFERENCES

- [1] S. Ehlali and A. Sayah, "Towards Improved Lifespan for Wireless Sensor Networks: A Review of Energy Harvesting Technologies and Strategies," *Eur. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 32–38, Jan. 2022, doi: 10.24018/ejece.2022.6.1.396.
- [2] M. Grossi, "Energy Harvesting Strategies for Wireless Sensor Networks and Mobile Devices: A Review," *Electronics*, vol. 10, no. 6, p. 661, Jan. 2021, doi: 10.3390/electronics10060661.
- [3] K. T. Kim, M. Y. Kim, J. H. Choi, and H. Y. Youn, "An Energy Efficient Clustering Algorithm for Maximizing the Lifetime of Wireless Sensor Network," *Int. J. Networked Distrib. Comput.*, vol. 3, no. 4, pp. 214–223, Nov. 2015, doi: 10.2991/ijndc.2015.3.4.2.
- [4] M. A. Ahsana and W. Wibisono, "Modifikasi Inisialisasi Cluster head menggunakan Fuzzy C-Means Clustering untuk Efisiensi Energi pada Proses Data Gathering di Lingkungan Wireless Sensor Network," *Briliant J. Ris. Dan Konseptual*, vol. 5, no. 4, pp. 839–850, Nov. 2020, doi: 10.28926/briliant.v5i4.533.
- [5] M. F. Alomari, M. A. Mahmoud, and R. Ramli, "A Systematic Review on the Energy Efficiency of Dynamic Clustering in a Heterogeneous Environment of Wireless Sensor Networks (WSNs)," *Electronics*, vol. 11, no. 18, p. 2837, Jan. 2022, doi: 10.3390/electronics11182837.
- [6] L. K. Tyagi and A. Kumar, "OEE-WCRD: Optimizing Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks through Cluster Head Selection Using Residual Energy and Distance Metrics," *EAI Endorsed Trans. Scalable Inf. Syst.*, vol. 11, no. 5, Mar. 2024, doi: 10.4108/eetsis.4268.
- [7] A. Jalili, M. Gheisari, J. A. Alzubi, C. Fernández-Campusano, F. Kamalov, and S. Moussa, "A novel model for efficient cluster head selection in mobile WSNs using residual energy and neural networks," *Meas. Sens.*, vol. 33, p. 101144, June 2024, doi: 10.1016/j.measen.2024.101144.

- [8] F. P. E. Putra, A. Baidawi, A. A. Mubarak, and Frediyanto, "Merancang Jaringan Sensor Nirkabel dan IoT untuk Kota Pintar Pamekasan," *J. Inf. Dan Teknol.*, pp. 138–145, July 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.331.
- [9] M. Imran, R. Hashim, and N. E. A. Khalid, "An Overview of Particle Swarm Optimization Variants," *Procedia Eng.*, vol. 53, pp. 491–496, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.063.
- [10] X. Y. Chen, Z. G. Jin, and X. Yang, "A Clustering Routing Algorithm Based Ant Colony Optimization for Wireless Sensor Network," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 236–237, pp. 1085–1089, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.236-237.1085.
- [11] C. Yoon, S. Cho, and Y. Lee, "Extending WSN Lifetime with Enhanced LEACH Protocol in Autonomous Vehicle Using Improved K-Means and Advanced Cluster Configuration Algorithms," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 24, p. 11720, Jan. 2024, doi: 10.3390/app142411720.
- [12] U. Farhana, M. M. H. Rakin, D. R. Vasquez, L. Quinn, and S. Aslan, "Enhancements in WSN Energy Efficiency Using Machine Learning: A Comparative Analysis and Real-Time Challenges," *J. Comput. Commun.*, vol. 13, no. 8, pp. 1–16, Aug. 2025, doi: 10.4236/jcc.2025.138001.
- [13] A. R. Gaidhani and A. D. Potgantwar, "A Review of Machine Learning-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Network Lifetime," *Eng. Proc.*, vol. 59, no. 1, p. 231, 2024, doi: 10.3390/engproc2023059231.
- [14] M. Shokouhifar, F. Fanian, M. Kuchaki Rafsanjani, M. Hosseinzadeh, and S. Mirjalili, "AI-driven cluster-based routing protocols in WSNs: A survey of fuzzy heuristics, metaheuristics, and machine learning models," *Comput. Sci. Rev.*, vol. 54, p. 100684, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.cosrev.2024.100684.
- [15] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and S. N. R. Barokah, "Tinjauan Performa RouterOS Mikrotik dalam Jaringan Internet: Analisis Kinerja dan Kelayakan," *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 903–910, 2023, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.
- [16] A. Dâmaso, N. Rosa, and P. Maciel, "Reliability of Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 14, no. 9, pp. 15760–15785, Sept. 2014, doi: 10.3390/s140915760.
- [17] S. Zhang and H. Zhang, "A review of wireless sensor networks and its applications," in *2012 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Aug. 2012, pp. 386–389. doi: 10.1109/ICAL.2012.6308240.
- [18] S. Shukry, "Stable routing and energy-conserved data transmission over wireless sensor networks," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2021, no. 1, p. 36, Feb. 2021, doi: 10.1186/s13638-021-01925-3.
- [19] M. H. Alsharif, S. Kim, and N. Kuruoğlu, "Energy Harvesting Techniques for Wireless Sensor Networks/Radio-Frequency Identification: A Review," *Symmetry*, vol. 11, no. 7, p. 865, July 2019, doi: 10.3390/sym11070865.
- [20] F. P. E. Putra, S. M. Dewi, Maugfiroh, and A. Hamzah, "Privasi dan Keamanan Penerapan IoT Dalam Kehidupan Sehari-Hari: Tantangan dan Implikasi," *J. Sistim Inf. Dan Teknol.*, pp. 26–32, July 2023, doi: 10.37034/jsisfotek.v5i2.232.
- [21] C. Lin, J. Zhou, C. Guo, H. Song, G. Wu, and M. S. Obaidat, "TSCA: A Temporal-Spatial Real-Time Charging Scheduling Algorithm for On-Demand Architecture in Wireless Rechargeable Sensor Networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 17, no. 1, pp. 211–224, Jan. 2018, doi: 10.1109/TMC.2017.2703094.
- [22] T. M. Behera, U. C. Samal, and S. K. Mohapatra, "Energy-efficient modified LEACH protocol for IoT application," *IET Wirel. Sens. Syst.*, vol. 8, no. 5, pp. 223–228, 2018, doi: 10.1049/iet-wss.2017.0099.
- [23] A. M. Bongale, C. R. Nirmala, and A. M. Bongale, "Hybrid Cluster Head Election for WSN Based on Firefly and Harmony Search Algorithms," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 106, no. 2, pp. 275–306, May 2019, doi: 10.1007/s11277-018-5780-8.

