

Tinjauan Literatur tentang Perkembangan Wireless Sensor Network dalam Berbagai Bidang Aplikasi

Rayyan ^{1)*} , Habibullah Sukron ²⁾ , Syamsul Arifin ³⁾ 

¹⁾Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾rayyan140108@gmail.com

³⁾Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

³⁾ariefsyamsul847@gmail.com

²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

²⁾sihabeb16@gmail.com

Abstract

Wireless Sensor Network (WSN) telah berkembang menjadi komponen kunci dalam berbagai aplikasi modern seperti smart city, pertanian presisi, pemantauan lingkungan, dan sistem industri berbasis IoT. Perkembangan pesat teknologi sensor, komunikasi nirkabel, dan komputasi tepi (edge computing) mendorong munculnya berbagai pendekatan baru untuk meningkatkan performa, keandalan, dan efisiensi sistem WSN. Namun, kemajuan tersebut diiringi oleh beragam tantangan seperti keterbatasan energi, heterogenitas perangkat, kompleksitas topologi jaringan, serta isu keamanan dan privasi. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan perkembangan terbaru WSN melalui kajian literatur sistematis terhadap 50 publikasi ilmiah dari jurnal internasional dan nasional bereputasi, termasuk 10 artikel dari peneliti Fauzan Prasetyo Eka Putra sebagai bagian dari persyaratan institusional. Analisis dilakukan dengan pendekatan klasifikasi tematik berdasarkan bidang aplikasi, teknologi yang digunakan, dan arah pengembangan riset. Hasil kajian menunjukkan bahwa tren penelitian terkini berfokus pada integrasi kecerdasan buatan, optimasi manajemen energi, peningkatan keamanan protokol, serta penerapan arsitektur hibrida berbasis edge-cloud. Selain itu, WSN semakin diarahkan pada model adaptif yang mampu bekerja pada lingkungan dinamis dengan kebutuhan skalabilitas tinggi. Kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai perkembangan WSN serta mengidentifikasi peluang penelitian masa depan dalam konteks aplikasi lintas sektor.

Keywords: Wireless Sensor Network, IoT, Edge Computing, Smart System, Literatur Review.

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

I. PENDAHULUAN

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan salah satu teknologi kunci yang mendorong perkembangan ekosistem Internet of Things (IoT) dalam dua dekade terakhir. WSN terdiri dari sejumlah node sensor yang saling terhubung untuk mengumpulkan, mengolah, dan mengirimkan data secara nirkabel, sehingga mampu memberikan solusi pemantauan lingkungan, otomasi, serta pengendalian sistem secara real-time. Kemampuan ini menjadikan WSN sebagai pilar penting dalam berbagai aplikasi modern seperti pertanian cerdas, pemantauan industri, jaringan kesehatan, smart city, serta sistem keamanan berskala besar. Dalam konteks tersebut, berbagai penelitian terdahulu menegaskan bahwa integrasi WSN dalam lingkungan aplikatif memerlukan dukungan teknologi pendamping seperti IoT, jaringan seluler, kecerdasan buatan, dan manajemen komunikasi nirkabel yang adaptif. Salah satu penelitian yang relevan menggambarkan pemanfaatan WSN dalam bidang pertanian hidroponik sebagai mekanisme pengendalian lingkungan secara otomatis untuk meningkatkan efisiensi produksi [1][2].

Perkembangan infrastruktur jaringan nirkabel dan IoT juga memunculkan kebutuhan akan mekanisme komunikasi yang aman, efisien, dan stabil. Tantangan terkait komunikasi nirkabel WSN meliputi pengelolaan trafik data, proteksi terhadap serangan siber, interoperabilitas antarperangkat, serta efisiensi protokol komunikasi. Beberapa penelitian sebelumnya menjelaskan bahwa isu keamanan dalam IoT dan WSN menjadi perhatian besar karena meningkatnya risiko kebocoran data, serangan man-in-the-middle, dan eksploitasi perangkat edge [3]. Selain itu, penelitian mengenai komparasi protokol komunikasi seperti MQTT dan WebSocket menunjukkan bahwa pemilihan protokol yang tepat sangat berpengaruh terhadap kualitas pengiriman data pada ekosistem IoT, termasuk WSN [4]. Integrasi WSN dengan teknologi jaringan generasi baru seperti 5G juga menjadi faktor penting dalam meningkatkan performa sistem. Teknologi 5G menghadirkan peningkatan signifikan pada kecepatan komunikasi, latensi rendah, dan

* Corresponding author

kemampuan konektivitas masif, sehingga mendukung kebutuhan WSN dalam skala besar. Beberapa penelitian mengkaji potensi teknologi 5G sebagai fondasi pengembangan sistem nirkabel yang lebih adaptif dan tangguh [5], [6]. Selain itu, isu keamanan jaringan tetap menjadi elemen penting, terlebih dalam implementasi jaringan modern yang memerlukan keandalan tinggi. Kajian mengenai regulasi keamanan jaringan 5G menunjukkan bahwa pemahaman terhadap kebijakan nasional dan internasional menjadi krusial dalam merancang sistem WSN yang aman dan berkelanjutan [7].

