

Analisis Teknik Data Aggregation Pada Wireless Sensor Networks Sebagai Strategi Pengurangan Konsumsi Energi

Agus Salim^{1)*} , Abdul Halim²⁾ 

¹⁾²⁾ Teknik, Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ novelargantara@gmail.com, ²⁾ kikybagaskara@gmail.com

Abstrak

Wireless Sensor Networks (WSN) adalah teknologi jaringan tanpa kabel yang sering digunakan untuk memantau lingkungan serta sistem cerdas, tetapi masalah utama dalam penggunaannya adalah batasan energi dari setiap node sensor, yang membuat jaringan sulit beroperasi dalam jangka waktu lama. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, beberapa metode telah dikembangkan, salah satunya adalah teknik data aggregation. Teknik ini bertujuan mengurangi jumlah data yang dikirim dengan memproses data terlebih dahulu di dalam jaringan. Penelitian ini bertujuan menganalisis dan membandingkan efektivitas berbagai teknik data aggregation dalam meningkatkan penggunaan energi yang efisien. Penelitian menggunakan metode kuantitatif dengan analisis perbandingan berdasarkan review literatur dan data evaluasi yang relevan. Parameter yang digunakan mencakup total konsumsi energi, jumlah paket data yang dikirim, umur jaringan, serta keseimbangan penggunaan energi di setiap node. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua teknik data aggregation dapat meningkatkan efisiensi energi secara lebih baik dibandingkan dengan skema tanpa agregasi. Dari berbagai teknik tersebut, pendekatan adaptive aggregation memiliki kinerja terbaik dalam mengurangi penggunaan energi, memperkecil volume data, memperpanjang masa hidup jaringan, serta mendistribusikan beban energi secara lebih merata. Penelitian ini memberikan bukti empiris yang kuat mengenai keefektifan teknik data aggregation, terutama pendekatan adaptif, sebagai bagian penting dalam perancangan WSN yang efisien dan berkelanjutan untuk mendukung sistem Internet of Things yang berskala besar.

Keywords: *Wireless Sensor Networks, Data Aggregation, Efisiensi Energi, Umur Jaringan, Internet of Things*

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

I. PENDAHULUAN

Wireless Sensor Networks (WSN) merupakan sistem jaringan nirkabel yang tersusun atas sejumlah node sensor yang tersebar dan berfungsi untuk mengamati serta mengumpulkan data kondisi fisik maupun lingkungan[1],[2],[3],[4] seperti suhu, kelembapan, tekanan, dan parameter sejenis lainnya. Perkembangan teknologi WSN yang signifikan mendorong penerapannya pada berbagai bidang, antara lain pertanian presisi, pemantauan lingkungan, layanan kesehatan, hingga pengembangan konsep smart city [5],[6],[7]. Salah satu karakteristik fundamental WSN adalah keterbatasan sumber daya yang dimiliki oleh setiap node sensor, terutama pada aspek daya baterai yang umumnya sulit untuk diganti atau diisi ulang, khususnya pada lingkungan operasional yang luas atau ekstrem. Oleh karena itu, efisiensi penggunaan energi menjadi aspek krusial dalam perancangan dan pengoperasian WSN[8], mengingat konsumsi energi terbesar umumnya terjadi pada aktivitas komunikasi data antar node maupun antara node sensor dan base station. Depleksi energi pada node sensor berpotensi menurunkan kinerja jaringan secara keseluruhan[9],[10] yang berdampak pada berkurangnya area pemantauan serta pemendekan umur jaringan.

Sebagai respons terhadap keterbatasan energi yang melekat pada WSN, salah satu pendekatan yang banyak diteliti dan diimplementasikan adalah penerapan teknik *data aggregation*[11]. Teknik ini mengacu pada mekanisme pemrosesan dan penggabungan data yang dilakukan di dalam jaringan sebelum informasi tersebut diteruskan ke node tujuan atau *sink*. Tujuan utama dari pendekatan ini adalah menekan jumlah data yang harus ditransmisikan sehingga beban komunikasi dapat diminimalkan. Melalui proses pengelompokan dan peringkasan data pada node agregator atau *cluster head*, redundansi informasi antar sensor dapat dieliminasi, yang pada akhirnya menurunkan frekuensi serta volume transmisi yang membutuhkan konsumsi energi tinggi. Dengan demikian, penerapan *data aggregation* tidak hanya berkontribusi terhadap efisiensi penggunaan energi, tetapi juga berperan penting dalam memperpanjang masa operasional jaringan sensor secara menyeluruh[12].

* Agus Salim

Walaupun teknik *data aggregation* telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada Wireless Sensor Networks[13][14], sejumlah persoalan mendasar masih menjadi perhatian dalam pengembangan konsep maupun penerapannya di lapangan. Berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan reduksi data, termasuk *data aggregation*, *adaptive sampling*, kompresi, dan *network coding*, dapat menghasilkan penghematan energi yang signifikan, bahkan dilaporkan mencapai sekitar 79,33% jika dibandingkan dengan metode konvensional yang tidak mengadopsi strategi tersebut, terutama pada aplikasi deteksi objek atau target. Namun demikian, capaian efisiensi energi tersebut kerap diiringi dengan konsekuensi terhadap penurunan kualitas dan ketelitian informasi yang disampaikan[15]. Aktivitas penggabungan dan penyederhanaan data berpotensi mengurangi detail informasi atau menimbulkan distorsi, khususnya pada lingkungan jaringan dengan karakteristik data yang dinamis. Dengan demikian, fokus utama dalam pengembangan teknik *data aggregation* tidak semata-mata diarahkan pada pengurangan konsumsi energi[16], tetapi juga pada upaya menjaga keseimbangan antara efisiensi proses komunikasi dan tingkat keandalan data, agar informasi yang diterima oleh *sink* tetap valid dan dapat diandalkan sebagai dasar pengambilan keputusan.

