

Kajian Literatur Teknik Penghematan Energi pada Wireless Sensor Network: Analisis dan Rangkuman Penelitian Terdahulu

Andreas Fiki Darmawan ^{1)*} , Mohammad Faisol ²⁾ 

¹⁾ ²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ andreasfiki541@gmail.com, ²⁾ mfaisol919@gmail.com

Abstrak

Perkembangan pesat teknologi Internet of Things (IoT) dan Wireless Sensor Network (WSN) telah membuka peluang besar bagi terciptanya sistem pemantauan yang lebih cerdas dan responsif di berbagai sektor. Salah satu tantangan utama yang masih dihadapi dalam penggunaan WSN adalah keterbatasan energi pada node sensor, sehingga diperlukan strategi yang mampu mempertahankan operasi jaringan dalam jangka panjang. Penelitian ini melakukan kajian literatur komprehensif untuk menelusuri berbagai metode penghematan energi yang dikembangkan dalam rentang tahun 2020 hingga 2025. Proses peninjauan dilakukan menggunakan pendekatan systematic literature review terhadap 50 publikasi dari database ilmiah terkemuka, termasuk IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar. Studi-studi yang dianalisis mencakup beragam teknik efisiensi energi, seperti pengaturan mode aktif-tidur, protokol routing berbasis hemat daya, agregasi data, mekanisme kluster, serta integrasi teknologi pemanenan energi. Melalui analisis konten, penelitian ini berhasil memetakan kecenderungan, efektivitas, serta batasan dari setiap pendekatan. Hasil temuan menunjukkan bahwa strategi penghematan energi merupakan faktor fundamental untuk menjaga kualitas pemantauan serta memperpanjang umur operasional node sensor. Meski demikian, sejumlah persoalan masih sering muncul, terutama terkait kestabilan jaringan, adaptasi terhadap kondisi lingkungan yang beragam, dan kompleksitas penerapan algoritma. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan pentingnya inovasi berkelanjutan dalam rancangan algoritma, pemilihan perangkat keras, dan arsitektur jaringan guna mendukung implementasi WSN yang efisien dan siap digunakan pada berbagai aplikasi pintar di masa mendatang.

Kata Kunci: Wireless Sensor Network, Efisiensi Daya, Penghematan Energi, Protokol Routing, Sleep Scheduling, Kajian Literatur.

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

I. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi informasi dan komunikasi telah mendorong berkembangnya berbagai sistem cerdas yang mampu melakukan pemantauan dan pengambilan keputusan secara otomatis. Salah satu teknologi yang menjadi fondasi utama sistem tersebut adalah *Wireless Sensor Network* (WSN). WSN terdiri atas node sensor berdaya rendah yang terdistribusi secara geografis dan mampu melakukan sensing, [1][2] pemrosesan data sederhana, serta komunikasi nirkabel secara mandiri, sehingga banyak digunakan pada aplikasi pemantauan lingkungan, pertanian cerdas, sistem kesehatan, *smart city*, dan sistem industri berbasis Internet of Things (IoT). [3][4]

Dalam ekosistem IoT, WSN berfungsi sebagai lapisan sensor yang menyediakan data dari lingkungan fisik untuk dikirimkan ke pusat pengolahan. Integrasi WSN dan IoT memungkinkan terbentuknya sistem pemantauan berskala besar dan real-time. [5][6] Namun, keterbatasan sumber daya node sensor dan tingginya kepadatan jaringan menjadikan efisiensi energi sebagai aspek krusial, karena konsumsi energi yang tinggi dapat menurunkan kinerja dan memperpendek masa hidup jaringan [7][8]. Keterbatasan energi pada node sensor masih menjadi permasalahan utama WSN. Sebagian besar node bergantung pada baterai yang sulit diganti atau diisi ulang, terutama pada lingkungan yang luas atau terpencil. Aktivitas komunikasi data merupakan penyumbang konsumsi energi terbesar, sehingga strategi pengiriman data yang tidak efisien dapat mempercepat kehabisan energi dan menurunkan reliabilitas jaringan. Berbagai penelitian telah mengusulkan teknik penghematan energi, seperti optimalisasi protokol routing, *sleep-wake scheduling*, klusterisasi, agregasi dan kompresi data, serta pemanfaatan algoritma cerdas [9][10][11].