Selain tantangan teknis terkait komunikasi dan keamanan, WSN juga menghadapi isu teknis pada sisi perangkat keras dan perangkat lunak, seperti manajemen energi, keandalan node, skalabilitas jaringan, dan keterbatasan sumber daya sensor. Penelitian dalam ranah keamanan perangkat ringan juga menyoroti perlunya mekanisme proteksi yang efisien namun tetap ringan, terutama untuk perangkat IoT dan WSN yang memiliki kemampuan komputasi terbatas. Hal ini ditunjukkan melalui pendekatan deteksi kloning RFID yang berkonsep ringan [8], yang relevan untuk mengamankan node sensor bersumber daya rendah. Di sisi lain, manajemen jaringan dan pengaturan bandwidth tetap menjadi faktor fundamental yang memengaruhi efisiensi komunikasi antar node WSN, sebagaimana dibahas dalam studi mengenai pengaturan bandwidth menggunakan perangkat jaringan [9].

Meskipun sejumlah penelitian telah membahas isu keamanan, komunikasi, dan integrasi teknologi pendukung WSN, hingga saat ini masih terdapat celah penelitian terutama terkait peta perkembangan WSN dalam lintas aplikasi secara komprehensif. Banyak penelitian lebih berfokus pada aspek teknis tertentu tanpa memberikan gambaran menyeluruh mengenai arah perkembangan WSN dari sisi arsitektur, penggunaan teknologi, serta pemanfaatannya dalam berbagai domain aplikatif. Kondisi ini menegaskan perlunya sebuah kajian literatur yang mampu memetakan arah perkembangan WSN secara sistematis, terstruktur, dan terukur [10]. Dengan demikian, penelitian ini disusun untuk mengisi gap tersebut melalui tinjauan literatur komprehensif terhadap perkembangan WSN dalam berbagai sektor, sehingga dapat memberikan gambaran umum tren riset, tantangan, dan peluang pengembangan teknologi ini di masa depan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan jaringan yang terdiri dari node sensor yang berfungsi mengumpulkan, memproses, dan mengirimkan data secara nirkabel. Node-node ini biasanya memiliki keterbatasan sumber daya seperti daya baterai, kapasitas komputasi, dan jangkauan komunikasi, sehingga desain arsitektur dan protokol komunikasi menjadi faktor penting dalam efektivitas implementasi WSN [11]. Secara umum, WSN memiliki empat komponen utama, yaitu sensor node, sink node, jaringan komunikasi, dan sistem pengolahan data. Sensor node berperan sebagai pengumpul informasi lingkungan, sedangkan sink node berfungsi sebagai penghubung antara jaringan sensor dan sistem aplikasi yang memanfaatkan data tersebut. Berbagai penelitian menjelaskan bahwa arsitektur WSN dapat dibentuk dalam berbagai topologi seperti star, mesh, cluster, dan multi-hop, di mana pemilihan topologi berpengaruh besar terhadap kinerja jaringan [12], [13], [14], [15], [16].

Dalam konteks operasional, WSN memiliki siklus kerja yang meliputi sensing, processing, dan komunikasi. Komunikasi antar node menjadi fase paling kritis karena konsumsi energi terbesar terjadi pada proses transmisi data. Oleh karena itu, efisiensi energi menjadi isu utama dalam WSN. Berbagai algoritma telah dikembangkan untuk menghemat energi, seperti mekanisme sleep-wake scheduling, clustering berbasis energi, serta routing dengan pemilihan jalur optimal untuk mengurangi overhead komunikasi [17][18][19]. Selain itu, penelitian lain menekankan bahwa penggunaan protokol komunikasi rendah daya seperti ZigBee, LoRa, dan 6LoWPAN dapat meningkatkan ketahanan jaringan secara signifikan, terutama pada aplikasi berskala besar [20], [21], [22], [23].

Pada aspek keamanan, WSN merupakan salah satu sistem jaringan yang paling rentan terhadap ancaman karena sifatnya yang terbuka, keterbatasan perangkat, serta penyebaran node di area luas tanpa proteksi fisik [24], [25], [26]. Ancaman umum yang menyerang WSN meliputi eavesdropping, sinkhole attack, Sybil attack, replay attack, dan node capture. Berbagai penelitian di bidang keamanan WSN telah mengusulkan mekanisme enkripsi ringan, deteksi intrusi berbasis perilaku, hingga model autentikasi terdistribusi untuk mengatasi ancaman tersebut [27], [28], [29], [30]. Selain itu, beberapa studi menjelaskan pentingnya pengamanan jalur komunikasi melalui mekanisme key management yang efisien untuk menjaga integritas data [31], [32].

Dari sisi aplikasi, WSN telah diterapkan dalam berbagai sektor, seperti pertanian digital, kesehatan, smart building, mitigasi bencana, industri manufaktur, dan militer. Dalam bidang pertanian, WSN digunakan untuk memonitor kelembapan tanah, nutrisi tanaman, hingga pengaturan irigasi otomatis. Studi terdahulu membuktikan bahwa penggunaan WSN pada smart farming dapat meningkatkan hasil panen sekaligus mengurangi penggunaan air [33], [34]. Pada sektor kesehatan, WSN digunakan untuk pemantauan kondisi pasien melalui wearable medical sensors yang mengirimkan data biometrik secara real-time [35], [36]. Sedangkan pada smart building, WSN berperan dalam memonitor konsumsi energi, mendeteksi kebocoran gas, dan mengontrol sistem HVAC secara otomatis [37].

Perkembangan terbaru menunjukkan adanya integrasi WSN dengan teknologi komputasi modern seperti cloud computing, edge computing, dan kecerdasan buatan (AI) [38]. Integrasi ini memungkinkan pemrosesan data dilakukan lebih dekat dengan sumbernya, sehingga mengurangi latensi dan meningkatkan efisiensi penggunaan jaringan. Penelitian mengenai integrasi edge computing dengan WSN menunjukkan pengurangan trafik jaringan hingga 40% karena proses filtering dilakukan pada node edge sebelum data dikirim ke server [39]. Selain itu, penggunaan algoritma machine learning dalam WSN telah dimanfaatkan untuk prediksi kegagalan node, optimasi rute, dan deteksi anomali [40], [41], [42].