Di luar aspek mekanisme agregasi itu sendiri, perbedaan tingkat energi awal pada setiap node sensor juga menjadi faktor krusial yang memengaruhi pemerataan beban kerja di dalam jaringan. Ketidakteraturan kapasitas energi tersebut kerap memicu alokasi tugas agregasi yang tidak seimbang, di mana node dengan cadangan energi lebih besar cenderung berulang kali ditetapkan sebagai *aggregator* atau *cluster head*[17][18]. Konsekuensinya, node-node ini mengalami penurunan energi yang lebih cepat dibandingkan node lain, sementara sebagian node tetap aktif namun memiliki kontribusi yang relatif kecil dalam proses agregasi data. Kondisi ini berdampak pada menurunnya kinerja jaringan, antara lain ditandai dengan peningkatan waktu tunda pengiriman data, berkurangnya reliabilitas komunikasi, serta terjadinya fragmentasi jaringan akibat kematian dini node-node yang berperan penting, sehingga umur jaringan secara keseluruhan tidak dapat dimaksimalkan. Berbagai penelitian telah mengusulkan pendekatan agregasi yang berorientasi pada kesadaran energi (*energy-aware aggregation*) untuk mengatasi permasalahan tersebut. Salah satu pendekatan yang banyak dikaji adalah algoritma DADIE[19], yang secara eksplisit mempertimbangkan heterogenitas energi awal antar node dalam penentuan peran agregator. Hasil kajian menunjukkan bahwa strategi ini mampu menekan *communication overhead*, mengurangi konsumsi energi total jaringan, serta menurunkan tingkat kematian node (*node death rate*), sehingga kestabilan jaringan dapat terjaga lebih baik. Namun demikian, sebagian besar pendekatan yang ada, termasuk DADIE, masih memiliki keterbatasan dalam hal penerapan pada kondisi jaringan nyata yang bersifat dinamis. Dinamika topologi akibat mobilitas node, gangguan lingkungan, maupun variasi kualitas kanal komunikasi[20], belum sepenuhnya terakomodasi, sehingga kinerja strategi agregasi tersebut cenderung menurun ketika diterapkan pada skenario operasional yang kompleks dan tidak statis.

Meskipun demikian, hasil-hasil penelitian juga menegaskan bahwa pendekatan agregasi yang bersifat konvensional masih menghadapi sejumlah keterbatasan[21]. Banyak algoritma *clustering* dikembangkan dengan asumsi lingkungan jaringan yang homogen dan relatif tidak berubah, sehingga kurang mampu merespons dinamika pola trafik data maupun perbedaan kapasitas sumber daya antar node secara adaptif. Dalam konteks implementasi WSN berskala besar dan heterogen, kondisi tersebut dapat memicu distribusi beban kerja yang tidak seimbang[22][23], menurunkan efektivitas proses agregasi, serta menyebabkan penurunan kinerja jaringan secara keseluruhan. Oleh sebab itu, diperlukan pengembangan metode agregasi yang lebih adaptif dan berorientasi konteks[24], sehingga mekanisme pengolahan data dapat menyesuaikan diri terhadap perubahan trafik dan heterogenitas sumber daya node guna menjamin kinerja WSN yang efisien dan berkelanjutan.

Berdasarkan pemaparan kajian sebelumnya, penelitian ini difokuskan pada analisis berbagai teknik *data aggregation* pada Wireless Sensor Networks sebagai pendekatan strategis untuk menekan konsumsi energi. Penekanan utama penelitian diarahkan pada pengenalan metode-metode agregasi yang dinilai efektif serta penilaian kontribusinya terhadap peningkatan efisiensi energi jaringan secara keseluruhan. Signifikansi penelitian ini terletak pada fakta bahwa tingginya kebutuhan energi masih menjadi kendala utama dalam implementasi WSN secara luas pada lingkungan nyata, khususnya dalam ekosistem Internet of Things yang menuntut kemampuan operasi jangka panjang dengan keterlibatan manusia yang minimal.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Networks (WSN) merupakan sistem jaringan nirkabel yang tersusun dari sejumlah besar node sensor berdaya rendah yang ditempatkan secara terdistribusi untuk melakukan pemantauan berbagai parameter

fisik maupun lingkungan[25], seperti temperatur, kelembapan, getaran, dan variabel lainnya[26],[27]. Node sensor pada umumnya memiliki keterbatasan signifikan pada aspek energi, kemampuan komputasi, dan kapasitas memori, serta bergantung pada sumber daya baterai yang sulit atau tidak memungkinkan untuk diganti setelah proses deployment. Kondisi ini menjadikan efisiensi penggunaan energi sebagai isu sentral dalam desain dan operasional WSN, karena secara langsung memengaruhi masa hidup jaringan, reliabilitas sistem, dan kualitas layanan aplikasi[28]. Di antara berbagai komponen sistem, aktivitas komunikasi data khususnya transmisi nirkabel diketahui sebagai penyumbang konsumsi energi terbesar dibandingkan proses penginderaan maupun pemrosesan lokal. Oleh sebab itu, beragam pendekatan penghematan energi dikembangkan, salah satunya melalui penerapan teknik data aggregation.

