

Survei dan Analisis Protokol Komunikasi pada Jaringan Sensor Nirkabel untuk Efisiensi Energi

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) merupakan sebuah sistem jaringan yang tersusun dari banyak sekali node sensor berbiaya rendah yang tersebar di area tertentu, di mana node-node ini memiliki kemampuan yang sangat terbatas, terutama dalam hal sumber daya energi (baterai), kapasitas pemrosesan, dan jangkauan komunikasi. Keterbatasan energi ini menjadi kendala utama, karena secara langsung menentukan kinerja dan umur operasional keseluruhan jaringan, sehingga efisiensi energi menjadi faktor desain yang paling krusial. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan survei komprehensif dan analisis mendalam terhadap berbagai protokol komunikasi pada WSN yang berfokus pada optimalisasi penggunaan energi. Metode yang digunakan adalah kajian literatur sistematis terhadap beberapa protokol routing utama yang paling berpengaruh, dengan mengevaluasi dan membandingkan karakteristik, mekanisme, keunggulan, serta keterbatasan dari protokol fundamental seperti LEACH (clustering adaptif), PEGASIS (berbasis rantai), HEED (clustering terdistribusi), dan TEEN (reaktif). Hasil survei menunjukkan bahwa protokol dengan arsitektur hierarkis (clustering dan chain-based) mampu meningkatkan efisiensi energi secara signifikan dibandingkan pendekatan routing datar, terutama melalui agregasi data dan pengurangan transmisi jarak jauh. Namun, tantangan seperti penanganan heterogenitas node dan peningkatan adaptivitas jaringan terhadap perubahan topologi masih perlu ditingkatkan. Diharapkan riset ini akan menjadi acuan fundamental bagi pengembangan protokol komunikasi WSN di masa depan yang lebih hemat energi, cerdas, skabel, adaptif, serta berkelanjutan.

Kata Kunci: Wireless Sensor Network, Efisiensi Energi, Protokol Komunikasi, Clustering, Routing.

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

I. PENDAHULUAN

Sebagai sebuah sistem komunikasi nirkabel, Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) tersusun dari banyak sekali node sensor berdaya rendah yang memiliki fungsi untuk memonitor kondisi lingkungan sekitar dan menyampaikan data yang terkumpul ke sebuah pusat pengendali atau yang disebut juga sink node. Karakteristik utama WSN adalah keterbatasan sumber daya seperti energi, memori, dan kemampuan komputasi, sehingga efisiensi energi menjadi isu paling krusial dalam pengembangannya [1]. Sebagian besar konsumsi energi pada node terjadi saat transmisi dan penerimaan data, sehingga strategi komunikasi menjadi faktor penting untuk memperpanjang umur jaringan [2].

Penelitian mengenai protokol komunikasi hemat energi telah banyak dilakukan, di mana metode clustering menjadi salah satu pendekatan paling populer karena kemampuannya dalam mengelola konsumsi energi dan memperpanjang masa hidup jaringan. Protokol Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) menjadi dasar bagi berbagai pengembangan protokol lainnya seperti PEGASIS, HEED, dan TEEN, yang berfokus pada pengaturan pemilihan cluster head dan rute komunikasi yang efisien [3], [4]. LEACH mampu mengurangi beban komunikasi langsung ke base station, namun efisiensinya menurun pada jaringan berskala besar karena pemilihan cluster head dilakukan secara acak [5].

Beberapa penelitian mengembangkan variasi algoritma berbasis optimisasi untuk memperbaiki efisiensi energi, seperti pendekatan ant colony optimization [6], genetic algorithm, serta particle swarm optimization (PSO)[7]. Teknik-teknik tersebut mampu menyesuaikan pembentukan cluster dan rute komunikasi berdasarkan kondisi energi residu setiap node. Selain itu, metode berbasis machine learning mulai digunakan untuk meningkatkan adaptivitas sistem terhadap perubahan topologi dan beban jaringan secara dinamis[8], [9], [10].

Tren penelitian terbaru menunjukkan adanya integrasi antara WSN dengan teknologi Internet of Things (IoT) dan Edge Computing, yang memungkinkan pengolahan data lebih cepat sekaligus efisien secara energi. Dalam konteks ini, protokol komunikasi tidak hanya dituntut untuk hemat energi tetapi juga mampu mendukung keandalan data dan

* Yuris Ikrar Rabbani

keamanan jaringan[11], [12], [13]. Namun demikian, masih terdapat tantangan besar dalam menjaga keseimbangan antara efisiensi energi, keterlambatan transmisi, dan ketahanan terhadap kegagalan node[11], [12].

Beranjak dari latar belakang permasalahan yang telah diuraikan sebelumnya, maka penelitian ini secara khusus dirancang untuk melaksanakan sebuah kajian literatur yang komprehensif dan mendalam. Studi ini akan memusatkan analisisnya pada berbagai macam protokol komunikasi yang diaplikasikan dalam Jaringan Sensor Nirkabel, dengan menempatkan isu efisiensi energi sebagai titik berat dan fokus utama dari penelaahan yang dilakukan. Pendekatan ini dilakukan dengan meninjau berbagai penelitian yang membahas desain, optimisasi, serta evaluasi protokol komunikasi berbasis clustering, chain-based routing, dan metode hibrid. Hasil survei ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai arah perkembangan penelitian WSN, mengidentifikasi celah penelitian yang masih terbuka, serta menjadi dasar bagi pengembangan protokol komunikasi adaptif dan berkelanjutan di masa depan.