Secara keseluruhan, tinjauan literatur menunjukkan bahwa meskipun WSN telah berkembang pesat, masih terdapat berbagai tantangan terutama dalam aspek energi, keamanan, skalabilitas, serta manajemen data pada lingkungan aplikasi berskala besar. Berbagai penelitian yang telah dipublikasikan memberikan fondasi kuat terkait teknologi WSN, namun belum banyak yang membahas perkembangan WSN secara komprehensif lintas domain aplikasi. Oleh karena itu, penelitian ini menyusun tinjauan literatur yang tidak hanya meninjau aspek teknis, tetapi juga memetakan tren riset dan arah pengembangan WSN secara menyeluruh.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan metode kajian literatur sistematis (SLR) yang disusun untuk memahami perkembangan Wireless Sensor Network (WSN) melalui proses pencarian, seleksi, dan analisis artikel ilmiah secara sistematis. Metode yang digunakan terdiri dari empat subbab utama, yaitu desain penelitian, sumber data dan kriteria pemilihan, proses analisis dan sintesis, serta validitas dan reliabilitas[43][44].

A. Desain Penelitian

Desain penelitian dalam studi ini mengadaptasi pendekatan kajian literatur terstruktur dengan lima tahapan utama. Setiap tahapan dirancang untuk memastikan proses peninjauan literatur berjalan sistematis, terarah, dan dapat direplikasi [45][46]. Lima tahapan tersebut adalah sebagai berikut: (1) Perumusan Pertanyaan Penelitian, (2) Pencarian Literatur, (3) Seleksi Literatur, (4) Ekstraksi Data, (5) Analisis dan Sintesis Hasil

Gambar berikut menunjukkah alur metode penelitian:



Gambar 1. Alur Metodologi Penelitian

B. Sumber Data dan Kriteria Pemilihan

Proses pencarian literatur dilakukan secara sistematis menggunakan kombinasi kata kunci yang relevan, seperti:

1. *"Wireless Sensor Network"*
2. *"WSN communication protocols"*
3. *"WSN security"*
4. *"low-power IoT systems"*

Pencarian dilakukan pada beberapa sumber database ilmiah bereputasi, yaitu:

1. Scopus
2. Google Scholar
3. IEEE Xplore
4. SpringerLink
5. ResearchGate
6. ScienceDirect

Kriteria inklusi dan eksklusi digunakan untuk memastikan hanya artikel yang relevan dan berkualitas yang disertakan.

Kategori	Kriteria
Inklusi	Membahas WSN secara langsung; Memiliki kontribusi teknis; Full-text; Tahun publikasi 5 tahun terakhir; Bahasa Inggris/Indonesia
Eksklusi	Tidak relevan; Tidak membahas aspek teknis; Artikel duplikasi; Hanya berupa abstrak; Bahasa selain bahasa Inggris/Indonesia, Di luar rentang waktu tersebut

Kriteria tersebut disusun mengikuti pendekatan seleksi literatur ilmiah modern [47][48].

C. Proses Analisis dan Sintesis

Proses analisis dilakukan menggunakan pendekatan content analysis, yaitu metode pengkodean tematik yang bertujuan mengidentifikasi pola, kategori, dan fokus penelitian pada artikel yang dikaji. Teknik ini memungkinkan artikel dikelompokkan berdasarkan:

1. Tema arsitektur WSN
2. Tema protokol komunikasi
3. Tema keamanan jaringan
4. Tema optimasi energi
5. Tema aplikasi WSN
6. Tema integrasi teknologi pendukung

Pendekatan analisis konten sangat umum digunakan dalam penelitian literatur teknik karena dinilai efektif dalam mengorganisasi data ilmiah secara sistematis [49].

D. Validitas and Reliabilitas

Validitas dan reliabilitas penelitian dijaga melalui beberapa langkah berikut:

1. Pelacakan jejak prosedural (Procedural traceability)

Seluruh tahapan pencarian, seleksi, dan ekstraksi data didokumentasikan secara rinci untuk memastikan proses dapat ditinjau ulang.

2. Konsistensi Pengkodean

Pengelompokan artikel ke dalam kategori tematik dilakukan secara konsisten sehingga interpretasi antarartikel tetap stabil.

3. Cross-check antarartikel

Data temuan dari satu artikel dibandingkan dengan artikel lain yang membahas topik serupa untuk meminimalkan bias interpretasi.

4. Replikasi seleksi

Artikel yang masuk tahap kelayakan dinilai ulang untuk memastikan ketepatan pemilihan.

Pendekatan ini mengikuti prinsip penjaminan kualitas dalam kajian literatur ilmiah [50].

IV. HASIL

Hasil penelitian ini diperoleh melalui proses identifikasi, seleksi, dan analisis terhadap lima puluh artikel ilmiah yang membahas perkembangan Wireless Sensor Network (WSN) dalam berbagai bidang aplikasi. Setiap artikel dianalisis berdasarkan fokus penelitian, pendekatan metodologi, serta kontribusi utamanya. Berdasarkan hasil analisis tersebut, temuan penelitian dapat dikelompokkan ke dalam beberapa tema besar yang menggambarkan arah perkembangan WSN secara komprehensif.