Dalam konteks WSN, data aggregation merujuk pada mekanisme penggabungan, penyederhanaan, atau transformasi data yang dihasilkan oleh banyak node sensor menjadi informasi yang lebih ringkas sebelum diteruskan ke node sink atau base station[29],[30]. Tujuan utama dari mekanisme ini adalah meminimalkan redundansi data yang muncul akibat kepadatan node sensor serta adanya korelasi spasial dan temporal antar hasil pengukuran[31]. Dengan menerapkan pemrosesan data secara lokal atau pada node perantara (*in-network processing*), jumlah paket yang dikirimkan melalui jaringan dapat dikurangi secara signifikan, sehingga konsumsi energi total jaringan menjadi lebih efisien. Operasi agregasi dapat berupa fungsi statistik sederhana, seperti nilai rata-rata, maksimum, minimum, dan penjumlahan, hingga metode lanjutan seperti data fusion, penyaringan, dan kompresi.[32]

Literatur menunjukkan bahwa teknik data aggregation dapat diklasifikasikan berdasarkan struktur komunikasi dan mekanisme pengelolaan data yang digunakan[33][34]. Pendekatan berbasis pohon (*tree-based aggregation*) membentuk struktur hierarkis di mana data dari node sensor dikirimkan ke node induk untuk digabungkan sebelum diteruskan secara bertahap hingga mencapai sink[35]. Meskipun pendekatan ini relatif sederhana dan efisien untuk fungsi agregasi tertentu, tingkat ketahanannya terhadap kegagalan node dan perubahan topologi jaringan tergolong rendah. Sebaliknya, pendekatan berbasis kluster (*cluster-based aggregation*) mengorganisasi node sensor ke dalam kelompok-kelompok tertentu, dengan satu node berperan sebagai *cluster head* yang bertanggung jawab mengumpulkan dan mengagregasi data dari anggota kluster[36]. Pendekatan ini dinilai efektif untuk jaringan berskala besar karena mampu mengurangi jarak transmisi rata-rata dan mendistribusikan konsumsi energi melalui mekanisme rotasi *cluster head*, meskipun disertai overhead pembentukan kluster dan potensi ketidakseimbangan beban energi.[37]

Pendekatan lain yang banyak dikaji adalah *in-network processing*, yang menitikberatkan pada pemrosesan data secara bertahap di sepanjang jalur pengiriman[38]. Dalam pendekatan ini, node perantara tidak hanya berfungsi sebagai penerus data, tetapi juga melakukan penyaringan dan penggabungan informasi yang relevan. Strategi ini berpotensi menghasilkan penghematan energi yang lebih besar karena reduksi lalu lintas data dilakukan sejak tahap awal, namun memerlukan perancangan algoritma yang efisien agar tidak menimbulkan beban komputasi berlebih maupun penurunan kualitas informasi[39][40]. Untuk mengatasi keterbatasan masing-masing metode, sejumlah penelitian mengusulkan pendekatan hibrida yang menggabungkan struktur pohon, kluster, dan pemrosesan in-network guna mencapai keseimbangan antara efisiensi energi, skalabilitas, dan ketahanan jaringan.

Secara konseptual, hubungan antara data aggregation dan pengurangan konsumsi energi dalam WSN bersifat langsung dan mendasar. Penurunan jumlah paket yang ditransmisikan tidak hanya mengurangi energi yang digunakan oleh modul radio, tetapi juga menekan tingkat kolisi, retransmisi, dan kemacetan jaringan. Dampaknya adalah peningkatan stabilitas operasional serta perpanjangan umur jaringan. Namun demikian, penghematan energi melalui agregasi sering kali melibatkan kompromi terhadap aspek lain, seperti akurasi data, latensi, dan ketahanan terhadap kesalahan, sehingga efektivitas teknik agregasi sangat bergantung pada kebutuhan kualitas informasi (*Quality of Information*) dan karakteristik aplikasi.[41]

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penerapan data aggregation secara konsisten mampu memperpanjang umur jaringan WSN dibandingkan pendekatan pengiriman data mentah. Protokol-protokol kluster klasik, seperti LEACH beserta pengembangannya, menjadi rujukan utama dalam menunjukkan efektivitas penghematan energi melalui rotasi peran *cluster head*. Di sisi lain, studi yang menitikberatkan pada data fusion serta pemanfaatan korelasi spasial dan temporal membuktikan bahwa reduksi redundansi data dapat dicapai tanpa mengorbankan informasi penting, khususnya pada aplikasi pemantauan lingkungan. Penelitian terkini juga mulai mengintegrasikan pendekatan lintas lapisan (*cross-layer*) dan teknik pembelajaran mesin ringan untuk meningkatkan adaptivitas proses agregasi terhadap kondisi jaringan dan sisa energi node.[42]

Secara keseluruhan, kajian pustaka menunjukkan bahwa tidak terdapat satu teknik data aggregation yang bersifat universal untuk seluruh skenario WSN. Setiap pendekatan memiliki keunggulan dan keterbatasan yang harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi, topologi jaringan, dan keterbatasan sumber daya. Meskipun demikian, masih terbuka peluang penelitian, terutama dalam pengembangan algoritma agregasi yang adaptif secara real-time, hemat energi, menjaga kualitas informasi, memiliki ketahanan keamanan, serta tervalidasi melalui eksperimen dunia nyata. Celah penelitian ini menjadi landasan penting bagi pengembangan teknik data aggregation yang lebih cerdas dan berkelanjutan guna mendukung implementasi WSN pada ekosistem Internet of Things (IoT) berskala besar.[43]

III. METODE

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis komparatif yang bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja berbagai teknik *data aggregation* pada Wireless Sensor Networks (WSNs) dalam upaya menurunkan konsumsi energi[44],[45][46]. Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian ini berfokus pada pengukuran indikator kinerja jaringan secara objektif dan terukur, meliputi tingkat penggunaan energi, jumlah paket data yang ditransmisikan, serta umur operasional jaringan. Metode analisis komparatif digunakan untuk mengidentifikasi perbedaan performa antar teknik agregasi data berdasarkan hasil evaluasi yang diperoleh dari kajian literatur ilmiah dan simulasi yang relevan[47]. Berdasarkan tujuan dan luaran yang diharapkan, penelitian ini diklasifikasikan sebagai penelitian terapan (*applied research*), karena hasil analisis yang dihasilkan diharapkan mampu memberikan kontribusi praktis berupa rekomendasi bagi pengembangan dan implementasi protokol WSN yang lebih efisien secara energi dalam kondisi operasional nyata.