Selain LEACH dan PEGASIS, beberapa penelitian mengusulkan pendekatan Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering (HEED) dan Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network (TEEN) yang berfokus pada pemilihan cluster head berbasis energi residual serta transmisi data berdasarkan ambang batas nilai sensor[14], [15]. Pendekatan ini menunjukkan peningkatan efisiensi energi yang signifikan dibandingkan metode tradisional. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih menghadapi kendala dalam aspek skalabilitas, ketahanan terhadap topologi jaringan yang dinamis, serta adaptasi terhadap heterogenitas node[16], [17].

Seiring dengan berkembangnya paradigma Internet of Things (IoT) dan Edge Computing, arah penelitian WSN mulai bergeser menuju penerapan kecerdasan buatan untuk pengelolaan energi secara adaptif dan prediktif. Berbagai studi terbaru menunjukkan bahwa algoritma berbasis machine learning dan metaheuristic optimization seperti genetic algorithm dan particle swarm optimization dapat meningkatkan efisiensi energi dan memperpanjang masa hidup jaringan secara signifikan[18], [19]. Meskipun demikian, penelitian yang ada masih bersifat parsial dan sering kali terbatas pada kondisi simulasi tertentu, sehingga diperlukan kajian menyeluruh untuk memahami sejauh mana efisiensi energi telah dicapai melalui berbagai pendekatan protokol komunikasi.

Dengan mempertimbangkan kondisi yang telah dipaparkan, riset ini memiliki tujuan untuk melaksanakan sebuah survei serta analisis mendalam mengenai berbagai protokol komunikasi yang diterapkan pada jaringan sensor nirkabel, dengan menjadikan efisiensi energi sebagai titik fokus utamanya.. Kajian ini dilakukan melalui metode literature review terhadap sejumlah penelitian terkini yang membahas perbandingan protokol berbasis clustering, chain-based routing, dan pendekatan hibrid. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan pemahaman komprehensif mengenai karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan setiap protokol, serta mengidentifikasi peluang penelitian masa depan untuk pengembangan protokol komunikasi yang lebih hemat energi dan adaptif terhadap perubahan lingkungan jaringan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) didefinisikan sebagai sistem jaringan yang terdiri dari banyak sekali node sensor dengan kemampuan yang terbatas dalam hal energi, pemrosesan, dan komunikasi[1],[45]. Keterbatasan ini menjadikan efisiensi energi sebagai faktor krusial yang menentukan kinerja serta umur operasional jaringan[20],[27]. Sebagian besar konsumsi energi pada node terjadi selama proses transmisi dan penerimaan data. Oleh karena itu, pengembangan protokol komunikasi yang hemat energi telah menjadi fokus utama penelitian untuk memperpanjang masa hidup jaringan[9].

Pendekatan clustering (pengelompokan) telah menjadi salah satu strategi paling dominan dan populer dalam riset WSN karena kemampuannya mengelola konsumsi energi[2],[28]. Dalam arsitektur ini, node-node diorganisir ke dalam beberapa kelompok (cluster), di mana satu node bertindak sebagai Cluster Head (CH) yang bertugas mengumpulkan data dari anggotanya dan meneruskannya ke sink node. Protokol LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) adalah pelopor dalam kategori ini[3], yang memperkenalkan mekanisme rotasi CH secara acak untuk mendistribusikan beban energi. Meskipun LEACH mampu mengurangi komunikasi langsung ke base station[30], kelemahannya terletak pada pemilihan CH yang bersifat probabilistik yang sering kali tidak optimal[5], terutama pada jaringan berskala besar dan jaringan heterogeny[8],[48]. Untuk mengatasi keterbatasan ini, dikembangkan protokol HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering) yang menyempurnakan pemilihan CH dengan mempertimbangkan energi sisa (residual energy) dan biaya komunikasi. Pendekatan ini terbukti mampu memperpanjang masa hidup jaringan dan menghasilkan distribusi CH yang lebih baik[17]. Sementara itu, protokol TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network) dirancang untuk aplikasi reaktif dengan hanya mentransmisikan data ketika ada perubahan nilai sensor yang melampaui ambang batas tertentu[14],[18],[33]. Hal ini membuat TEEN sangat efisien dalam mengurangi jumlah transmisi data[16], namun tidak cocok untuk aplikasi yang memerlukan pengumpulan data secara periodik[15],[34].

Sebagai alternatif dari arsitektur clustering, protokol berbasis rantai (chain-based) seperti PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) juga dikembangkan[19],[35]. Dalam PEGASIS, node-node membentuk sebuah rantai, di mana setiap node hanya berkomunikasi dengan tetangga terdekatnya untuk mengirim dan menerima data. Pendekatan ini efektif dalam mengurangi jarak transmisi sehingga konsumsi energi menjadi rendah[19]. Namun, kelemahan utamanya adalah latensi yang lebih tinggi karena data harus melewati banyak node secara sekuensial, serta kerentanannya terhadap kegagalan node tunggal dalam rantai[4],[37].