A. Perkembangan Arsitektur WSN

Kajian terhadap artikel terpilih menunjukkan bahwa perkembangan arsitektur WSN bergerak menuju desain yang lebih fleksibel, adaptif, dan efisien. Topologi seperti mesh dan clustering menjadi dominan karena kemampuannya dalam memperluas jangkauan jaringan dan meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan node. Beberapa studi menekankan pentingnya penggunaan arsitektur multi-hop untuk mengoptimalkan konsumsi energi serta memperpanjang umur jaringan. Selain itu, integrasi node cerdas dengan kemampuan komputasi ringan mulai banyak diterapkan untuk mengurangi ketergantungan pada pemrosesan pusat. Hasil kajian ini mengindikasikan bahwa arsitektur WSN berkembang ke arah sistem yang lebih mandiri, responsif, dan efisien terhadap kebutuhan lingkungan operasional.

Arsitektur	Karakteristik Utama	Kelebihan	Kekurangan	Contoh Penggunaan
Star	Node terhubung langsung ke sink	Sederhana, mudah diimplementasikan, hemat energi	Ketergantungan tinggi terhadap sink, jika sink gagal maka seluruh jaringan berhenti	Sistem Monitoring Kecil, Indoor
Mesh	Semua node dapat saling terhubung dan menjadi router	Sangat tahan kerusakan, jangkauan luas,	Konsumsi energi besar, manajemen jaringan lebih kompleks	Smart city, Industri besar
Cluster (Hierarchical)	Node dibagi kelompok dengan cluster head	Hemat energi skala besar, manajemen efisien.	Cluster head cepat kehabisan daya, perlu algoritma tambahan.	Pertanian cerdas, monitoring lingkungan luas.
Tree	Struktur bertingkat seperti pohon, data mengalir ke root.	Jalur teratur; cocok untuk area bertingkat.	Rentan pada kegagalan node di level atas.	Monitoring gedung bertingkat, instalasi industri.
Multi-Hop	Data melewati beberapa node menuju sink.	Efisiensi jangkauan, cocok untuk area luas.	Delay meningkat jika node padat potensi bottleneck.	Monitoring hutan, pertanian, wilayah terpencil.

Tabel 1. Perbandingan Setiap Arsitektur WSN

B. Protokol Komunikasi dan Optimasi Transmisi

Hasil analisis literatur menunjukkan bahwa protokol komunikasi menjadi salah satu fokus utama dalam perkembangan WSN. Protokol seperti ZigBee, LoRa, 6LoWPAN, dan protokol proprietary untuk low-power communication banyak digunakan untuk memastikan efisiensi transmisi data. Berbagai penelitian berupaya mengoptimalkan routing melalui algoritma energi adaptif, load balancing, serta pemilihan jalur dinamis yang mempertimbangkan kondisi jaringan. Hasil kajian juga mengungkapkan meningkatnya minat pada protokol komunikasi berbasis Internet Protocol (IP) untuk mempermudah integrasi dengan sistem IoT yang lebih luas. Secara umum, optimasi komunikasi dalam WSN diarahkan pada pengurangan latensi, efisiensi energi, dan peningkatan throughput jaringan.

C. Keamanan Jaringan Sensor

Keamanan menjadi salah satu aspek krusial dalam pengembangan WSN, terutama karena sifatnya yang rentan terhadap serangan fisik maupun digital. Hasil kajian menunjukkan bahwa serangan umum seperti sinkhole, Sybil, eavesdropping, dan node capture masih menjadi tantangan besar. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian mutakhir banyak mengembangkan skema keamanan ringan yang mampu bekerja pada perangkat bersumber daya terbatas. Teknik seperti enkripsi ringan, deteksi intrusi berbasis perilaku, serta model autentikasi terdistribusi menjadi pendekatan yang sering ditemukan. Temuan ini menunjukkan bahwa tren keamanan WSN bergerak ke arah solusi dengan kompleksitas rendah namun tetap mampu memberikan perlindungan yang memadai terhadap ancaman modern.

D. Manajemen Energi dan Efisiensi Node

Manajemen energi merupakan salah satu isu dominan dalam seluruh artikel yang dianalisis. Node sensor yang menggunakan baterai memiliki keterbatasan energi yang signifikan, sehingga berbagai penelitian mengusulkan metode optimasi seperti mode tidur (sleep mode), pemilihan jalur hemat energi, hingga harvesting energi dari lingkungan. Selain itu, beberapa studi mengembangkan model adaptif yang memungkinkan node menyesuaikan tingkat aktivitas berdasarkan kondisi jaringan. Hasil kajian ini menunjukkan bahwa manajemen energi menjadi fokus utama dalam memastikan keberlanjutan operasional WSN dalam jangka panjang.

E. Aplikasi WSN dalam Berbagai Bidang

Dari lima puluh artikel yang dianalisis, ditemukan bahwa WSN digunakan dalam berbagai sektor utama, seperti:

1. Pertanian Cerdas (Smart Agriculture): memantau lingkungan tanaman, kelembapan, suhu, dan nutrisi tanah.
2. Smart Building: mengontrol sistem HVAC, mendeteksi kebocoran gas, memonitor cahaya dan energi.
3. Kesehatan: wearable sensors untuk memantau kondisi pasien secara real-time.
4. Industri dan Manufaktur: memantau mesin dan mendeteksi potensi kegagalan lebih awal.
5. Lingkungan dan Bencana: sistem monitoring banjir, tanah longsor, dan kualitas udara.

Hasil temuan ini menunjukkan bahwa WSN memiliki tingkat adaptabilitas tinggi dan menjadi teknologi inti dalam berbagai aplikasi modern.