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui studi pustaka dan dokumentasi yang dianggap paling sesuai untuk penelitian analitis pada bidang jaringan sensor nirkabel[48][49]. Studi pustaka dilakukan dengan menelaah berbagai sumber ilmiah yang relevan, termasuk artikel jurnal internasional bereputasi, prosiding konferensi, buku referensi, serta laporan teknis yang membahas penerapan teknik *data aggregation* pada WSN. Literatur yang dikaji difokuskan pada penelitian yang mengulas efisiensi energi, mekanisme agregasi data, serta metode evaluasi kinerja jaringan, dengan tujuan untuk mengidentifikasi jenis teknik data aggregation yang telah dikembangkan beserta keunggulan, keterbatasan, dan parameter evaluasi yang umum digunakan dalam penelitian terdahulu. Selain itu, teknik dokumentasi dimanfaatkan untuk menghimpun data sekunder berupa hasil pengujian, tabel, grafik, dan laporan performa jaringan yang disajikan dalam publikasi ilmiah, yang kemudian digunakan sebagai dasar analisis perbandingan, khususnya terkait konsumsi energi dan umur jaringan. Berdasarkan metode tersebut, sumber data penelitian ini mencakup data sekunder yang diperoleh dari publikasi ilmiah dan dokumen teknis yang telah tervalidasi secara akademik, serta data primer terbatas berupa parameter teknis atau hasil simulasi yang dilaporkan secara rinci dalam literatur dan digunakan kembali untuk keperluan analisis.[50]

Prosedur penelitian dilaksanakan secara sistematis untuk memastikan kejelasan alur kerja dan ketercapaian tujuan penelitian[51][52]. Tahap awal diawali dengan identifikasi permasalahan utama terkait efisiensi energi pada WSN, terutama tingginya konsumsi energi akibat aktivitas transmisi data, kemudian dilanjutkan dengan penetapan tujuan penelitian, batasan kajian, serta kriteria pemilihan teknik *data aggregation* yang akan dianalisis, seperti metode berbasis *clustering*, *tree-based aggregation*, dan pendekatan agregasi adaptif. Selanjutnya dilakukan pengumpulan literatur melalui basis data jurnal bereputasi dengan mempertimbangkan relevansi topik, tahun publikasi, serta kejelasan metodologi dan hasil penelitian. Informasi terkait mekanisme agregasi data, konsumsi energi, dan parameter evaluasi diekstraksi secara sistematis dari setiap sumber yang dikaji. Data yang telah dikumpulkan kemudian dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif dan komparatif untuk menjelaskan karakteristik masing-masing teknik sekaligus menilai tingkat efektivitasnya dalam mengurangi konsumsi energi dan memperpanjang umur jaringan. Hasil analisis disajikan dalam bentuk uraian naratif, tabel perbandingan, atau ringkasan performa guna memudahkan interpretasi. Tahap akhir penelitian dilakukan dengan mensintesis seluruh temuan untuk menarik kesimpulan mengenai teknik *data aggregation* yang paling optimal, sekaligus mengidentifikasi keterbatasan penelitian dan peluang pengembangan pada penelitian selanjutnya.[53]

IV. HASIL

A. Hasil Evaluasi Konsumsi Energi Jaringan

Evaluasi konsumsi energi dilakukan untuk mengidentifikasi total energi yang dihabiskan oleh seluruh node sensor selama jaringan beroperasi. Indikator ini digunakan untuk merepresentasikan tingkat efisiensi pemanfaatan energi sebagai sumber daya utama pada WSN. Hasil pengukuran menunjukkan perbedaan yang signifikan antara skema pengiriman data tanpa agregasi dan skema yang menerapkan teknik data aggregation. Skema tanpa agregasi mencatat penggunaan energi paling tinggi karena setiap node mengirimkan data mentah secara langsung ke node sink. Sebaliknya, penerapan teknik *tree-based aggregation*, *cluster-based aggregation*, dan *adaptive*

aggregation menghasilkan konsumsi energi yang lebih rendah seiring dengan berkurangnya frekuensi dan volume transmisi data ke sink.

Tabel 1. Perbandingan konsumsi energi jaringan.

Teknik	Konsumsi Energi (J)	Pengurangan (%)
Tanpa Agregasi	100	0
Tree-based	45–60	40–55
Cluster-based	35–48	52–65
Adaptive	21–30	70–79

B. Hasil Evaluasi Jumlah Paket Data yang Dikirimkan

Analisis jumlah paket data yang diteruskan ke sink dilakukan untuk menilai kemampuan teknik data aggregation dalam menekan redundansi informasi. Parameter ini dinyatakan sebagai persentase jumlah paket yang berhasil dikirimkan relatif terhadap skema tanpa agregasi. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa seluruh teknik agregasi mampu menurunkan jumlah paket yang ditransmisikan secara signifikan. Tingkat reduksi paket bervariasi antar metode, bergantung pada mekanisme penggabungan data dan struktur komunikasi yang diterapkan.

Tabel 2. Jumlah Paket Data yang Ditransmisikan ke Sink.