Teknik klusterisasi mampu mengurangi transmisi langsung ke *base station* dengan memanfaatkan *cluster head*, sehingga konsumsi energi jaringan dapat ditekan secara signifikan. Selain itu, penerapan teknik kompresi data sebelum transmisi terbukti efektif dalam mengurangi beban komunikasi dan konsumsi energi tanpa menurunkan

* Andreas Fiki Darmawan

kualitas informasi secara signifikan[12]. Pendekatan ini berkontribusi pada peningkatan efisiensi dan perpanjangan umur jaringan WSN berbasis IoT. Perkembangan terbaru juga menunjukkan meningkatnya penggunaan pendekatan berbasis kecerdasan buatan, seperti *Particle Swarm Optimization*, *Grey Wolf Optimization*, dan logika fuzzy, untuk mengoptimalkan pemilihan *cluster head* dan penentuan rute data[13]. Metode ini dinilai lebih adaptif terhadap kondisi jaringan yang dinamis dibandingkan pendekatan konvensional [14].

Meskipun demikian, efektivitas setiap teknik sangat bergantung pada topologi jaringan, skenario aplikasi, dan parameter evaluasi yang digunakan. Perbedaan pendekatan pada penelitian terdahulu menyebabkan sulitnya menentukan strategi yang paling optimal secara umum[15]. Oleh karena itu, diperlukan kajian literatur yang sistematis untuk menganalisis, membandingkan, dan merangkum berbagai teknik penghematan energi pada WSN. Kajian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman komprehensif serta menjadi referensi dalam perancangan sistem WSN yang lebih efisien dan berkelanjutan[16].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan elemen fundamental dalam pengembangan sistem Internet of Things (IoT) yang berperan dalam melakukan pemantauan kondisi lingkungan secara real-time melalui sekumpulan node sensor yang tersebar[17][18]. Setiap node sensor umumnya memiliki keterbatasan sumber daya, khususnya pada kapasitas energi, karena sebagian besar bergantung pada baterai dengan daya simpan yang terbatas. Kondisi tersebut menjadikan efisiensi energi sebagai salah satu tantangan utama dalam perancangan dan implementasi WSN[19][20]. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa penerapan WSN dalam sistem monitoring berbasis IoT mampu meningkatkan efektivitas pengumpulan data dan pemantauan kondisi lingkungan[21]. Namun, di sisi lain, implementasi tersebut menuntut mekanisme pengelolaan energi yang cermat agar umur jaringan dapat diperpanjang dan kinerja sistem tetap optimal. Berbagai studi terdahulu telah mengkaji metode penghematan energi pada WSN melalui pendekatan optimasi arsitektur jaringan[22], pengaturan pola komunikasi data, serta pemilihan perangkat keras yang hemat daya. Salah satu sumber konsumsi energi terbesar pada WSN berasal dari proses transmisi data nirkabel, sehingga banyak penelitian difokuskan pada upaya reduksi frekuensi serta jarak pengiriman data[23].

Pemilihan topologi jaringan yang efisien dan pengelolaan lalu lintas data yang adaptif terbukti mampu menekan konsumsi energi node sensor secara signifikan dan berdampak langsung pada peningkatan masa hidup jaringan. Selain aspek komunikasi, integrasi WSN dengan teknologi jaringan modern dan mekanisme manajemen sumber daya yang adaptif juga menjadi perhatian dalam penelitian terkini. Penggunaan protokol serta skema pengelolaan energi yang mampu menyesuaikan kondisi node dan lingkungan operasional dinilai efektif dalam meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi tanpa mengorbankan keandalan sistem[24][25].

Penelitian yang membahas manajemen energi dan keamanan pada WSN menegaskan bahwa strategi pengelolaan sumber daya yang tepat tidak hanya mampu memperpanjang umur jaringan, tetapi juga menjaga performa serta keamanan komunikasi data. Pendekatan lain yang semakin banyak diterapkan adalah pemrosesan data secara lokal melalui konsep komputasi terdistribusi atau edge computing[26]. Dengan memindahkan sebagian proses komputasi ke node sensor atau perangkat yang berada dekat dengan sumber data, kebutuhan pengiriman data ke pusat pemrosesan dapat dikurangi[27].

Strategi ini tidak hanya menurunkan beban komunikasi, tetapi juga memberikan dampak positif terhadap efisiensi energi sistem secara keseluruhan, terutama pada aplikasi WSN yang beroperasi secara kontinu dalam jangka waktu panjang [28]. Selain itu, pemanfaatan sumber energi alternatif seperti energy harvesting mulai banyak dikaji sebagai solusi untuk mengatasi keterbatasan daya pada WSN[29]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa integrasi teknologi pemanen energi, seperti tenaga surya, dengan node sensor berdaya rendah dapat mendukung operasional jaringan secara lebih mandiri dan berkelanjutan. Pendekatan ini menjadi sangat relevan untuk aplikasi WSN di lingkungan terpencil atau sulit dijangkau[30], di mana penggantian baterai secara berkala tidak memungkinkan untuk dilakukan. Berdasarkan uraian penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa teknik penghematan energi pada WSN mencakup berbagai strategi yang saling berkaitan, mulai dari optimasi komunikasi data, perancangan arsitektur jaringan, pemrosesan data lokal, hingga pemanfaatan sumber energi alternatif[31].