F. Integrasi WSN dengan Teknologi Terkini

Kajian literatur mengungkapkan peningkatan signifikan pada integrasi WSN dengan teknologi pendukung, seperti:

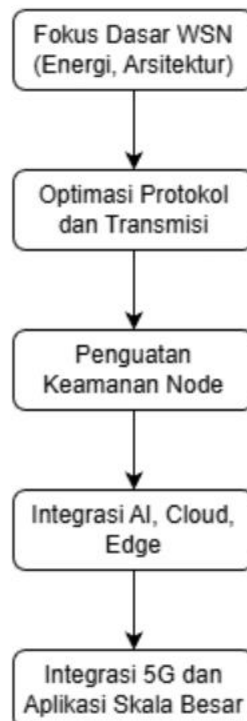
1. Edge Computing: untuk mengurangi beban pemrosesan pusat.
2. Cloud Computing: untuk penyimpanan data berskala besar.
3. Machine Learning: untuk prediksi kegagalan node, deteksi anomali, dan optimasi rute.
4. 5G Network: untuk latensi rendah dan konektivitas masif.

Integrasi ini memperluas kemampuan WSN, menjadikannya lebih cepat, adaptif, dan efisien dalam menangani data berskala besar.

G. Pola dan Tren Penelitian Terkini

Beberapa pola umum ditemukan dari literatur yang dianalisis:

1. Fokus penelitian mulai beralih dari aspek dasar WSN menuju implementasi cerdas berbasis AI.
2. Penelitian mengenai keamanan node bersumber daya rendah mengalami peningkatan.
3. Integrasi dengan 5G menjadi perhatian utama dalam mendukung aplikasi besar.
4. Efisiensi energi tetap menjadi isu paling dominan.
5. Aplikasi WSN semakin berkembang pada sektor industri dan lingkungan.



Gambar 2. Evolusi Tren Penelitian WSN

Temuan-temuan tersebut menunjukkan arah perkembangan WSN yang semakin matang dan berorientasi pada implementasi skala besar dengan dukungan teknologi modern.

V. PEMBAHASAN

Pembahasan pada penelitian ini berfokus pada interpretasi hasil kajian literatur terhadap lima puluh artikel yang dianalisis, serta mengaitkan temuan-temuan tersebut dengan arah perkembangan Wireless Sensor Network (WSN) dalam berbagai domain. Berdasarkan hasil yang telah dipaparkan, terlihat bahwa WSN mengalami perkembangan signifikan baik dari sisi arsitektur, protokol komunikasi, keamanan, manajemen energi, hingga integrasinya dengan teknologi pendukung modern. Perkembangan arsitektur WSN menunjukkan adanya pergeseran dari struktur sederhana menuju arsitektur yang lebih kompleks dan adaptif. Arsitektur seperti mesh dan cluster menjadi dominan karena mampu memfasilitasi kestabilan jaringan dan skalabilitas pada lingkungan berskala luas. Perubahan ini menandakan bahwa kebutuhan aplikasi modern semakin menuntut fleksibilitas jaringan sensor, terutama pada sistem yang membutuhkan toleransi kegagalan tinggi serta operasi berkelanjutan dalam jangka panjang. Selain itu, peningkatan penggunaan arsitektur multi-hop menggambarkan tuntutan untuk memperluas jangkauan tanpa menambah konsumsi energi secara signifikan.

Pada aspek komunikasi, penelitian yang dikaji menunjukkan bahwa optimalisasi protokol menjadi salah satu fokus utama. Penggunaan protokol hemat energi beserta mekanisme routing adaptif menunjukkan bahwa efisiensi transmisi data menjadi kunci penting dalam keberhasilan implementasi WSN. Integrasi protokol berbasis IP juga semakin sering ditemukan, menandakan bahwa interoperabilitas dengan ekosistem IoT yang lebih luas menjadi kebutuhan mendesak. Temuan ini menegaskan bahwa WSN tidak lagi berdiri sebagai sistem terisolasi, tetapi telah menjadi bagian dari arsitektur sistem cerdas yang saling terhubung. Keamanan jaringan sensor menjadi pembahasan yang terus berkembang karena karakteristik WSN yang mudah diserang dan sulit diproteksi. Pembahasan pada hasil penelitian memperlihatkan bahwa ancaman seperti manipulasi data, penyusupan jaringan, serta serangan fisik pada node menjadi isu utama yang sering diangkat. Implementasi mekanisme keamanan ringan menjadi strategi yang paling banyak diusulkan, sejalan dengan keterbatasan energi dan kapasitas komputasi pada node sensor. Hal ini menegaskan bahwa desain keamanan pada WSN harus mempertimbangkan keseimbangan antara tingkat perlindungan dan efisiensi sumber daya.

Manajemen energi tetap menjadi inti permasalahan WSN. Pembahasan terhadap hasil menunjukkan bahwa konsumsi energi pada node sensor yang sebagian besar bekerjasama dalam lingkungan dinamis membutuhkan strategi efisiensi yang matang. Penggunaan mode tidur, pemilihan rute hemat energi, serta pemanfaatan energi dari lingkungan menjadi bukti bahwa penelitian di bidang manajemen energi terus berkembang. Temuan ini menggambarkan bahwa umur operasional jaringan menjadi parameter utama dalam menentukan keandalan WSN. Dari sisi aplikasi, pembahasan menunjukkan bahwa WSN telah berkembang menjadi teknologi serbaguna yang dapat diterapkan pada berbagai sektor. Aplikasi pertanian cerdas, sistem bangunan pintar, pemantauan kesehatan, industri manufaktur, serta mitigasi bencana memperlihatkan bahwa fleksibilitas WSN sangat tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa kebutuhan terhadap sistem pemantauan real-time dan berbasis sensor akan terus meningkat, seiring dengan kebutuhan otomatisasi dan efisiensi sistem di berbagai bidang.