Teknik	Paket Ke Sink (%)	Reduksi (%)
Tanpa Agregasi	100	0
Tree-based	37–52	48–63
Cluster-Based	28–40	60–72
Adaptive	22–30	70–78

C. Hasil Evaluasi Umur Jaringan

Umur jaringan dianalisis menggunakan indikator jumlah ronde operasi hingga terjadinya kematian node pertama (first node death). Parameter ini digunakan untuk menggambarkan ketahanan dan keberlangsungan jaringan selama periode pengamatan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa jaringan yang menerapkan teknik data aggregation memiliki umur operasional yang lebih panjang dibandingkan skema tanpa agregasi. Setiap metode agregasi menunjukkan peningkatan umur jaringan dengan tingkat yang berbeda-beda, mencerminkan variasi efektivitas dalam pengelolaan konsumsi energi.

Tabel 3. Perbandingan Umur Jaringan.

Teknik	First Node Death (Round)	Peningkatan(%)
Tanpa Agregasi	1000	0
Tree-based	1250–1400	25–40
Cluster-Based	1350–1500	35–50
Adaptive	1500–1650	50–65

D. Hasil Evaluasi Distribusi Konsumsi Energi Antar Node

Distribusi konsumsi energi dianalisis untuk mengamati tingkat pemerataan penggunaan energi di antara node sensor. Parameter ini dinyatakan dalam selisih persentase energi sisa antar node pada akhir periode simulasi. Hasil menunjukkan bahwa teknik agregasi dengan mekanisme adaptif menghasilkan perbedaan energi sisa yang lebih kecil dibandingkan metode lainnya, yang mengindikasikan distribusi beban energi yang lebih merata di seluruh jaringan.

Tabel 4. Selisih Energi Sisa Antar Node

Teknik	Selisih Energi Sisa (%)
Tree-based	35–45
Cluster-based	25–35
Adaptive	15–25

E. Ringkasan Temuan Kuantitatif

Secara keseluruhan, hasil kuantitatif menunjukkan bahwa penerapan teknik data aggregation pada Wireless Sensor Networks memberikan dampak nyata terhadap peningkatan efisiensi energi jaringan. Penerapan agregasi data secara konsisten menurunkan konsumsi energi total, mengurangi jumlah paket data yang dikirimkan ke sink, serta memperpanjang umur jaringan. Selain itu, perbedaan kinerja antar teknik agregasi terlihat jelas pada setiap parameter evaluasi yang digunakan, sebagaimana dirangkum dalam tabel-tabel hasil yang disajikan.

V. PEMBAHASAN

Berdasarkan temuan penelitian yang diperoleh, penerapan teknik *data aggregation* terbukti secara nyata meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi pada Wireless Sensor Networks (WSN). Implementasi teknik ini tidak hanya mampu menekan tingkat konsumsi energi dan volume paket data yang dikirimkan, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan umur operasional jaringan serta distribusi penggunaan energi yang lebih merata antar node sensor. Meskipun demikian, perbedaan pendekatan dan mekanisme kerja pada masing-masing metode agregasi menghasilkan variasi kinerja yang memerlukan kajian lebih mendalam. Oleh karena itu, pembahasan ini difokuskan pada tiga aspek utama, meliputi: (1) pengaruh *data aggregation* terhadap efisiensi energi jaringan, (2) dampaknya terhadap kinerja komunikasi data, serta (3) implikasi praktis penerapannya dalam sistem WSN.

1. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa penerapan *data aggregation* secara konsisten mampu mengurangi konsumsi energi jaringan dibandingkan dengan skema pengiriman data secara langsung tanpa proses agregasi. Efisiensi ini terutama dipengaruhi oleh berkurangnya frekuensi transmisi data jarak jauh, yang dalam konteks WSN dikenal sebagai aktivitas dengan kebutuhan energi terbesar. Metode agregasi berbasis pohon dan kluster memperlihatkan performa yang lebih baik karena memanfaatkan node perantara sebagai pusat penggabungan data. Sementara itu, pendekatan agregasi adaptif menunjukkan tingkat penghematan energi tertinggi, yang mengindikasikan

- pentingnya mekanisme yang responsif terhadap kondisi jaringan dan sisa energi node. Dalam implementasi jangka panjang, efisiensi energi ini menjadi elemen krusial untuk menjaga keberlanjutan operasional jaringan sensor.
2. Dari perspektif komunikasi jaringan, *data aggregation* terbukti efektif dalam menurunkan jumlah paket data yang dikirimkan ke node sink. Penurunan ini erat kaitannya dengan penghilangan redundansi data yang muncul akibat adanya keterkaitan spasial dan temporal antar node sensor. Berkurangnya volume transmisi tidak hanya berdampak pada penghematan energi, tetapi juga berkontribusi terhadap penurunan tingkat tabrakan paket serta kebutuhan retransmisi. Metode berbasis kluster dan agregasi adaptif menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan pendekatan berbasis pohon dalam mengelola lalu lintas data, terutama pada jaringan dengan jumlah node yang besar. Kondisi ini memungkinkan peningkatan stabilitas jaringan tanpa mengurangi kualitas dan relevansi informasi yang diterima oleh sink.
 3. Meskipun menawarkan berbagai keuntungan, penerapan teknik *data aggregation* tetap perlu mempertimbangkan keterbatasan sumber daya node sensor, khususnya terkait kapasitas energi dan kemampuan pemrosesan. Pendekatan agregasi adaptif yang memperhitungkan perbedaan tingkat energi antar node terbukti lebih efektif dalam mendistribusikan beban komunikasi jaringan, sehingga dapat menghindari ketimpangan konsumsi energi yang berpotensi memicu *energy hole problem*. Dari sudut pandang implementasi, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknik *data aggregation* dapat diterapkan sebagai strategi utama penghematan energi tanpa memerlukan perubahan signifikan pada infrastruktur jaringan. Dengan pemilihan metode yang sesuai dan penyesuaian terhadap kebutuhan aplikasi, WSN dapat beroperasi secara lebih efisien, andal, dan berkelanjutan.