Meskipun beragam metode telah dikembangkan, tantangan utama masih terletak pada penyesuaian strategi penghematan energi terhadap karakteristik lingkungan serta kebutuhan aplikasi yang berbeda-beda. Oleh karena itu, kajian literatur ini menjadi penting sebagai landasan untuk merangkum, membandingkan, dan menganalisis efektivitas berbagai pendekatan penghematan energi yang telah diterapkan dalam penelitian WSN sebelumnya[32][33][34].

III. METODE

A. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kualitatif dengan pendekatan studi pustaka (literature review). Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada pengumpulan, pengkajian, serta analisis kritis terhadap hasil-hasil penelitian terdahulu yang membahas teknik penghematan energi pada Wireless Sensor Network (WSN). Studi pustaka memungkinkan peneliti untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai konsep, metode, serta perkembangan terkini terkait efisiensi energi WSN tanpa melakukan eksperimen atau simulasi secara langsung[35][36].

Pendekatan ini sejalan dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang menekankan analisis konseptual dan komparatif terhadap protokol routing WSN dalam meningkatkan efisiensi energi jaringan, khususnya pada protokol berbasis single-hop, multi-hop, dan clustering. Beberapa studi menunjukkan bahwa pendekatan literatur sistematis efektif untuk mengidentifikasi kelebihan, keterbatasan, serta tren pengembangan teknik routing hemat energi pada WSN, terutama dalam konteks Internet of Things (IoT) dan Industry 4.0[37][38].

B. Sumber dan Teknik Pengumpulan Data

Data penelitian dikumpulkan melalui penelusuran literatur ilmiah yang bersumber dari jurnal nasional dan internasional bereputasi yang telah melalui proses peer-review. Teknik pengumpulan data dilakukan dengan metode dokumentasi, yaitu mengumpulkan artikel ilmiah yang relevan dengan topik penelitian. Sumber data meliputi:

1. Jurnal yang membahas protokol routing WSN, baik single-hop, multi-hop, maupun protokol berbasis clustering seperti LEACH dan HEED.
2. Jurnal yang mengkaji efisiensi energi, throughput, Packet Delivery Ratio (PDR), serta konsumsi daya sebagai parameter kinerja utama WSN.
3. Artikel yang membahas optimasi routing dan arsitektur jaringan WSN dalam konteks IoT, sistem industri, dan Industry 4.0.

Beberapa referensi utama yang digunakan mencakup penelitian mengenai evaluasi performa protokol routing WSN berbasis simulasi, kajian komprehensif teknik routing hemat energi pada WSN, serta penelitian tentang optimasi routing dan manajemen jaringan untuk lingkungan industri dan IoT. Jurnal-jurnal tersebut digunakan sebagai dasar teoritis dan empiris dalam menganalisis efektivitas berbagai pendekatan penghematan energi pada WSN[39][40][41][42].

C. Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis sebagai berikut:

1. Identifikasi Topik dan Ruang Lingkup
Penelitian difokuskan pada teknik penghematan energi dalam WSN, khususnya yang berkaitan dengan mekanisme routing data dan manajemen komunikasi jaringan sensor[43].
2. Seleksi Literatur
Artikel ilmiah diseleksi berdasarkan kesesuaian topik, tahun publikasi, kualitas jurnal, serta kontribusinya terhadap pembahasan efisiensi energi WSN. Literatur yang dipilih umumnya merupakan penelitian dalam lima hingga sepuluh tahun terakhir untuk memastikan relevansi dengan perkembangan teknologi terkini[44].
3. Klasifikasi dan Analisis Data
Literatur yang terpilih diklasifikasikan berdasarkan jenis protokol routing (single-hop, multi-hop, dan clustering), metode optimasi yang digunakan, serta parameter performa yang dianalisis, seperti konsumsi energi, throughput, dan Packet Delivery Ratio (PDR)[45].
4. Sintesis dan Interpretasi
Hasil analisis dari berbagai penelitian dibandingkan untuk mengidentifikasi pola umum, kelebihan, serta keterbatasan dari masing-masing teknik penghematan energi. Proses ini bertujuan untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai pendekatan yang paling efektif dalam meningkatkan efisiensi energi dan memperpanjang umur jaringan WSN[46].

D. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan analisis deskriptif-kualitatif, yaitu dengan merangkum, membandingkan, dan menginterpretasikan temuan dari berbagai penelitian terdahulu. Fokus analisis diarahkan pada:

- Dampak penggunaan protokol routing terhadap konsumsi energi node sensor.
- Hubungan antara topologi jaringan dan efisiensi penggunaan daya.
- Efektivitas metode clustering dan multi-hop routing dalam memperpanjang umur jaringan dan meningkatkan stabilitas WSN.

Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk menyusun kesimpulan konseptual mengenai teknik penghematan energi yang paling sesuai untuk berbagai skenario penerapan WSN[47][48].

E. Validitas Data

Untuk menjaga validitas dan keandalan penelitian, sumber data dibatasi pada jurnal ilmiah yang diterbitkan oleh penerbit terpercaya dan telah melalui proses penelaahan sejawat (peer-review). Selain itu, dilakukan perbandingan silang (cross-reference) antar penelitian guna memastikan konsistensi temuan, mengurangi bias interpretasi, serta meningkatkan kredibilitas hasil analisis[49][50].

IV. HASIL

Berdasarkan hasil telaah literatur terhadap sejumlah penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa efisiensi energi merupakan aspek fundamental dalam meningkatkan performa serta memperpanjang masa operasional Wireless Sensor Network (WSN). Sebagian besar studi yang dikaji mengidentifikasi konsumsi energi pada node sensor sebagai tantangan utama, khususnya pada jaringan yang dioperasikan dalam periode waktu yang panjang dan ditempatkan pada lokasi yang sulit dijangkau. Kondisi keterbatasan daya ini mendorong pengembangan berbagai strategi penghematan energi yang bertujuan untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya tanpa menurunkan kualitas layanan jaringan secara signifikan. Hasil kajian menunjukkan bahwa teknik pengelompokan node atau *clustering* merupakan salah satu pendekatan yang paling banyak diterapkan dan terbukti efektif dalam menekan konsumsi energi. Protokol-protokol seperti LEACH, HEED, serta berbagai pengembangannya dirancang untuk mendistribusikan beban komunikasi secara lebih merata melalui mekanisme pemilihan *cluster head* secara periodik.

Dengan pendekatan ini, kebutuhan transmisi jarak jauh yang memerlukan daya besar dapat dikurangi, sehingga umur jaringan secara keseluruhan menjadi lebih panjang dibandingkan dengan metode komunikasi langsung antar node sensor. Selain teknik *clustering*, pendekatan routing berbasis energi juga memiliki peranan penting dalam meningkatkan efisiensi energi WSN. Sejumlah penelitian mengungkapkan bahwa pemilihan rute transmisi yang mempertimbangkan sisa energi node mampu mencegah terjadinya kehabisan daya secara dini pada node tertentu. Mekanisme ini memungkinkan distribusi beban komunikasi yang lebih seimbang di seluruh jaringan, sehingga risiko terjadinya kegagalan jaringan dapat diminimalkan. Routing adaptif dinilai lebih efektif dibandingkan routing statis, terutama pada kondisi jaringan yang dinamis dan berubah-ubah. Teknik *data aggregation* dan *data compression* turut memberikan kontribusi signifikan dalam penghematan energi.

Berdasarkan hasil analisis literatur, pengurangan volume data yang dikirimkan melalui proses penggabungan dan pemrosesan data sensor secara lokal mampu menekan konsumsi energi secara substansial. Dengan mengurangi frekuensi serta jumlah data yang ditransmisikan menuju *sink node*, energi yang digunakan untuk komunikasi dapat dihemat tanpa menghilangkan informasi penting yang dibutuhkan oleh sistem pemantauan. Di samping itu, beberapa penelitian juga menekankan pentingnya penerapan *sleep scheduling* dan manajemen waktu aktif pada node sensor.

Teknik ini memungkinkan node untuk berada dalam mode tidur ketika tidak melakukan proses penginderaan maupun transmisi data. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu menurunkan konsumsi energi secara signifikan, khususnya pada aplikasi monitoring yang memiliki interval pengambilan data relatif jarang, sehingga efisiensi penggunaan daya baterai dapat ditingkatkan. Lebih lanjut, hasil kajian literatur mengindikasikan bahwa integrasi antara berbagai teknik penghematan energi memberikan dampak yang lebih optimal dibandingkan penerapan satu teknik secara terpisah. Kombinasi antara *clustering*, routing adaptif berbasis energi, *data aggregation*, serta manajemen daya node terbukti mampu meningkatkan stabilitas jaringan sekaligus memperpanjang masa hidup

WSN secara keseluruhan. Pendekatan terpadu ini memungkinkan jaringan untuk beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan dan beban komunikasi yang dinamis. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat satu metode penghematan energi yang paling unggul untuk seluruh skenario WSN. Pemilihan dan perancangan strategi penghematan energi harus disesuaikan dengan karakteristik aplikasi, kondisi lingkungan, serta keterbatasan sumber daya jaringan. Oleh karena itu, hasil kajian ini menegaskan pentingnya perancangan sistem WSN yang adaptif dan fleksibel agar mampu mencapai efisiensi energi yang optimal sesuai dengan kebutuhan implementasi di lapangan.