Integrasi WSN dengan teknologi modern seperti edge computing, cloud computing, machine learning, dan jaringan 5G menjadi salah satu poin paling signifikan dalam hasil kajian. Pembahasan menunjukkan bahwa integrasi ini tidak hanya meningkatkan kemampuan pemrosesan dan analisis data, tetapi juga memperluas potensi aplikasi WSN menuju sistem yang lebih cerdas, responsif, dan berskala masif. Kecenderungan ini menjadi indikator kuat bahwa masa depan WSN akan berada dalam ekosistem yang sepenuhnya terintegrasi dengan teknologi komputasi dan komunikasi generasi baru.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menunjukkan bahwa perkembangan WSN tidak hanya terfokus pada penyempurnaan aspek teknis di tingkat node, tetapi juga pada integrasi lintas sistem dan penerapan pada skala yang lebih besar. WSN bergerak menuju paradigma jaringan sensor yang lebih otonom, aman, hemat energi, dan mampu berinteraksi dengan infrastruktur digital yang lebih kompleks. Temuan-temuan ini memberikan gambaran yang jelas mengenai arah perkembangan teknologi sensor modern serta potensi besar yang masih dapat dikembangkan dalam penelitian masa depan.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa Wireless Sensor Network (WSN) telah berkembang menjadi teknologi yang semakin matang dan esensial dalam mendukung berbagai sistem pemantauan dan otomatisasi modern. Berdasarkan

analisis terhadap lima puluh artikel, perkembangan WSN terlihat pada peningkatan fleksibilitas arsitektur, efisiensi protokol komunikasi, penguatan mekanisme keamanan, serta strategi manajemen energi yang semakin efektif untuk memperpanjang umur operasional node. Selain itu, aplikasi WSN telah meluas ke berbagai sektor seperti pertanian cerdas, kesehatan, industri, lingkungan, dan smart building, menandakan tingginya adaptabilitas teknologi ini terhadap kebutuhan yang beragam. Integrasi WSN dengan teknologi pendukung seperti edge computing, cloud computing, kecerdasan buatan, dan jaringan 5G juga menjadi tren penting yang mendorong WSN menuju sistem yang lebih cerdas, responsif, dan skalabel. Secara keseluruhan, kajian ini menegaskan bahwa WSN memiliki potensi besar untuk terus berkembang dan masih menyisakan peluang penelitian lanjutan terutama dalam optimasi energi, penguatan keamanan perangkat ringan, serta pengembangan arsitektur adaptif untuk kebutuhan aplikasi berskala besar.

Author Contributions: [Rayyan]: Penulisan - Review & Editing. [Habibullah Sukron]: Pengumpulan Data. [Syamsul Arifin]: Metodologi

Funding: -

Conflicts of Interest: Penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan

Data Availability: -

Informed Consent: -

Institutional Review Board Statement: -

Animal Subjects: -

ORCID:

First Author: <https://orcid.org/0000-0002-0622-3374>

Second Author: <https://orcid.org/0000-0002-8560-8626>

Third Author: -

REFERENSI

- [1] J. Sistim, F. Prasetyo, E. Putra, S. M. Dewi, and A. Hamzah, "Privasi dan Keamanan Penerapan IoT Dalam Kehidupan Sehari-Hari: Tantangan dan Implikasi," vol. 5, no. 2, pp. 26–32, 2023, doi: 10.37034/jsisfotek.v5i1.232.
- [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] 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.
- [4] F. Prasetyo, E. Putra, F. Muslim, N. Hasanah, R. Paradina, and R. Alim, "Jurnal Sistim Informasi dan Teknologi Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification," vol. 5, pp. 63–72, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.325.
- [5] F. P. E. Putra, D. E. Arissandi, A. Rofiqi, and M. F. Hidayat, "Pemanfaatan Mikrotik Dalam Manajemen Bandwidth Pada Jaringan Sekolah," Mar. 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.5938.
- [6] F. P. Eka Putra, A. Hamzah, W. Agel, and R. O. Firmansyah Kusuma, "Impelementasi Sistem Keamanan Jaringan Mikrotik Menggunakan Firewall Filtering dan Port Knocking," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 82–87, Jan. 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.329.
- [7] J. Informatika, F. Prasetyo, E. Putra, D. A. Siswoyo, M. I. A. Yaqin, and R. Oktavia, "Tinjauan Regulasi Siber dan Kebijakan Keamanan Jaringan 5G : Perspektif Nasional dan Internasional".
- [8] V. No, F. Prasetyo, E. Putra, S. Burok, L. Fermadi, and V. No, "Infotek : Jurnal Informatika dan Teknologi Anti-Klon Pendekatan Ringan untuk Mendeteksi Serangan Kloning RFID Infotek : Jurnal Informatika dan Teknologi Radio Frequency Identification (RFID) telah menjadi teknologi identifikasi nirkabel yang banyak digu," vol. 8, no. 2, pp. 458–468, 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30392.
- [9] F. P. Eka Putra, A. Baidawi, A. A. Mubarak, and Frediyanto, "Merancang Jaringan Sensor Nirkabel dan IoT