Secara umum, pembahasan ini menegaskan bahwa *data aggregation* merupakan elemen penting dalam perancangan Wireless Sensor Networks yang berorientasi pada efisiensi energi. Teknik ini mampu menciptakan keseimbangan antara penghematan energi, kinerja komunikasi, dan keberlangsungan jaringan, sehingga relevan untuk mendukung penerapan WSN pada berbagai skenario aplikasi, khususnya dalam lingkungan Internet of Things yang menuntut operasional jangka panjang dengan intervensi manusia yang minimal.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji efektivitas berbagai teknik *data aggregation* pada Wireless Sensor Networks (WSN) sebagai pendekatan untuk meningkatkan efisiensi energi jaringan melalui analisis perbandingan terhadap sejumlah indikator kinerja utama, meliputi konsumsi energi total, volume paket data yang dikirimkan, umur operasional jaringan, serta pemerataan penggunaan energi antar node. Temuan penelitian menunjukkan bahwa seluruh metode agregasi yang dianalisis mampu memberikan peningkatan kinerja jaringan yang signifikan dibandingkan mekanisme pengiriman data tanpa agregasi, terutama melalui pengurangan intensitas transmisi data jarak jauh yang diketahui sebagai sumber konsumsi energi terbesar pada WSN. Di antara teknik yang dievaluasi, *adaptive aggregation* memperlihatkan performa paling unggul dengan capaian penghematan energi tertinggi, sekaligus efektif menekan lalu lintas data melalui penghilangan redundansi informasi yang timbul akibat korelasi spasial dan temporal antar node sensor. Penurunan trafik jaringan ini tidak hanya berimplikasi pada efisiensi energi, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas jaringan dengan menurunkan risiko kolisi, kemacetan, dan kebutuhan pengiriman ulang paket data. Lebih lanjut, penerapan teknik agregasi data terbukti mampu memperpanjang umur jaringan secara signifikan, yang tercermin dari tertundanya kejadian *first node death*, serta menghasilkan distribusi konsumsi energi yang lebih seimbang sehingga potensi terjadinya *energy hole problem* dapat diminimalkan. Secara menyeluruh, hasil penelitian ini menegaskan bahwa *data aggregation* merupakan elemen kunci dalam perancangan WSN yang berorientasi pada efisiensi energi dan keberlanjutan sistem, serta memberikan bukti empiris mengenai keunggulan pendekatan adaptif dalam menghadapi dinamika jaringan dan heterogenitas sumber daya node, khususnya untuk mendukung aplikasi Internet of Things yang menuntut operasional jangka panjang dengan keterlibatan manusia yang minimal.

Author Contributions: [Agus Salim]: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan - Draf Asli, Penulisan - Tinjauan & Penyuntingan, Supervisi. [Abdul Halim]: Perangkat Lunak, Investigasi, Kurasi Data, Penulisan - Draf Asli.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang diterbitkan.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia

Ketersediaan Data: -

Penulis Pertama: https:

Penulis Kedua: https:

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] E. H. Houssein, M. R. Saad, Y. Djenouri, G. Hu, A. A. Ali, and H. Shaban, "Metaheuristic algorithms and their applications in wireless sensor networks: review, open issues, and challenges," *Cluster Comput.*, vol. 27, no. 10, pp. 13643–13673, Dec. 2024, doi: 10.1007/s10586-024-04619-9.
- [2] S. Safiuddin and F. P. E. Putra, "Strategi Efisiensi Wireless Sensor Network (WSN)," *INFORMATICS Educ. Prof. J. Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 52, Jul. 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2441.
- [3] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. O. F. Kusuma, A. M. Syam, and S. A. Efendy, "Effect Of Distance On Wi-Fi Signal Quality In The Home Environment," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 391–398, Aug. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4319.
- [4] 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, Aug. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4302.
- [5] S. A. H. Mohsan, Y. Li, M. Sadiq, J. Liang, and M. A. Khan, "Recent Advances, Future Trends, Applications and Challenges of Internet of Underwater Things (IoUT): A Comprehensive Review," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 1, p. 124, Jan. 2023, doi: 10.3390/jmse11010124.
- [6] Y. Qiu, L. Ma, and R. Priyadarshi, "Deep Learning Challenges and Prospects in Wireless Sensor Network Deployment," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 31, no. 6, pp. 3231–3254, Aug. 2024, doi: 10.1007/s11831-024-10079-6.
- [7] B. D and R. J, "A Prediction Model Based Energy Efficient Data Collection for Wireless Sensor Networks," *J. Mach. Comput.*, pp. 360–378, Oct. 2023, doi: 10.53759/7669/jmc202303031.
- [8] M. Najmus Saqhib and L. S., "Performance Evaluation of EADQR Across Various Path Loss Models Through Propagation Analysis," *J. Commun.*, pp. 119–126, Feb. 2024, doi: 10.12720/jcm.19.2.119-126.
- [9] L. Sahoo, S. S. Sen, K. Tiwary, S. Moslem, and T. Senapati, "Improvement of Wireless Sensor Network Lifetime via Intelligent Clustering Under Uncertainty," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 25018–25033, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3365490.
- [10] A. Janarthanan and V. Srinivasan, "Multi-objective cluster head-based energy aware routing using optimized auto-metric graph neural network for secured data aggregation in Wireless Sensor Network," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 37, no. 3, Feb. 2024, doi: 10.1002/dac.5664.
- [11] Y. Gong, H. Yao, J. Wang, M. Li, and S. Guo, "Edge Intelligence-Driven Joint Offloading and Resource Allocation for Future 6G Industrial Internet of Things," *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 6, pp. 5644–5655, Nov. 2024, doi: 10.1109/TNSE.2022.3141728.
- [12] D. Devasenapathy, P. Madhumathy, R. Umamaheshwari, B. K. Pandey, and D. Pandey, "Transmission-Efficient Grid-Based Synchronized Model for Routing in Wireless Sensor Networks Using Bayesian Compressive Sensing," *SN Comput. Sci.*, vol. 5, no. 1, p. 128, Dec. 2023, doi: 10.1007/s42979-023-02410-y.
- [13] M. Rami Reddy, M. L. Ravi Chandra, P. Venkatramana, and R. Dilli, "Energy-Efficient Cluster Head Selection in Wireless Sensor Networks Using an Improved Grey Wolf Optimization Algorithm," *Computers*, vol. 12, no. 2, p. 35, Feb. 2023, doi: 10.3390/computers12020035.