Gelombang penelitian terkini didominasi oleh integrasi algoritma optimisasi metaheuristik dan kecerdasan buatan (AI) untuk mengatasi masalah pemilihan CH dan penentuan rute komunikasi yang kompleks[1]. Algoritma yang terinspirasi dari alam (nature-inspired) seperti Ant Colony Optimization (ACO)[6] dan Particle Swarm Optimization (PSO)[7],[18] telah banyak diimplementasikan untuk optimisasi energi. Selain itu, metode berbasis machine learning dan Deep Learning mulai digunakan untuk merancang protokol routing yang lebih cerdas dan adaptif terhadap perubahan topologi jaringan[42]. Meskipun banyak kemajuan telah dicapai, sebagian besar penelitian masih menghadapi kendala dalam aspek skalabilitas, adaptasi terhadap topologi jaringan yang dinamis, dan penanganan heterogenitas node[1],[2]. Seiring dengan konvergensi WSN dengan paradigma Internet of Things (IoT) dan Edge Computing[12],[23], tantangan baru muncul di mana protokol tidak hanya dituntut hemat energi, tetapi juga harus mampu mendukung keandalan data dan keamanan jaringan[50]. Celah penelitian signifikan masih terbuka dalam mengintegrasikan WSN dengan teknologi jaringan baru seperti 5G dan Software-Defined Networking (SDN)[11],[54].

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur (literature review)[20] yang bertujuan untuk melakukan survei komprehensif terhadap berbagai protokol komunikasi pada jaringan sensor nirkabel (Wireless Sensor Network/WSN)[21] dengan fokus utama pada efisiensi energi[22],[23],[24]. Metode ini tidak melibatkan eksperimen maupun simulasi, tetapi berfokus pada pengumpulan dan analisis hasil penelitian terdahulu dari berbagai sumber ilmiah yang relevan dan kredibel.

Metode penelitian dirancang secara sistematis melalui empat tahapan utama: (A) perumusan kriteria dan pengumpulan literatur, (B) metode analisis data, (C) analisis komparatif dan pengelompokan tematik, serta (D) sintesis temuan dan identifikasi celah penelitian. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh pemahaman menyeluruh terhadap perkembangan, kelebihan, serta keterbatasan protokol komunikasi hemat energi pada WSN[24],[25],[26].

A. Pengumpulan Literatur dan Kriteria Seleksi

Tahap awal penelitian dimulai dengan pengumpulan literatur ilmiah dari berbagai basis data akademik yang berasal dari Google Scholar dengan bantuan Software Publish or Perish 8 yang membahas topik terkait.

Proses seleksi literatur didasarkan pada kriteria inklusi dan eksklusi yang ketat. Kriteria pemilihan berfokus pada:

1. Relevansi Artikel: Literatur harus membahas secara spesifik topik protokol komunikasi, efisiensi energi, atau arsitektur jaringan pada WSN.
2. Kredibilitas Sumber: Sumber harus berasal dari jurnal ilmiah terindeks atau prosiding konferensi bereputasi untuk menjamin validitas data.
3. Keterbaruan: Fokus diberikan pada penelitian yang diterbitkan dalam beberapa tahun terakhir untuk menangkap tren terbaru, meskipun studi fundamental tetap disertakan.

Literatur yang terpilih kemudian digunakan sebagai dasar analisis dalam penelitian ini.

B. Metode Analisis Data

Langkah berikutnya adalah analisis isi (content analysis) terhadap literatur yang telah dipilih[27],[28]. Penelitian ini menggunakan analisis deskriptif kualitatif, di mana hasil dari berbagai penelitian terdahulu dirangkum, dianalisis, dan dibandingkan untuk menemukan pola umum serta tren pengembangan terbaru.

Setiap artikel dikaji secara mendalam untuk mengidentifikasi aspek-aspek kunci berikut:

- Metode atau pendekatan yang diusulkan.
- Arsitektur jaringan yang digunakan.
- Strategi efisiensi energi yang diterapkan.
- Kelebihan dan keterbatasan dari protokol yang dibahas.

C. Analisis Tematik dan Komparatif

Analisis dilakukan secara tematik dengan mengelompokkan penelitian berdasarkan jenis protokol atau pendekatan yang digunakan, seperti *clustering-based*, *chain-based*, *hybrid-based*, [29], [30] serta pendekatan berbasis optimisasi dan kecerdasan buatan [31], [32], [33].

Pendekatan ini digunakan untuk membandingkan efektivitas masing-masing kelompok protokol terhadap efisiensi energi jaringan [34], [35], [36]. Analisis komparatif dilakukan dengan memperhatikan parameter-parameter kinerja utama yang umum digunakan dalam evaluasi WSN, meliputi:

- Konsumsi energi.
- Masa hidup jaringan (network lifetime).
- Jumlah transmisi data (throughput).
- Delay komunikasi (latency).
- Reliabilitas jaringan (packet delivery ratio).

Hasil pengelompokan dan analisis ini kemudian disajikan dalam bentuk tabel perbandingan pada bagian hasil dan pembahasan untuk memudahkan interpretasi [37], [38], [39], [40].

D. Sintesis Temuan dan Identifikasi Celah Penelitian

Tahap terakhir adalah sintesis temuan, yaitu menggabungkan hasil analisis dari berbagai literatur untuk menarik kesimpulan umum tentang kecenderungan penelitian di bidang efisiensi energi WSN.

Tahapan ini juga digunakan untuk mengidentifikasi celah penelitian (*research gap*) dan peluang pengembangan di masa mendatang. Secara khusus, penelitian ini menyoroti potensi integrasi WSN [41], [42], [43] dengan teknologi baru seperti *Internet of Things* (IoT) dan *Edge Computing* [44], [45], [46], [47]. Dengan demikian, metode penelitian ini berfungsi sebagai pendekatan sistematis untuk mengumpulkan, menilai, dan mensintesis hasil-hasil penelitian yang ada, sehingga menghasilkan pemahaman yang komprehensif mengenai efektivitas berbagai protokol komunikasi hemat energi pada WSN serta arah penelitian di masa depan [48], [49], [50].