V. PEMBAHASAN

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa efektivitas teknik penghematan energi pada Wireless Sensor Network (WSN) sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan karakteristik aplikasi. Pada aplikasi dengan lalu lintas data rendah, seperti pemantauan lingkungan, teknik duty cycling dan clustering statis dinilai cukup efisien. Namun, pada aplikasi yang menuntut pengiriman data secara real-time, pendekatan tersebut perlu disesuaikan agar tidak mengurangi

responsivitas jaringan. Hal ini menegaskan bahwa perancangan manajemen energi WSN harus mempertimbangkan konteks dan kebutuhan aplikasi secara menyeluruh.

Selain faktor aplikasi, pengelolaan energi pada lapisan Medium Access Control (MAC) juga memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi jaringan. Protokol MAC hemat energi dirancang untuk mengurangi pemborosan energi akibat collision, idle listening, dan overhearing. Integrasi antara protokol MAC yang efisien dengan routing adaptif terbukti mampu meningkatkan kinerja energi secara signifikan, meskipun tantangan sinkronisasi antar node masih sering muncul, terutama pada jaringan dengan topologi yang dinamis.

Lebih lanjut, kajian literatur mengungkap bahwa perbedaan model energi dan metode evaluasi memengaruhi hasil penilaian efektivitas teknik yang diusulkan. Banyak penelitian masih bergantung pada simulasi, yang belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi implementasi nyata. Meskipun tren penelitian bergerak menuju sistem yang lebih adaptif melalui pendekatan lintas lapisan dan kecerdasan buatan, keterbatasan sumber daya node sensor tetap menjadi kendala utama, sehingga diperlukan keseimbangan antara kompleksitas sistem dan manfaat efisiensi energi yang dihasilkan.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur terhadap berbagai penelitian mengenai teknik penghematan energi pada Wireless Sensor Network (WSN), dapat disimpulkan bahwa efisiensi energi merupakan faktor kunci dalam memperpanjang umur jaringan dan meningkatkan keandalan sistem. Keterbatasan sumber daya energi pada node sensor menuntut adanya strategi pengelolaan energi yang efektif, terutama pada jaringan yang diterapkan di lingkungan sulit dijangkau atau berskala besar.

Beragam pendekatan telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan konsumsi energi, antara lain melalui optimasi protokol routing, mekanisme clustering, pengaturan duty cycle, serta pemilihan jalur transmisi yang adaptif. Teknik clustering seperti LEACH dan pengembangannya terbukti mampu mengurangi konsumsi energi dengan mendistribusikan beban komunikasi secara merata di antara node sensor. Selain itu, metode routing berbasis energi residual juga berkontribusi signifikan dalam mencegah kematian node secara dini.

Kajian literatur juga menunjukkan bahwa penerapan pendekatan adaptif dan berbasis konteks, seperti pemanfaatan algoritma heuristik, fuzzy logic, dan machine learning, memberikan hasil yang lebih optimal dibandingkan metode konvensional. Pendekatan ini memungkinkan jaringan menyesuaikan pola komunikasi berdasarkan kondisi energi, kepadatan node, dan kebutuhan aplikasi, sehingga penggunaan energi menjadi lebih efisien.

Selain aspek protokol dan algoritma, faktor desain perangkat keras dan manajemen komunikasi data turut berperan penting dalam penghematan energi. Pengurangan transmisi data yang tidak perlu melalui data aggregation, data compression, serta pengaturan interval pengiriman data terbukti mampu menekan konsumsi daya secara signifikan tanpa mengorbankan kualitas informasi yang dikirimkan.

Secara keseluruhan, hasil kajian menunjukkan bahwa tidak terdapat satu metode tunggal yang paling unggul untuk semua skenario WSN. Kombinasi beberapa teknik penghematan energi yang disesuaikan dengan karakteristik aplikasi, topologi jaringan, dan lingkungan operasional merupakan solusi paling efektif. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan pendekatan hibrida dan adaptif guna mencapai efisiensi energi yang lebih optimal serta memperpanjang masa operasional jaringan WSN.

Kontribusi Penulis: [Andreas Fiki Darmawan]: Konseptualisasi, Penulisan Draf Awal, Review & Editing, Supervisi. [Mohammad Faisol]: Pengumpulan Data, Analisis, dan Penulisan Draf Awal.