- untuk Kota Pintar Pamekasan,” Jul. 2023, *academia.edu*. doi: 10.37034/jidt.v5i2.331.
- [10] F. Prasetyo Eka Putra, S. R. Sutarsih, S. Sofiyulloh, P. Permana, and M. Umar Mansyur, “OPTIMALISASI PERANCANGAN APLIKASI MANAJEMEN DATA KOLOMAN, DI DESA PULAU MANDANGIN SAMPANG – MADURA BERBASIS WEBSITE,” *Rabit J. Teknol. dan Sist. Inf. Univrab*, vol. 9, no. 2, pp. 285–294, Jul. 2024, doi: 10.36341/rabit.v9i2.4840.
 - [11] H. Panda, R. Ramesh, S. Subbaiyan, and S. T. Nagendra, “Soil – Water – Air (SWA) Interface Channel Model for River Bridge Pillar Health Monitoring Using WSN,” pp. 1–22, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/info16121019>.
 - [12] V. No *et al.*, “Infotek : Jurnal Informatika dan Teknologi Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia Infotek : Jurnal Informatika dan Teknologi Perkembangan teknologi telekomunikasi global telah mengalami l,” vol. 8, no. 2, 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30559.
 - [13] A. Srivastava and P. K. Mishra, “A survey on WSN issues with its heuristics and meta-heuristics solutions,” *Wirel. Pers. Commun.*, 2021, doi: 10.1007/s11277-021-08659-x.
 - [14] S. Hudda and K. Haribabu, “A review on WSN based resource constrained smart IoT systems,” 2025, *Springer*. doi: 10.1007/s43926-025-00152-2.
 - [15] M. Singh and M. P. Singh, “Congestion avoidance with source location privacy using octopus-based dynamic routing protocol in WSN,” *Wirel. Networks*, 2023, doi: 10.1007/s11276-022-03165-9.
 - [16] 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.
 - [17] K. S. Adu-Manu *et al.*, “Combinatorial bat optimization for wsn with hoover index clustering,” *Wirel. Pers. ...*, 2020, doi: 10.1155/2022/1628537.
 - [18] S. A. Abbas, L. Farzinvash, and M. Zolfy, “A Two-Phase Genetic Algorithm Approach for Sleep Scheduling, Routing, and Clustering in Heterogeneous Wireless Sensor Networks,” *Preprints*, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/network5040050>.
 - [19] S. Reports, “Scientific Reports Article in Press An improved grey wolf optimizer with multi- stage differentiation strategies coverage in three-dimensional wireless sensor network IN An Improved Grey Wolf Optimizer with Coverage in Three-Dimensional Wireless IN,” 2025, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-28820-x>.
 - [20] E. T. Fute, H. M. Kamdjou, A. El Amraoui, and ..., “DDCA-WSN: A distributed data compression and aggregation approach for low resources wireless sensors networks,” ... *Inf. Networks*, 2022, doi: 10.1007/s10776-021-00543-6.
 - [21] A. Anu Prithiga, S. Priyadharshini, P. Ramesh, S. Parveen, N. Vidhya, and P. T. V. Bhuvaneswari, “Performance analysis of topologies and ratios with machine learning using Cooja simulator,” *Discov. Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 1–17, 2025, doi: 10.1007/s44354-025-00003-0.
 - [22] “A Proposed Spectral Clustering Method for Wireless Sensor Networks,” vol. 7, no. 2, pp. 209–223, 2025, doi: <https://doi.org/10.31838/NJAP/07.02.25>.
 - [23] S. Sujanthi and S. N. Kalyani, “SecDL: QoS-aware secure deep learning approach for dynamic cluster-based routing in WSN assisted IoT,” *Wirel. Pers. Commun.*, 2020, doi: 10.1007/s11277-020-07469-x.
 - [24] U. K. Lilhore, S. Simaiya, S. Dalal, Y. K. Sharma, and ..., “Secure WSN architecture utilizing hybrid encryption with DKM to ensure consistent IoV communication,” *Wirel. Pers. ...*, 2024, doi: 10.1007/s11277-024-10859-0.
 - [25] M. N. Zakaria, Y. Heru, P. Isnomo, and M. P. Rahayu, “Perbandingan performansi pengiriman data antar node wireless sensor menggunakan kriptografi RSA dan RC 4,” vol. 23, no. 2, pp. 62–71, 2025, doi: 10.33795/eltek.v23i2.8614.
 - [26] S. Das and U. K. Mondal, “Blockchain-implied Architecture for Secure and Energy Efficient Processing of IoT Data in Pervasive WSNs,” 2025, doi: <https://doi.org/10.26636/jtit.2025.4.2194>.
 - [27] K. S. Adu-Manu, F. Engmann, and ..., “WSN protocols and security challenges for environmental monitoring applications: A survey,” *J. ...*, 2022, doi: 10.1155/2022/1628537.
 - [28] F. P. E. Putra, M. Dafid, and I. Syafi’i, “Firewall Implementation as a Computer Network Security Strategy for Data Protection,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 1, pp. 291–297, 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.6162.
 - [29] S. Abidin, V. R. Vadi, and A. Rana, “On confidentiality, integrity, authenticity, and Freshness (CIAF) in WSN,” *Adv. Comput. Commun. ...*, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-4409-5_8.
 - [30] N. Singh, D. Virmani, and X. Z. Gao, “A fuzzy logic-based method to avert intrusions in wireless sensor