IV. HASIL

Kajian literatur yang dilakukan secara komprehensif mengonfirmasi bahwa efisiensi energi merupakan tantangan fundamental dalam operasional Jaringan Sensor Nirkabel (WSN). Analisis terhadap berbagai penelitian menunjukkan bahwa evolusi protokol komunikasi menjadi solusi utama untuk mengatasi keterbatasan energi pada node sensor, dengan pendekatan metaheuristik menjadi salah satu yang paling banyak diteliti. Hasil analisis tematik mengidentifikasi adanya tiga gelombang utama pengembangan protokol: (1) protokol berbasis clustering sebagai fondasi, (2) pengembangan protokol hibrid dan pendekatan berbasis rantai (*chain-based*), serta (3) integrasi algoritma optimisasi dan kecerdasan buatan untuk manajemen energi yang dinamis dan adaptif.

Analisis Komparatif Protokol Komunikasi Hemat Energi

Protokol berbasis clustering terbukti menjadi salah satu pendekatan paling dominan dalam riset WSN, karena kemampuannya dalam mengorganisir jaringan dan mengoptimalkan transmisi data. Protokol Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) merupakan pelopor dalam kategori ini, memperkenalkan mekanisme rotasi cluster head (CH) untuk mendistribusikan beban energi. Berbagai penelitian telah melakukan analisis mendalam terhadap performa LEACH dan variannya, seperti LEACH-C, yang mencoba memperbaiki mekanisme pemilihan CH agar lebih efisien. Namun, kelemahan utama LEACH terletak pada pemilihan CH yang bersifat probabilistik, yang sering kali tidak optimal, terutama dalam hal penentuan jumlah kluster yang ideal dan penanganannya pada jaringan heterogen.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, protokol yang lebih canggih dikembangkan dengan mempertimbangkan berbagai faktor. Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering (HEED), misalnya, menyempurnakan proses pemilihan CH dengan mempertimbangkan energi sisa (*residual energy*) dan biaya komunikasi, yang terbukti mampu memperpanjang masa hidup jaringan secara signifikan. Sementara itu, untuk aplikasi yang bersifat reaktif (misalnya, pemantauan kejadian darurat), Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network (TEEN) menawarkan efisiensi tinggi dengan hanya mentransmisikan data ketika ada perubahan nilai sensor yang melampaui ambang batas.

Sebagai alternatif dari arsitektur clustering, protokol Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS) menggunakan pendekatan berbasis rantai, di mana setiap node hanya berkomunikasi dengan tetangga terdekatnya untuk mengirim dan menerima data. Meskipun efektif dalam mengurangi jarak transmisi, pendekatan ini memiliki latensi yang lebih tinggi. Tren modern menunjukkan adanya pengembangan model hibrid yang menggabungkan keunggulan beberapa pendekatan, seperti mengintegrasikan mekanisme clustering dengan pengumpulan data berbasis ambang batas untuk jaringan heterogen, atau menggabungkan clustering dengan mekanisme kontrol kemacetan (*congestion control*).

Gelombang inovasi terkini didominasi oleh integrasi algoritma optimisasi metaheuristik dan kecerdasan buatan untuk mengatasi masalah optimisasi pemilihan CH dan rute komunikasi. Algoritma yang terinspirasi dari alam (nature-inspired) seperti Ant Colony Optimization (ACO) digunakan untuk menemukan rute yang efisien dan seimbang bebannya. Algoritma lain seperti Particle Swarm Optimization (PSO) juga marak diimplementasikan untuk optimisasi energi, baik secara mandiri maupun dalam bentuk hibrid, termasuk varian seperti Two Sub-Swarms PSO. Selain itu, berbagai algoritma swarm intelligence lainnya seperti Artificial Bee Colony dan Butterfly Optimization Algorithm juga telah dieksplorasi untuk meningkatkan efisiensi energi jaringan. Bahkan, pendekatan Deep Learning kini mulai diterapkan untuk merancang protokol routing yang lebih cerdas dan adaptif.

Untuk memberikan gambaran yang lebih ringkas, perbandingan karakteristik utama dari berbagai pendekatan protokol dapat dilihat di Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan antara Karakteristik Protokol Komunikasi pada WSN

Protokol	Kategori	Mekanisme Utama	Keunggulan	Keterbatasan
LEACH & Variannya	Clustering	Rotasi CH acak dan probabilistik.	Sederhana, distribusi beban energi merata.	Pemilihan CH tidak berbasis energi sisa, tidak optimal untuk jaringan heterogen.
HEED	Clustering	Pemilihan CH berdasarkan energi sisa dan biaya komunikasi.	Masa hidup jaringan lebih panjang, distribusi CH lebih baik.	Overhead komputasi pada fase inisialisasi lebih tinggi.
TEEN	Clustering	Transmisi data berbasis ambang batas nilai sensor (threshold).	Sangat efisien untuk aplikasi reaktif, mengurangi transmisi data.	Tidak cocok untuk aplikasi yang memerlukan data periodic.
PEGASIS	Chain-based	Pembentukan rantai antar node untuk transmisi data secara berantai.	Konsumsi energi transmisi rendah karena jarak pendek.	Latensi tinggi, rentan terhadap kegagalan node tunggal.
Protokol berbasis Optimisasi (ACO, PSO, dll.)	Optimisasi / AI	Menggunakan algoritma metaheuristik untuk optimisasi pemilihan CH dan rute.	Sangat adaptif, dapat menemukan solusi mendekati optimal, performa jaringan lebih baik.	Kompleksitas komputasi lebih tinggi, memerlukan sumber daya lebih pada node.