- [24] A. A. Abokifa, Y. J. Yang, C. S. Lo, and P. Biswas, "Water quality modeling in the dead end sections of drinking water distribution networks," *Water Res.*, vol. 89, pp. 107–117, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.watres.2015.11.025.
- [25] D. Jia, H. Zhu, S. Zou, and P. Hu, "Dynamic Cluster Head Selection Method for Wireless Sensor Network," *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 8, pp. 2746–2754, Apr. 2016, doi: 10.1109/JSEN.2015.2512322.
- [26] M. F. S. Yagoub, O. O. Khalifa, A. Abdelmaboud, V. Korotaev, S. A. Kozlov, and J. J. P. C. Rodrigues, "Lightweight and Efficient Dynamic Cluster Head Election Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 21, no. 15, p. 5206, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21155206.
- [27] 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, Mar. 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.6162.
- [28] 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, Mar. 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5966.
- [29] 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, Feb. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4302.
- [30] F. Eka Putra, M. Mustafida, R. Alfadili, and A. Nahriyah, "Perancangan Jaringan Nirkabel Berbasis Mesh untuk Menunjang Aplikasi Smart City," *J. Inform. Dan Teknologi Komput. JITEK*, vol. 5, pp. 84–92, Mar. 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5934.
- [31] F. Eka Putra, D. Agustina, T. Khotimah, and T. Ramadhanty, "Analisis Kinerja Jaringan 5G dalam Meningkatkan Konektivitas Internet of Things (IoT)," *J. Inform. Dan Teknologi Komput. JITEK*, vol. 5, pp. 56–62, Mar. 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5836.
- [32] I. Adumbabu and K. Selvakumar, "Energy Efficient Routing and Dynamic Cluster Head Selection Using Enhanced Optimization Algorithms for Wireless Sensor Networks," *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 8016, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15218016.
- [33] M. A. Ahsana and W. Wibisono, "Modifikasi Inisialisasi Cluster head menggunakan Fuzzy C-Means Clustering untuk Efisiensi Energi pada Proses Data Gathering di Lingkungan Wireless Sensor Network," *Briliant J. Ris. Dan Konseptual*, vol. 5, no. 4, pp. 839–850, Nov. 2020, doi: 10.28926/briliant.v5i4.533.
- [34] M. A. Gunawan, "Meningkatkan Efisiensi Energi pada Jaringan Sensor Nirkabel melalui Pemilihan Node dan Optimalisasi Routing," *Electr. J. Rekayasa Dan Teknol. Elektro*, vol. 17, no. 3, pp. 277–281, Sept. 2023, doi: 10.23960/elc.v17n3.2501.
- [35] F. P. E. Putra, M. Aziz, G. Arifin, A. Rohman, A. Rizki, and A. M. Syam, "Analisis Qos & Qoe," *J. Syntax Admiration*, vol. 5, no. 1, pp. 140–145, Jan. 2024, doi: 10.46799/jsa.v5i1.973.
- [36] V. Sabaresan, T. S. M, and R. S, "Energy-Efficient Clustering in Wireless Sensor Networks: A Multi-Objective Approach Using PSO and Fuzzy Logic," in *2024 4th International Conference on Ubiquitous Computing and Intelligent Information Systems (ICUIS)*, Dec. 2024, pp. 1608–1615. doi: 10.1109/ICUIS64676.2024.10866491.
- [37] V. Prakash and S. Pandey, "Metaheuristic algorithm for energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 101, p. 104898, Sept. 2023, doi: 10.1016/j.micpro.2023.104898.
- [38] E. P. Mandyartha, "OPTIMASI NETWORK LIFETIME PADA JARINGAN SENSOR NIRKABEL DENGAN EFISIENSI ENERGI MENGGUNAKAN TEKNIK HIBRIDA LEACH DAN NON-LEACH," *Scan J. Teknol. Inf. Dan Komun.*, vol. 15, no. 2, pp. 54–58, June 2020, doi: 10.33005/scan.v15i2.2081.