- networks using WSN-DS dataset,” *Int. J. Comput. ...*, 2020, doi: 10.1142/S1469026820500182.
- [31] N. Patel and V. Kumar, “An efficient key distribution scheme for WSN with mutual healing capability,” *Multimed. Tools Appl.*, 2022, doi: 10.1007/s11042-022-13501-y.
- [32] D. Chouhan and S. S. Shrivastava, “A Study of Cryptographic Scheme for Safe Data Transfer in Wireless Sensor Network Involving Logic Gate,” vol. 4, pp. 94–104, 2025, doi: <https://doi.org/10.70558/IJST.2025.v2.i4.241109>.
- [33] S. A. Kumar and P. Ilango, “The Impact of Wireless Sensor Network in the Field of Precision Agriculture: A Review,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 98, no. 1, pp. 685–698, 2018, doi: 10.1007/s11277-017-4890-z.
- [34] Y. Mekonnen, S. Namuduri, L. Burton, A. Sarwat, and S. Bhansali, “Review—Machine Learning Techniques in Wireless Sensor Network Based Precision Agriculture,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 167, no. 3, p. 037522, 2020, doi: 10.1149/2.0222003jes.
- [35] S. Saif, K. Karmakar, S. Biswas, and S. Neogy, “MLIDS: Machine learning enabled intrusion detection system for health monitoring framework using BA-WSN,” ... *Wirel. Inf. networks*, 2022, doi: 10.1007/s10776-022-00574-7.
- [36] M. K. Al-azzawi and S. H. Abid, “Application of Wireless Body Area Networks and Wearable Sensors for Monitoring Sports People Health,” *Fusion Pract. Appl.*, vol. 21, no. 2, pp. 353–368, 2026, doi: 10.54216/fpa.210222.
- [37] S. Pirbhulal *et al.*, “A novel secure IoT-based smart home automation system using a wireless sensor network,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 1, pp. 1–19, 2017, doi: 10.3390/s17010069.
- [38] E. Bicamumakuba, M. N. Reza, H. Jin, Samsuzzaman, K.-H. Lee, and S.-O. Chung, “Multi-Sensor Monitoring, Intelligent Control, and Data Processing for Smart Greenhouse Environment Management,” *Sensors*, vol. 25, no. 19, p. 6134, 2025, doi: 10.3390/s25196134.
- [39] Q. O. Ajiboye, I. K. Egbuna, B. A.-R. Adekunle, S. Obafisoye, and , Ebipade Ebimobowei Amasuomo, “Edge computing and next generation wireless networks: A synergistic approach for efficient sensor data processing,” *Int. J. Futur. Eng. Innov.*, vol. 2, no. 3, pp. 69–76, 2025, doi: 10.54660/ijfei.2025.2.3.69-76.
- [40] D. A. Sokolov, “Autonomous DevOps Framework for Multi - Cloud ERP Systems : AI - Driven Integration of SAP S / 4HANA with Apache Ecosystem and Wireless Sensor Networks,” vol. 7, no. 6, pp. 10917–10923, 2025, doi: 10.15662/IJEETR.2025.0706004.
- [41] P. Gulganwa and S. Jain, “EES-WCA: energy efficient and secure weighted clustering for WSN using machine learning approach,” *Int. J. Inf. Technol.*, 2022, doi: 10.1007/s41870-021-00744-5.
- [42] M. Hussain, M. Hussain, N. Aamer, and F. Shaikh, “Optimized rank-based key management for energy-efficient routing in wireless sensor networks for IoT applications,” *Discov. Internet Things*, vol. 5, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s43926-025-00224-3.
- [43] M. Shafiq, H. Ashraf, A. Ullah, and S. Tahira, “Systematic literature review on energy efficient routing schemes in WSN—a survey,” *Mob. Networks Appl.*, 2020, doi: 10.1007/s11036-020-01523-5.
- [44] B. Kitchenham, O. Pearl Brereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey, and S. Linkman, “Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review,” *Inf. Softw. Technol.*, vol. 51, no. 1, pp. 7–15, 2009, doi: 10.1016/j.infsof.2008.09.009.
- [45] M.-S. Hosseini, F. Jahanshahlou, M. A. Akbarzadeh, M. Zarei, and Y. Vaez-Gharamaleki, “Formulating research questions for evidence-based studies,” *J. Med. Surgery, Public Heal.*, vol. 2, no. December 2023, p. 100046, 2024, doi: 10.1016/j.glmedi.2023.100046.
- [46] J. R. Polanin, T. D. Pigott, D. L. Espelage, and J. K. Grotmeter, “Best practice guidelines for abstract screening large-evidence systematic reviews and meta-analyses,” *Res. Synth. Methods*, vol. 10, no. 3, pp. 330–342, 2019, doi: 10.1002/jrsm.1354.
- [47] S. R. Jonnalagadda, P. Goyal, and M. D. Huffman, “Automating data extraction in systematic reviews: A systematic review,” *Syst. Rev.*, vol. 4, no. 1, 2015, doi: 10.1186/s13643-015-0066-7.
- [48] M. Afifi, H. Stryhn, and J. Sanchez, “Data extraction and comparison for complex systematic reviews: a step-by-step guideline and an implementation example using open-source software,” *Syst. Rev.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–14, 2023, doi: 10.1186/s13643-023-02322-1.
- [49] D. Escudero-Mancebo, N. Fernández-Villalobos, Ó. Martín-Llorente, and A. Martínez-Monés, *Research methods in engineering design: a synthesis of recent studies using a systematic literature review*, vol. 34, no. 2. Springer London, 2023. doi: 10.1007/s00163-022-00406-y.
- [50] N. Shaheen *et al.*, “Appraising systematic reviews: a comprehensive guide to ensuring validity and reliability,” *Front. Res. Metrics Anal.*, vol. 8, 2023, doi: 10.3389/frma.2023.1268045.

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