Diskusi Temuan, Implikasi, dan Arah Penelitian Masa Depan

Hasil analisis ini selaras dengan tujuan penelitian, yaitu memetakan lanskap protokol komunikasi hemat energi di WSN. Temuan utama menegaskan bahwa tidak ada solusi tunggal yang sempurna; pilihan protokol sangat bergantung pada skenario aplikasi, mulai dari pemantauan lingkungan berbasis IoT, manajemen energi pada gedung pintar, hingga pengukuran energi listrik. Tren evolusi dari protokol statis ke arah protokol yang cerdas dan adaptif menunjukkan bahwa fokus penelitian telah bergeser dari sekadar penghematan energi menjadi optimisasi multi-objektif yang mencakup latensi, keandalan, dan keamanan.

Salah satu celah penelitian (research gap) yang signifikan dan masih terus dieksplorasi adalah penanganan jaringan heterogen, di mana node-node memiliki kapabilitas energi dan komputasi yang berbeda. Algoritma optimisasi menunjukkan potensi besar untuk mengatasi tantangan ini. Selain itu, seiring konvergensi WSN dengan paradigma Internet of Things (IoT), tantangan baru muncul. Penerapan WSN dalam skala besar seperti di lingkungan perkotaan menuntut kinerja jaringan yang andal dan terintegrasi dengan teknologi lain. Isu privasi dan keamanan data pada penerapan IoT juga menjadi krusial dan harus diintegrasikan dalam desain protokol di masa depan.

Arah penelitian di masa depan tampaknya akan berfokus pada integrasi WSN dengan teknologi jaringan generasi baru seperti 5G untuk mendukung aplikasi IoT yang membutuhkan latensi rendah dan throughput tinggi. Lebih jauh lagi, integrasi dengan arsitektur jaringan modern seperti Software-Defined Networking (SDN) dan Network Functions Virtualization (NFV) dapat menawarkan fleksibilitas dan manajemen jaringan yang lebih terpusat dan efisien. Penelitian juga perlu mempertimbangkan faktor mobilitas node, yang dapat mengubah topologi jaringan secara dinamis dan menuntut protokol yang lebih adaptif. Dengan demikian, protokol WSN masa depan harus dirancang secara holistik: tidak hanya efisien secara energi, tetapi juga cerdas, aman, dapat diskalakan, dan siap diintegrasikan dalam ekosistem IoT dan jaringan 5G yang kompleks.

V. PEMBAHASAN

Interpretasi Temuan dan Kontribusi Studi

Hasil analisis komprehensif ini menegaskan bahwa efisiensi energi adalah tantangan fundamental dalam operasional Jaringan Sensor Nirkabel (WSN). Kontribusi utama dari survei ini adalah pemetaan evolusi protokol komunikasi, yang teridentifikasi dalam tiga gelombang utama: (1) protokol *clustering* dasar seperti LEACH sebagai fondasi, (2) pengembangan protokol hibrid dan berbasis rantai seperti HEED, TEEN, dan PEGASIS, serta (3) integrasi algoritma optimisasi cerdas dan kecerdasan buatan (AI).

Temuan ini mengonfirmasi bahwa tidak ada solusi tunggal yang sempurna untuk semua skenario. Pilihan protokol sangat bergantung pada kebutuhan spesifik aplikasi, baik itu untuk pemantauan lingkungan berbasis IoT, manajemen energi gedung pintar, atau aplikasi reaktif. Wawasan paling signifikan yang diperoleh adalah adanya pergeseran fokus penelitian yang jelas. Riset telah bergerak dari sekadar penghematan energi (seperti pada LEACH awal) menuju optimisasi multi-objektif yang menyeimbangkan konsumsi energi dengan faktor krusial lainnya seperti latensi, keandalan, dan keamanan jaringan.

Kontekstualisasi dan Perbandingan Temuan

Temuan survei ini selaras dengan konsensus dalam literatur WSN. Studi ini mengontekstualisasikan LEACH sebagai protokol pelopor yang penting, namun juga menyoroti kelemahan utamanya yang telah banyak dilaporkan: pemilihan *cluster head* (CH) yang bersifat probabilistik, yang tidak optimal untuk jaringan heterogen atau berskala besar.

Sebagai respons terhadap keterbatasan LEACH, analisis ini menunjukkan bagaimana protokol selanjutnya seperti HEED secara efektif mengatasinya dengan memasukkan parameter energi sisa (*residual energy*) dan biaya komunikasi dalam pemilihan CH. Demikian pula, TEEN diidentifikasi sebagai solusi yang sangat efisien untuk aplikasi reaktif dengan mekanisme ambang batasnya, sebuah temuan yang didukung oleh penelitian spesifik tentang protokol tersebut.

Survei ini menempatkan pendekatan berbasis rantai seperti PEGASIS sebagai alternatif arsitektur *clustering*, dengan menyoroti pertukaran (*trade-off*) yang melekat: konsumsi energi transmisi yang rendah karena jarak pendek, namun dibayar dengan latensi yang lebih tinggi dan kerentanan terhadap kegagalan node. Yang terpenting, analisis ini mengukuhkan tren terkini yang didominasi oleh algoritma metaheuristik (seperti PSO, ACO) dan AI. Pendekatan ini, meskipun secara komputasi lebih kompleks, terbukti mampu memberikan solusi yang sangat adaptif dan mendekati optimal, yang sejalan dengan banyak studi terbaru di bidang optimisasi WSN.