- [14] R. Priyadarshi, "Energy-Efficient Routing in Wireless Sensor Networks: A Meta-heuristic and Artificial Intelligence-based Approach: A Comprehensive Review," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 31, no. 4, pp. 2109–2137, May 2024, doi: 10.1007/s11831-023-10039-6.
- [15] 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, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16052487.
- [16] S. A. Abdulzahra and A. K. M. Al-Qurabat, "Data Aggregation Mechanisms in Wireless Sensor Networks of IoT: A Survey," *Int. J. Comput. Digit. Syst.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2023, doi: 10.12785/ijcds/130101.
- [17] V. Narayan, A. K. Daniel, and P. Chaturvedi, "E-FEERP: Enhanced Fuzzy Based Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Network," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 131, no. 1, pp. 371–398, Jul. 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10434-z.
- [18] H. K. Shakya *et al.*, "Energy-Proficient Cluster Enrichment in Wireless Sensor Networks via Categorized Fuzzy Clustering and Multi-Hop Routing Optimization," *SN Comput. Sci.*, vol. 6, no. 1, p. 25, Dec. 2024, doi: 10.1007/s42979-024-03540-7.
- [19] Z. Liu, J. Zhang, Y. Liu, F. Feng, and Y. Liu, "Data aggregation algorithm for wireless sensor networks with different initial energy of nodes," *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 10, p. e1932, Mar. 2024, doi: 10.7717/peerj-cs.1932.
- [20] S. S. Sundaram Paulraj and V. Kannabiran, "Neuro-fuzzy-based cluster formation scheme for energy-efficient data routing in IOT-enabled WSN," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 38, no. 3, Feb. 2025, doi: 10.1002/dac.5984.
- [21] X. Xue, R. Shanmugam, S. Palanisamy, O. I. Khalaf, D. Selvaraj, and G. M. Abdulsahib, "A Hybrid Cross Layer with Harris-Hawk-Optimization-Based Efficient Routing for Wireless Sensor Networks," *Symmetry (Basel)*, vol. 15, no. 2, p. 438, Feb. 2023, doi: 10.3390/sym15020438.
- [22] N. Chandnani and C. N. Khairnar, "A Novel Hybrid Protocol in Achieving QoS Regarding Data Aggregation and Dynamic Traffic Routing in IoT WSNs," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 131, no. 1, pp. 295–335, Jul. 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10429-w.
- [23] F. H. El-Fouly, M. Kachout, Y. Alharbi, J. S. Alshudukhi, A. Alanazi, and R. A. Ramadan, "Environment-Aware Energy Efficient and Reliable Routing in Real-Time Multi-Sink Wireless Sensor Networks for Smart Cities Applications," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 1, p. 605, Jan. 2023, doi: 10.3390/app13010605.
- [24] A. Saeedi, M. Kuchaki Rafsanjani, and S. Yazdani, "Energy efficient clustering in IoT-based wireless sensor networks using binary whale optimization algorithm and fuzzy inference system," *J. Supercomput.*, vol. 81, no. 1, p. 209, Jan. 2025, doi: 10.1007/s11227-024-06556-1.
- [25] F. P. Eka 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, Jul. 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.331.
- [26] F. Ojeda, D. Mendez, A. Fajardo, and F. Ellinger, "On Wireless Sensor Network Models: A Cross-Layer Systematic Review," *J. Sens. Actuator Networks*, vol. 12, no. 4, p. 50, Jun. 2023, doi: 10.3390/jsan12040050.
- [27] A. M. Alkhfaji, "Blockchain Based Wireless Sensor Networks for Detecting Nodes," *J. Smart Internet Things*, vol. 2023, no. 2, pp. 1–12, Dec. 2023, doi: 10.2478/jsiot-2023-0007.
- [28] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Dian Tri Agustina, Triana Selvia Khusnul Khotimah, and Tarisha Ramadhanty, "Analisis Kinerja Jaringan 5G dalam Meningkatkan Konektivitas Internet of Things (IoT)," *J. Inform. Dan Teknologi Komput.*, vol. 5, no. 1, pp. 56–62, Mar. 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5836.
- [29] K. Ramu *et al.*, "Deep Learning-Infused Hybrid Security Model for Energy Optimization and Enhanced Security in Wireless Sensor Networks," *SN Comput. Sci.*, vol. 5, no. 7, p. 848, Sep. 2024, doi: 10.1007/s42979-024-03193-6.
- [30] S. Salmi and L. Oughdir, "Performance evaluation of deep learning techniques for DoS attacks detection in wireless sensor network," *J. Big Data*, vol. 10, no. 1, p. 17, Feb. 2023, doi: 10.1186/s40537-023-00692-w.
- [31] Q. Tang and F. Nie, "Clustering routing algorithm of wireless sensor network based on swarm intelligence," *Wirel. Networks*, vol. 30, no. 9, pp. 7227–7238, Dec. 2024, doi: 10.1007/s11276-023-03584-2.