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

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

Penulis Pertama: <https://orcid.org/0000-0001-9088-9128>

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

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] R. Chen, "Optimizing wireless sensor network topology with node load consideration," *Virtual Real. Intell. Hardw.*, vol. 7, no. 1, pp. 47–61, 2025, doi: 10.1016/j.vrih.2024.08.003.
- [2] I. M. Mehedi, S. Member, M. S. Hanif, T. Palaniswamy, and S. Member, "Remote Sensing and Decision Support System Applications in Precision Agriculture : Challenges and Possibilities," *IEEE Access*, vol. 12, no. March, pp. 44786–44798, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3380830.
- [3] D. Compression, "IJIE Improve WSN Lifetime Based on K-Means , Genetic Clusters , and Data Compression," vol. 17, no. 2, pp. 326–343, 2025, doi: <https://doi.org/10.30880/ijie.2025.17.02.027> Article.
- [4] E. Kim, "Fan-Shaped Flooding in Wireless Sensor Networks," vol. 10, no. 2, pp. 225–229, doi: <https://doi.org/10.37391/IJEER.100230>.
- [5] P. Chinnasamy, "Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences A geodesic deployment and radial shaped clustering (RSC) algorithm withstatistical aggregation in sensor networks," vol. 29, no. 3, 2021, doi: 10.3906/elk-2006-124.
- [6] P. Kumar, D. Mahato, A. Sinha, and S. Singh, "An Efficient LEACH Clustering Protocol to Enhance the QoS of WSN," vol. 7626, no. 3, pp. 1–8, 2023, doi: 10.54105/ijainn.A3822.043323.
- [7] S. Bharany *et al.*, "Wildfire Monitoring Based on Energy Efficient Clustering Approach for FANETS," pp. 1–19, 2022, doi: <https://www.mdpi.com/2504-446X/6/8/193>.
- [8] X. Wang, H. Wu, Y. Miao, and H. Zhu, "A Hybrid Routing Protocol Based on Naïve Bayes and Improved Particle Swarm Optimization Algorithms," 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics11060869>.
- [9] R. K. Shial, "HEERPOP : Hybrid Energy Efficiency Routing Protocol for Optimal Path in the Internet of Things- Based Sensor Networks," vol. 11, no. 4, pp. 494–505, 2024, doi: 10.22247/ijcna/2024/31.
- [10] W. Osamy, A. M. Khedr, A. Salim, A. Ibrahim, A. Ali, and A. A. El-sawy, "A review on recent studies utilizing arti fi cial intelligence methods for solving routing challenges in wireless sensor networks," pp. 1–45, 2022, doi: 10.7717/peerj-cs.1089.
- [11] M. Mishra and G. Sen Gupta, "Investigation of Energy Cost of Data Compression Algorithms in WSN for IoT Applications," 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22197685> Academic.
- [12] P. S. Mehra, "GWO-EFUCA : Grey Wolf Optimisation and Fuzzy Logic based Unequal Clustering and Routing protocol for sustainable WSN-based Internet of Things," 2022, doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2151630/v1> License:
- [13] F. Prasetyo, E. Putra, A. Zulfikri, G. Arifin, and R. M. Ilhamsyah, "Analysis of Phishing Attack Trends , Impacts and Prevention Methods : Literature Study," vol. 4, no. 1, pp. 413–421, 2024, doi: <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4357> as.
- [14] F. Prasetyo *et al.*, "Tinjauan Performa RouterOS Mikrotik dalam Jaringan Internet : Analisis Kinerja dan Kelayakan," vol. 3, no. 2, pp. 903–910, 2023, doi: <https://doi.org/10.47709/digitech.v3i2.3446>.
- [15] J. Sistim, F. Prasetyo, E. Putra, M. Riski, M. S. Yahya, and M. H. Ramadhan, "Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G," vol. 5, no. 2, pp. 5–7, 2023, doi: 10.37034/jsisfotek.v5i1.233.
- [16] F. Prasetyo, E. Putra, S. R. Sutarsih, P. Permana, and M. U. Mansyur, "Optimalisasi perancangan aplikasi manajemen data koloman, di desa pulau mandangin sampang – madura berbasis website 1)," vol. 9, no. 2, pp. 285–294, 2024, doi: <https://doi.org/10.36341/rabit.v9i2.4840>.