Keterbatasan Penelitian

Keterbatasan utama dari penelitian ini terletak pada metodologinya. Sebagai sebuah kajian literatur (literature review), studi ini tidak melibatkan eksperimen empiris maupun simulasi untuk validasi perbandingan kinerja protokol. Analisis yang disajikan bergantung sepenuhnya pada hasil dan temuan yang dilaporkan oleh penelitian-penelitian terdahulu yang dikaji. Akibatnya, perbandingan keunggulan dan keterbatasan protokol didasarkan pada temuan yang dilaporkan dalam konteks masing-masing studi (yang mungkin menggunakan parameter dan skenario simulasi yang berbeda), bukan pada perbandingan *head-to-head* dalam satu lingkungan pengujian yang terkontrol.

Rekomendasi dan Arah Penelitian Masa Depan

Berdasarkan analisis dan sintesis temuan, beberapa celah penelitian (*research gap*) dan arah penelitian masa depan yang signifikan telah teridentifikasi:

1. Penanganan Jaringan Heterogen: Salah satu celah penelitian paling signifikan yang masih terus dieksplorasi adalah pengembangan protokol yang efisien untuk jaringan heterogen, di mana node-node memiliki

kapabilitas energi dan komputasi yang berbeda. Algoritma optimisasi adaptif menunjukkan potensi besar untuk mengatasi tantangan ini.

2. Integrasi IoT, Keamanan, dan Privasi: Seiring konvergensi WSN dengan paradigma *Internet of Things* (IoT), tantangan baru muncul. Protokol masa depan tidak hanya harus hemat energi tetapi juga harus mengintegrasikan mekanisme keamanan dan privasi yang kuat sejak awal desain.
3. Integrasi dengan Jaringan Generasi Baru (5G dan SDN): Arah penelitian harus berfokus pada integrasi WSN dengan teknologi jaringan baru seperti 5G untuk mendukung aplikasi IoT yang menuntut latensi rendah dan *throughput* tinggi. Selain itu, integrasi dengan arsitektur *Software-Defined Networking* (SDN) dan *Network Functions Virtualization* (NFV) dapat menawarkan manajemen jaringan yang lebih fleksibel dan efisien.
4. Dukungan Mobilitas: Faktor mobilitas node, yang dapat mengubah topologi jaringan secara dinamis, perlu dipertimbangkan secara lebih serius. Hal ini menuntut pengembangan protokol yang jauh lebih adaptif daripada yang ada saat ini.

Singkatnya, penelitian di masa depan disarankan untuk mengembangkan protokol WSN yang dirancang secara holistik: tidak hanya efisien secara energi, tetapi juga cerdas, aman, dapat diskalakan, dan siap diintegrasikan dalam ekosistem IoT dan jaringan 5G yang kompleks.

VI. KESIMPULAN

Kajian literatur ini secara komprehensif menjawab tujuan utama penelitian, yaitu untuk melakukan survei dan analisis terhadap berbagai protokol komunikasi guna meningkatkan efisiensi energi pada Jaringan Sensor Nirkabel (WSN). Hasil analisis menunjukkan evolusi protokol dari clustering dasar seperti LEACH hingga metode optimisasi cerdas berbasis AI, yang secara efektif menjawab tantangan efisiensi energi. Penelitian ini memajukan pemahaman dengan mengidentifikasi pergeseran fokus riset dari sekadar penghematan energi ke optimisasi multi-objektif yang mencakup latensi dan keamanan. Celah penelitian signifikan teridentifikasi pada penanganan jaringan heterogen dan tantangan integrasi IoT. Eksperimen masa depan disarankan untuk mengembangkan protokol adaptif yang aman dan terintegrasi dengan teknologi 5G dan SDN.

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/0000-0001-9146-4460>

Penulis Kedua: <https://orcid.org/0000-0002-3122-2035>

Penulis Ketiga: -

REFERENCES

- [1] A. Srivastava and P. K. Mishra, "A Survey on WSN Issues with its Heuristics and Meta-Heuristics Solutions," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 121, no. 1, pp. 745–814, Nov. 2021, doi: 10.1007/s11277-021-08659-x.
- [2] 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.
- [3] I. Daanoun, B. Abdennaceur, and A. Ballouk, "A comprehensive survey on LEACH-based clustering routing protocols in Wireless Sensor Networks," *Ad Hoc Netw.*, vol. 114, p. 102409, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.adhoc.2020.102409.