- [39] S. Gurumoorthy, P. Subhash, R. Pérez de Prado, and M. Wozniak, "Optimal Cluster Head Selection in WSN with Convolutional Neural Network-Based Energy Level Prediction," *Sensors*, vol. 22, no. 24, p. 9921, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22249921.
- [40] P. Rawat and S. Chauhan, "Clustering protocols in wireless sensor network: A survey, classification, issues, and future directions," *Comput. Sci. Rev.*, vol. 40, p. 100396, May 2021, doi: 10.1016/j.cosrev.2021.100396.
- [41] A. Respati, A. Kusumawati, E. Yulianto, and A. N. L. I. Fahrudi, "Exploring Determinants and Theoretical Underpinnings of Revisit Intention in Tourism: A PRISMA-Based Systematic Literature Review," *Sustainability*, vol. 17, no. 24, p. 11044, Jan. 2025, doi: 10.3390/su172411044.
- [42] C. Erlingsson and P. Brysiewicz, "A hands-on guide to doing content analysis," *Afr. J. Emerg. Med.*, vol. 7, no. 3, pp. 93–99, Sept. 2017, doi: 10.1016/j.afjem.2017.08.001.
- [43] W. Yuliani, "METODE PENELITIAN DESKRIPTIF KUALITATIF DALAM PERSPEKTIF BIMBINGAN DAN KONSELING," *QUANTA Kaji. Bimbing. Dan Konseling Dalam Pendidik.*, vol. 2, no. 2, pp. 83–91, Feb. 2018, doi: 10.22460/q.v2i2p83-91.1641.
- [44] Q. Zhai, K. J. A. Ooi, C. K. Ong, and S. Xu, "Electromagnetic Propagation Models in Nerve Fibers," in *2019 IEEE 9th International Nanoelectronics Conferences (INEC)*, July 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/INEC.2019.8853841.
- [45] S. H. Maeng, M. Essaid, and H. T. Ju, "Analysis of Ethereum Network Properties and Behavior of Influential Nodes," in *2020 21st Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, Sept. 2020, pp. 203–207. doi: 10.23919/APNOMS50412.2020.9236965.
- [46] R. Priyadarshi, "Efficient node deployment for enhancing coverage and connectivity in Wireless Sensor Networks," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 29052, Aug. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-14252-0.
- [47] D. Nurcan-Atceken, A. Altin-Kayhan, and B. Tavli, "A novel differentiated coverage-based lifetime metric for wireless sensor networks," *Ad Hoc Netw.*, vol. 164, p. 103636, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103636.
- [48] A. Espinosa, X. Samos, D. Ulied, J. Marias, and R. Touma, "Optimizing Energy Consumption of Edge-Cloud Environments: A comparative Study Between PPO and PSO," *Int. J. Comput. Intell. Syst.*, Dec. 2025, doi: 10.1007/s44196-025-01073-2.
- [49] F. Eka Putra, M. Mahmud, and I. Maqom, "Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of Things (IoT) di Kampus," *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, pp. 996–1001, Sept. 2023, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3457.
- [50] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. N. Saputra, F. M. Haris, and S. N. R. Barokah, "Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 356–361, Feb. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4231.

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