- [17] F. Prasetyo, E. Putra, R. N. Saputra, F. M. Haris, and S. Nur, "Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds," vol. 4, no. 1, pp. 356–361, 2024, doi: <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4231> Application.
- [18] 4 Fauzan Prasetyo Eka Putra¹, Muhafiz Khairi², Moh. Imam Hidayatullah^{3*}, Irfan maulana⁴ 1, 2, 3, "Analisis Protokol Keamanan Jaringan dalam Era Internet of Things (IoT) Fauzan," vol. 8, no. 2, pp. 356–366, 2025, doi: <https://dx.doi.org/10.29408/jit.v8i2.30257> e-ISSN.
- [19] R. Raman, H. Thanganadar, and U. Dwivedi, "Results in Engineering Energy-efficient multi factor authentication protocols in sustainable security for wireless networks using machine learning algorithm," *Results Eng.*, vol. 28, no. June, p. 107196, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.107196.
- [20] K. Pushpavalli, M. Arasakumar, and S. Balaji, *Hybrid PSO-GSO-SFG Optimization for Enhanced Cluster Formation and Routing in WSN-Based Healthcare Monitoring Systems*, no. Iccsce. Atlantis Press International BV, 2025. doi: 10.2991/978-94-6463-858-5.
- [21] N. A. Khan, M. Ali, H. Bin Liaqat, S. Rahim, and S. Ahmed, "Revisiting Routing Protocols to Design Energy Aware Wireless Body Area Network," vol. 9, no. 1, pp. 1–12, 2021, doi: 10.24003/emitter.v9i1.556.
- [22] K. Maheshwar and S. Veenadhari, "HCPFRP : Heterogeneous cluster prediction and formation routing protocol for wireless sensor network," vol. 13, no. 2, pp. 296–316, 2023, doi: <https://doi.org/10.59796/jcst.V13N2.2023.1745>.
- [23] F. Prasetyo, E. Putra, A. Hamzah, W. A. Pramadi, and A. Nuraini, "Systematic Literature Review : Security Gap Detection On Websites Using Owasap Zap," vol. 4, no. 1, pp. 348–355, 2024, doi: <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4227> Systematic.
- [24] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Mustafida Mustafida, Royhan Alfadili, and Afifatun Nahriyah, "Perancangan Jaringan Nirkabel Berbasis Mesh untuk Menunjang Aplikasi Smart City," *J. Inform. Dan Teknologi Komput.*, vol. 5, no. 1, pp. 84–92, 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5934.
- [25] D. Aicha, "Study of Clustering techniques in Wireless Sensor Networks(WSNs) (LEACH and K-means)," 2023, doi: 10.259237/939984519445.
- [26] A. Sharma and I. Technology, "Error Minimization, Analysis Based on Positioning Methods in Wireless Sensor Network: Review," vol. VIII, no. I, 2020, doi: 10.2036128/189234561.
- [27] W. V. Ashok, "EAKRR : An energy-efficient key management in WSN with ECC-based cryptography Suresh Limkar * Department of Artificial Intelligence & Data Science Maharashtra Jammu Jammu and Kashmir Chandwad Nashik Maharashtra Pimpri Chinchwad College of Engineering Pune," vol. 27, no. 2, pp. 489–499, 2024, doi: 10.47974/JDMSC-1904.
- [28] R. Zhou, "Research on Efficiency Optimization of Logistics Vehicle Monitoring Model Based on Wireless Sensor Network," vol. 11, pp. 27–44, 2023, doi: 10.13052/jicts2245-800X.1112.
- [29] A. Lopez-gasso, A. Beriain, and H. Solar, "Power Management Unit for Solar Energy Harvester Assisted Batteryless Wireless Sensor Node," 2022, doi: 10.414371/47016492629.
- [30] R. Khan, "Autonomous Drone-Based Pollination Systems for Enhancing Crop Yield in Orchards Using IoT and Machine Learning Optimization," vol. 0, pp. 1–13, 2025, doi: 10.1051/iciates/2025042701056 <https://doi.org/10.1051/shsconf/202521601056>.
- [31] F. P. Eka Putra, A. M. Ubaidillah Solichin, M. N. Wildanul Hakim, and M. T. Ramadhan, "Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia," *Infotek J. Inform. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 415–425, 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30559.