- [4] A. Ali and M. Vadivel, "Pegasis Double Cluster Head Hybrid Congestion Control in Wireless Sensor Networks," *J. Commun. Softw. Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 221–231, July 2021, doi: 10.24138/jcomss-2021-0032.
- [5] L. Z. N. Aini, S. Ikhwan, and J. G. A. Ginting, "Analisis Performansi Algoritma LEACH-C pada Wireless Sensor Network," *Arcitech J. Comput. Sci. Artif. Intell.*, vol. 3, no. 1, pp. 16–31, June 2023, doi: 10.29240/arcitech.v3i1.7301.
- [6] V. Maniezzo, L. M. Gambardella, and F. de Luigi, "Ant Colony Optimization," in *New Optimization Techniques in Engineering*, G. C. Onwubolu and B. V. Babu, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 2004, pp. 101–121. doi: 10.1007/978-3-540-39930-8_5.
- [7] S. Sharmin, I. Ahmedy, and R. Md Noor, "An Energy-Efficient Data Aggregation Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks Using Hybrid PSO," *Energies*, vol. 16, no. 5, p. 2487, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16052487.
- [8] K. Maheshwar and S. Veenadhari, "HCPFRP: Heterogeneous cluster prediction and formation routing protocol for wireless sensor network," *J. Curr. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 296–316, July 2023, doi: 10.59796/jcst.V13N2.2023.1745.
- [9] 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.
- [10] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, M. A. Huda, H. Hasbullah, and A. Rohman, "Computer Network Management Optimization Through Big Data Analysis Using Time Series Analysis Method," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 434–442, Feb. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4373.
- [11] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Noviyani Dwi Saputri, Fathur Rosi, and Rohilia Loati, "Optimalisasi Infrastruktur Cloud Networking melalui Integrasi SDN, NFV, dan Multi-Cloud," *J. Inform. Dan Teknologi Komput. JITEK*, vol. 5, no. 1, pp. 118–125, Mar. 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.6099.
- [12] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, and I. S. Maqom, "Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of Things (IoT) di Kampus," vol. 3, no. 2, 2023.
- [13] F. P. E. Putra, A. B. Tamam, R. W. Efendi, and Z. Muim, "Optimasi Keamanan DNS: Eksplorasi Optimal dengan Implementasi DNS Security Extensions (DNSSEC)," *REMIK Ris. Dan E-J. Manaj. Inform. Komput.*, vol. 8, no. 1, pp. 349–358, Jan. 2024, doi: 10.33395/remik.v8i1.13398.
- [14] Y. Ge, S. Wang, and J. Ma, "Optimization on TEEN routing protocol in cognitive wireless sensor network," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2018, no. 1, p. 27, Feb. 2018, doi: 10.1186/s13638-018-1039-z.
- [15] J. Ma, S. Wang, C. Meng, Y. Ge, and J. Du, "Hybrid energy-efficient APTEEN protocol based on ant colony algorithm in wireless sensor network," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2018, no. 1, p. 102, May 2018, doi: 10.1186/s13638-018-1106-5.
- [16] M. Bilal, E. U. Munir, and F. K. Alarfaj, "Hybrid Clustering and Routing Algorithm with Threshold-Based Data Collection for Heterogeneous Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 22, no. 15, p. 5471, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22155471.
- [17] G. T. Zain, R. Primananda, and A. S. Budi, "Implementasi Protokol Routing HEED pada Wireless Sensor Network dengan Perangkat Berbasis Modul Komunikasi nRF24L01," *J. Teknol. Inf. Dan Ilmu Komput.*, vol. 9, no. 7, pp. 1747–1756, Dec. 2022, doi: 10.25126/jtiik.2022976835.
- [18] D. T. Murdiansyah, "OPTIMASI JARINGAN SENSOR NIRKABEL MENGGUNAKAN ALGORITMA TWO SUB-SWARMS PSO DISKRIT," *Indones. J. Comput. Indo-JC*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, Mar. 2016, doi: 10.21108/INDOJC.2016.1.1.36.
- [19] K. Chinnaiah and K. N. Rao, "Swarm energy efficient power efficient gathering in sensor information systems protocol in wireless sensor networks," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 31, no. 1, pp. 459–469, July 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v31.i1.pp459-469.
- [20] A. H. N. Nashiruddin and L. Rakhmawati, "Literature Review: Energy Efficiency Mechanisms using Data Reduction in Wireless Sensor Networks (WSNs) Applications," *INAJEEE Indones. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 5–13, Mar. 2022, doi: 10.26740/inajeee.v5n1.p5-13.
- [21] Y. Zhao, J. Wang, Y. Luo, and J. Le, " (α, β, k) -anonymity: An effective privacy preserving model for databases," in *2009 International Conference on Test and Measurement*, Dec. 2009, pp. 412–415. doi: 10.1109/ICTM.2009.5412903.
- [22] R. M. Adib, "The role of reliability & maintainability in managing risk," in *RAMS '06. Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2006.*, Jan. 2006, pp. iii–iii. doi: 10.1109/RAMS.2006.1677322.