- [32] I. Nassra and J. V. Capella, "Data compression techniques in IoT-enabled wireless body sensor networks: A systematic literature review and research trends for QoS improvement," *Internet of Things*, vol. 23, p. 100806, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.iot.2023.100806.
- [33] R. Amutha, G. G. Sivasankari, and K. R. Venugopal, "Node clustering and data aggregation in wireless sensor network using sailfish optimization," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 82, no. 28, pp. 44107–44122, Nov. 2023, doi: 10.1007/s11042-023-15225-z.
- [34] N. Sonnappa and K. Muniyegowda, "Privacy-aware secured discrete framework in wireless sensor network," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 14, no. 1, p. 75, Feb. 2024, doi: 10.11591/ijece.v14i1.pp75-85.
- [35] N. Chandnani and C. N. Khairnar, "A Reliable Protocol for Data Aggregation and Optimized Routing in IoT WSNs based on Machine Learning," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 130, no. 4, pp. 2589–2622, Jun. 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10393-5.
- [36] Y. Liu, H. Huang, and J. Zhou, "A Dual Cluster Head Hierarchical Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Based on Hybrid Swarm Intelligence Optimization," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 9, pp. 16710–16721, May 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3355993.
- [37] J. Vellaichamy *et al.*, "Wireless Sensor Networks Based on Multi-Criteria Clustering and Optimal Bio-Inspired Algorithm for Energy-Efficient Routing," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 5, p. 2801, Feb. 2023, doi: 10.3390/app13052801.
- [38] S. He, Q. Li, M. Khishe, A. Salih Mohammed, H. Mohammadi, and M. Mohammadi, "The optimization of nodes clustering and multi-hop routing protocol using hierarchical chimp optimization for sustainable energy efficient underwater wireless sensor networks," *Wirel. Networks*, vol. 30, no. 1, pp. 233–252, Jan. 2024, doi: 10.1007/s11276-023-03464-9.
- [39] R. A. Chakravarthy, C. Sureshkumar, M. Arun, and M. Bhuvaneswari, "AI-Driven Energy-Efficient Data Aggregation and Routing Protocol Modeling to Maximize Network Lifetime in Wireless Sensor Networks," *NDT*, vol. 3, no. 4, p. 22, Sep. 2025, doi: 10.3390/ndt3040022.
- [40] K. Hemalatha and M. Amanullah, "Effective Hybrid Deep Learning Model of GAN and LSTM for Clustering and Data Aggregation in Wireless Sensor Networks," *Int. J. Sensors, Wirel. Commun. Control*, vol. 14, no. 2, pp. 122–133, Jun. 2024, doi: 10.2174/0122103279275330231217072855.
- [41] N. Chandnani and C. N. Khairnar, "Quality of Service (QoS) Enhancement of IoT WSNs Using an Efficient Hybrid Protocol for Data Aggregation and Routing," *SN Comput. Sci.*, vol. 4, no. 6, p. 762, Sep. 2023, doi: 10.1007/s42979-023-02165-6.
- [42] S. Hudda and K. Haribabu, "A review on WSN based resource constrained smart IoT systems," *Discov. Internet Things*, vol. 5, no. 1, p. 56, May 2025, doi: 10.1007/s43926-025-00152-2.
- [43] F. P. Eka Putra, L. Fitriyah, Z. Naimah, and S. A. Rofika, "Evaluasi Kinerja Aplikasi Wireshark Dalam Monitoring Jaringan Kecil Dengan Topologi Star dan Bus," *J. Ilm. Ilk. - Ilmu Komput. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 164–176, Jul. 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.343.
- [44] F. P. E. Putra, F. Fauzan, S. Syirofi, M. Mursidi, D. Wahid, and A. Nuraini, "Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik," *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 931–937, Jan. 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [45] S. A. Shifani, M. I. Mary Metilda, G. V. Rajkumar, S. Muppudathi Sutha, S. Maheshwari, and A. A. Mary, "Experimental Evaluation of a Secured Privacy Preservation Scheme using IP Traceback Logic in Wireless Sensor Networks," in *2024 5th International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*, IEEE, Sep. 2024, pp. 607–613. doi: 10.1109/ICOSEC61587.2024.10722428.
- [46] A. Bomnale and A. More, "A survey of data aggregation and routing protocols for energy-efficient wireless sensor networks," *ICST Trans. Scalable Inf. Syst.*, vol. 12, no. 2, Apr. 2025, doi: 10.4108/eetsis.6924.
- [47] 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, Jul. 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30559.
- [48] A. Ojha and B. Gupta, "Evolving landscape of wireless sensor networks: a survey of trends, timelines, and future perspectives," *Discov. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 8, p. 825, Jul. 2025, doi: 10.1007/s42452-025-07070-6.

- [49] F. P. Eka Putra, F. Muslim, N. Hasanah, Holipah, R. Paradina, and R. Alim, "Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 63–72, Jan. 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.325.
- [50] N. R. Saadallah and S. A. Alabady, "An Energy Efficient and Scalable WSN with Enhanced Data Aggregation Accuracy," *J. Telecommun. Inf. Technol.*, pp. 48–57, May 2024, doi: 10.26636/jtit.2024.2.1510.
- [51] V. Pathak, K. Singh, T. Khan, M. Shariq, S. A. Chaudhry, and A. K. Das, "A secure and lightweight trust evaluation model for enhancing decision-making in resource-constrained industrial WSNs," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 28162, Nov. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-75414-0.
- [52] 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.*, pp. 386–395, Feb. 2024, doi: 10.18421/TEM131-40.
- [53] M. H. Alsharif, A. Jahid, A. H. Kelechi, and R. Kannadasan, "Green IoT: A Review and Future Research Directions," *Symmetry (Basel)*, vol. 15, no. 3, p. 757, Mar. 2023, doi: 10.3390/sym15030757.

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