- [32] V. No, F. Prasetyo, E. Putra, S. Burok, L. Fermadi, and V. No, “Anti-Klon Pendekatan Ringan untuk Mendeteksi Serangan Kloning RFID Fauzan,” vol. 8, no. 2, pp. 458–468, 2025, doi: <https://dx.doi.org/10.29408/jit.v8i2.30392> e-ISSN.
- [33] N. A. Hussien, A. A. D. Al-magsoosi, and F. T. Abed, “Monitoring the Consumption of Electrical Energy Based on the Internet of Things Applications,” vol. 15, no. 07, pp. 17–29, 2021, doi: <https://doi.org/10.3991/ijim.v15i07.20183> Naseer.
- [34] M. Perspectives, *FUSION OF KNOWLEDGE: MULTIDISCIPLINARY PERSPECTIVES IN RESEARCH*. doi: 10.25215/9392917953.
- [35] S. Rani, D. Koundal, M. F. Ijaz, M. Elhoseny, and M. I. Alghamdi, “An Optimized Framework for WSN Routing in the Context of Industry 4.0,” pp. 1–15, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21196474>.
- [36] W. Derigent, M. David, P. Andr, and O. Cardin, “WSN Energy Control by Holonic Dynamic Reconfiguration : Application to the Sustainability of Communicating Materials,” 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/su16188193>.
- [37] I. Essamlali, H. Nhaila, and M. El Khaili, “Heliyon Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review,” *Heliyon*, vol. 10, no. 6, p. e27920, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e27920.
- [38] G. Santhosh and K. V. Prasad, “Energy optimization routing for hierarchical cluster based WSN using artificial bee colony,” *Meas. Sensors*, vol. 29, no. January, p. 100848, 2023, doi: 10.1016/j.measen.2023.100848.
- [39] B. H. Maay and I. R. Widiyari, “Analisis performa wireless sensor network dengan protokol multi hop dan single hop,” vol. 9, no. 3, pp. 1112–1122, 2024, doi: <https://doi.org/10.29100/jipi.v9i3.4917>.
- [40] Z. Huanan, X. Suping, and W. Jiannan, “Security and application of wireless sensor network,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 183, pp. 486–492, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.02.088.
- [41] M. A. Suwandi and H. Rakuasa, “Community Participation in Education in the Digital Age in Indonesia Article Info,” *Int. J. Educ. Elem. Psychol.*, vol. 1, no. 5, pp. 252–259, 2024, doi: <https://doi.org/10.70177/ijeep.v1i5.1250>.
- [42] B. A. Begum and S. V. Nandury, “Data aggregation protocols for WSN and IoT applications – A comprehensive survey,” *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 35, no. 2, pp. 651–681, 2023, doi: 10.1016/j.jksuci.2023.01.008.
- [43] Rasimin, A. B. Semma, Zakiyuddin, M. Ali, and M. I. Helmy, “Multi-dimensional challenges in the Indonesian social science information technology-based learning: A systematic literature review,” *Heliyon*, vol. 10, no. 7, p. e28706, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28706.
- [44] M. O. Lalay and M. L. Long, “Perkembangan Pedagogi Berbasis Teknologi: Suatu Kajian model pembelajaran abad-21 di daerah 3T di Masa Pandemi Covid 19,” *Yupa Hist. Stud. J.*, vol. 5, no. 2, pp. 101–110, 2022, doi: 10.30872/yupa.v5i2.783.
- [45] A. Alawadhi, “Deep Learning Techniques in Mobile Edge Computing for Internet of Medical Things,” 2023 *3rd Int. Conf. Emerg. Smart Technol. Appl.*, pp. 1–6, 2023, doi: 10.1109/eSmarTA59349.2023.10293737.
- [46] A. Bhatnagar, “Differential Evolutionary Optimization Algorithm for Energy-Efficient Routing Strategy in Wireless Sensor Networks,” vol. 12, no. 1, pp. 1–15, 2025, doi: 10.22247/ijcna/2025/01.
- [47] A. Zafra-Pérez, J. Medina-García, C. Boente, J. A. Gómez-Galán, A. Sánchez de la Campa, and J. D. de la

- Rosa, “Designing a low-cost wireless sensor network for particulate matter monitoring: Implementation, calibration, and field-test,” *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 15, no. 9, 2024, doi: 10.1016/j.apr.2024.102208.
- [48] A. Seyyedabbasi, F. Kiani, T. Allahviranloo, U. Fernandez-Gamiz, and S. Noeiaghdam, “Optimal data transmission and pathfinding for WSN and decentralized IoT systems using I-GWO and Ex-GWO algorithms,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 63, pp. 339–357, 2023, doi: 10.1016/j.aej.2022.08.009.
- [49] M. A. Salih and D. R. Sulaiman, “Throughput and Energy Efficiency Evaluation of WSN Using Efficient Routing Protocols,” vol. 13, 2023, doi: [http://www.doi.org/10.31663/tqujes13.1.438\(2023\)](http://www.doi.org/10.31663/tqujes13.1.438(2023)).
- [50] E. Elbasi, N. Mostafa, and Z. Alarnaout, “Artificial Intelligence Technology in the Agricultural Sector : A Systematic Literature Review,” vol. 11, no. January, pp. 171–202, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3232485.