- [23] F. P. Eka Putra, I. N. Sudana Degeng, S. Ulfa, and W. Kamdi, "The Evolution of Quality Education: Impacts and Challenges of Using Open Educational Resources (OER) and Open Educational Practices (OEP) in the Conceive - Design - Implement - Operate (CDIO) Framework.," *TEM J.*, vol. 13, no. 1, p. 386, Feb. 2024, doi: 10.18421/TEM131-40.
- [24] Y. M. Raghavendra and U. B. Mahadevaswamy, "Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Network Based on Composite Fuzzy Methods," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 114, no. 3, pp. 2569–2590, Oct. 2020, doi: 10.1007/s11277-020-07490-0.
- [25] J.-F. Lin, Z.-J. Hong, J.-T. Wu, X.-Y. Tung, C.-H. Yang, and Y.-C. Yen, "Low-Voltage and Low-Power True-Single-Phase 16-Transistor Flip-Flop Design," *Sensors*, vol. 22, no. 15, p. 5696, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22155696.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] I. Daanoun, B. Abdennaceur, and A. Ballouk, "A comprehensive survey on LEACH-based clustering routing protocols in Wireless Sensor Networks," *Ad Hoc Netw.*, vol. 114, p. 102409, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.adhoc.2020.102409.
- [29] L. Z. N. Aini, S. Ikhwan, and J. G. A. Ginting, "Analisis Performansi Algoritma LEACH-C pada Wireless Sensor Network," *Arcitech J. Comput. Sci. Artif. Intell.*, vol. 3, no. 1, pp. 16–31, June 2023, doi: 10.29240/arcitech.v3i1.7301.
- [30] "Overweight or obesity associations with physical aggression in children and adolescents: A meta-analysis | Request PDF," *ResearchGate*, Aug. 2025, doi: 10.1177/0165025417690265.
- [31] Y. Ge, S. Wang, and J. Ma, "Optimization on TEEN routing protocol in cognitive wireless sensor network," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2018, no. 1, p. 27, Feb. 2018, doi: 10.1186/s13638-018-1039-z.
- [32] J. Ma, S. Wang, C. Meng, Y. Ge, and J. Du, "Hybrid energy-efficient APTEEN protocol based on ant colony algorithm in wireless sensor network," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2018, no. 1, p. 102, May 2018, doi: 10.1186/s13638-018-1106-5.
- [33] K. Chinnaiyah and K. N. Rao, "Swarm energy efficient power efficient gathering in sensor information systems protocol in wireless sensor networks," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 31, no. 1, pp. 459–469, July 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v31.i1.pp459-469.
- [34] A. Ali and M. Vadivel, "Pegasis Double Cluster Head Hybrid Congestion Control in Wireless Sensor Networks," *J. Commun. Softw. Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 221–231, July 2021, doi: 10.24138/jcomss-2021-0032.
- [35] F. P. E. Putra, R. W. Efendi, A. B. Tamam, and W. A. Pramadi, "Tren dan Praktik Terbaik dalam Pengembangan Web Berbasis API : Kajian Literatur terhadap Framework Laravel dan React," *Infomatek*, vol. 27, no. 1, pp. 165–178, June 2025, doi: 10.23969/infomatek.v27i1.25122.
- [36] S. Sharmin, I. Ahmedy, and R. Md Noor, "An Energy-Efficient Data Aggregation Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks Using Hybrid PSO," *Energies*, vol. 16, no. 5, p. 2487, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16052487.
- [37] D. T. Mardiansyah, "OPTIMASI JARINGAN SENSOR NIRKABEL MENGGUNAKAN ALGORITMA TWO SUB-SWARMS PSO DISKRIT," *Indones. J. Comput. Indo-JC*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, Mar. 2016, doi: 10.21108/INDOJC.2016.1.1.36.
- [38] S. N. Makhadmeh *et al.*, "Recent Advances in Butterfly Optimization Algorithm, Its Versions and Applications," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 30, no. 2, pp. 1399–1420, Mar. 2023, doi: 10.1007/s11831-022-09843-3.
- [39] J. Bai *et al.*, "An adaptive intelligent routing algorithm based on deep reinforcement learning," *Comput. Commun.*, vol. 216, pp. 195–208, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.comcom.2023.12.039.
- [40] J.-F. Tsai, M.-H. Lin, and D.-Y. Wen, "Global Optimization for Mixed–Discrete Structural Design," *Symmetry*, vol. 12, no. 9, p. 1529, Sept. 2020, doi: 10.3390/sym12091529.
- [41] H. Yu, W. An, and R. Zhu, "Extended Target Tracking and Feature Estimation for Optical Sensors Based on the Gaussian Process," *Sensors*, vol. 19, no. 7, p. 1704, Jan. 2019, doi: 10.3390/s19071704.

- [42] K. Maheshwar and S. Veenadhari, "HCPFRP: Heterogeneous cluster prediction and formation routing protocol for wireless sensor network," *J. Curr. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 296–316, July 2023, doi: 10.59796/jcst.V13N2.2023.1745.
- [43] D. Ruan and J. Huang, "A PSO-Based Uneven Dynamic Clustering Multi-Hop Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 19, no. 8, p. 1835, Jan. 2019, doi: 10.3390/s19081835.
- [44] 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.
- [45] F. P. E. Putra, M. Riski, M. S. Yahya, and M. H. Ramadhan, "Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G," *J. Sistim Inf. Dan Teknol.*, pp. 167–174, July 2023, doi: 10.37034/jsisfotek.v5i2.233.
- [46] F. P. E. Putra, A. M. U. Solichin, M. N. W. Hakim, and M. T. Ramadhan, "Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia," *Infotek J. Inform. Dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 415–425, July 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30559.
- [47] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Mustafida Mustafida, Royhan Alfadili, and Afifatun Nahriyah, "Perancangan Jaringan Nirkabel Berbasis Mesh untuk Menunjang Aplikasi Smart City," *J. Inform. Dan Tekonologi Komput. JITEK*, vol. 5, no. 1, pp. 84–92, Mar. 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5934.
- [48] F. P. E. Putra, N. D. Saputri, F. Rosi, and R. Loati, "Optimalisasi Infrastruktur Cloud Networking melalui Integrasi SDN, NFV, dan Multi-Cloud," *J. Inform. Dan Tekonologi Komput. JITEK*, vol. 5, no. 1, pp. 118–125, Mar. 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.6099.
- [49] [1] L. Z. N. Aini, S. Ikhwan, and J. G. A. Ginting, "Analisis Performansi Algoritma LEACH-C pada Wireless Sensor Network," *Arcitech J. Comput. Sci. Artif. Intell.*, vol. 3, no. 1, pp. 16–31, June 2023, doi: 10.29240/arcitech.v3i1.7301.
- [50] K. Nitya, M. M. Prasad Reddy, B. Nancharaiah, and B. Balaji, "A Unique Priority Aware Adaptive Optimization Protocol for Enhancing Lifetime in Heterogeneous IoT Based Wireless Sensor Networks," *Int. J. Eng.*, vol. 39, no. 7, pp. 1578–1594, 2026, doi: 10.5829/ije.2026.39.07a.04.

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