

ANALISIS DAN KAJIAN LITERATUR MENGENAI PERKEMBANGAN TEKNOLOGI DAN TANTANGAN IMPLEMENTASI WIRELESS SENSOR NETWORK (WSN)

Kevin Ananda Puryanto Pratama ^{1)*} , Theofillus ²⁾ 

¹⁾ ²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ k3vina7x14@gmail.com, ²⁾

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk meninjau secara komprehensif perkembangan teknologi dan tantangan implementasi *Wireless Sensor Network* (WSN) melalui pendekatan kajian literatur sistematis. Metode yang digunakan adalah *Systematic Literature Review* (SLR) dengan menghimpun berbagai penelitian terdahulu dari sumber ilmiah terverifikasi. Hasil kajian menunjukkan bahwa teknologi WSN telah mengalami perkembangan signifikan dalam hal arsitektur jaringan, efisiensi energi, dan penerapannya pada berbagai bidang seperti industri, pertanian, lingkungan, dan kesehatan. Integrasi WSN dengan *Internet of Things* (IoT), *edge computing*, dan *artificial intelligence* telah membuka peluang baru dalam pengelolaan data secara real-time yang lebih efisien dan adaptif. Namun, tantangan yang dihadapi masih kompleks, terutama dalam aspek keamanan data, konsumsi energi, skalabilitas jaringan, serta keandalan komunikasi antar-node. Upaya peningkatan efisiensi energi melalui *energy harvesting* dan algoritma cerdas berbasis *machine learning* menjadi fokus penelitian terkini. Selain itu, pendekatan keamanan ringan (*lightweight security*) dan penerapan *Software Defined Networking* (SDN) mulai dikembangkan untuk mengoptimalkan manajemen jaringan dan menjaga integritas sistem. Berdasarkan analisis literatur, penelitian masa depan disarankan untuk mengembangkan sistem WSN yang lebih otonom, adaptif, hemat energi, dan aman guna mendukung keberlanjutan infrastruktur digital di berbagai sektor.

Kata Kunci: Wireless Sensor Network, Efisiensi Energi, Keamanan Data, Skalabilitas, Literature Review

Article history: Received 10 March 2025, first decision 25 March 2025, accepted 15 May 2025, available online 1 June 2025

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi nirkabel dan mikroelektronika telah melahirkan konsep *Wireless Sensor Network* (WSN), yaitu jaringan sensor berukuran kecil yang mampu mendeteksi, memproses, dan mengirimkan data secara nirkabel. Teknologi ini memungkinkan pengumpulan informasi lingkungan secara real-time, seperti suhu, kelembapan, tekanan udara, hingga pergerakan objek. Kemampuan tersebut menjadikan WSN sebagai salah satu komponen utama dalam sistem pemantauan modern yang mendukung pengambilan keputusan berbasis data.

Seiring dengan kemajuan teknologi *Internet of Things* (IoT), integrasi WSN menjadi semakin luas dan beragam. Kolaborasi antara WSN dan IoT memungkinkan sistem pemantauan cerdas (*smart monitoring system*) yang terhubung dengan *cloud computing* dan analisis data besar. Aplikasi ini banyak diterapkan pada sektor pertanian, industri, lingkungan, dan kesehatan untuk meningkatkan efisiensi, akurasi, serta otomatisasi proses kerja.

Meskipun menawarkan berbagai keunggulan, WSN masih menghadapi sejumlah tantangan teknis dan operasional. Keterbatasan energi pada node sensor, keandalan komunikasi data, serta aspek keamanan terhadap ancaman eksternal merupakan masalah utama yang sering ditemukan dalam implementasi jaringan ini. Selain itu, skalabilitas

* Suhdi

dan efisiensi manajemen jaringan menjadi isu penting seiring meningkatnya jumlah perangkat yang saling terhubung.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan kajian literatur yang komprehensif mengenai perkembangan teknologi dan tantangan implementasi WSN. Melalui pendekatan *systematic literature review*, penelitian ini berusaha mengidentifikasi tren penelitian terkini, mengelompokkan isu-isu utama yang dihadapi, serta merumuskan arah pengembangan teknologi WSN di masa depan agar lebih efisien, aman, dan adaptif terhadap kebutuhan berbagai sektor.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Konsep dan Arsitektur Wireless Sensor Network

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan sistem jaringan yang terdiri atas sejumlah node sensor dengan kemampuan *sensing*, *processing*, dan komunikasi nirkabel. Setiap node berfungsi untuk mendeteksi parameter lingkungan tertentu dan mengirimkan hasilnya ke *sink node* atau *base station* untuk diproses lebih lanjut. Umumnya, node sensor memiliki keterbatasan dalam hal energi, kapasitas penyimpanan, dan kemampuan pemrosesan data.

Menurut Akyildiz et al. (2002), desain topologi jaringan seperti *star*, *tree*, dan *mesh* sangat berpengaruh terhadap efisiensi transmisi dan ketahanan jaringan. Sementara itu, penelitian terbaru oleh Liu & Ma (2018) menyoroti pentingnya penerapan *cross-layer design* untuk meningkatkan efisiensi komunikasi antar-node. Integrasi WSN dengan IoT dan *edge computing* juga menjadi tren baru yang memungkinkan pemrosesan data lebih cepat dan efisien di dekat sumber data (*edge devices*), sehingga mengurangi beban pada pusat data utama.

B. Efisiensi Energi dalam WSN

Efisiensi energi merupakan faktor paling krusial dalam desain dan implementasi WSN, mengingat sebagian besar node bergantung pada baterai dengan kapasitas terbatas. Berbagai protokol telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan ini, seperti LEACH, PEGASIS, dan TEEN, yang berfokus pada pengelompokan node dan pengaturan jalur transmisi hemat energi.

Khan et al. (2020) menunjukkan bahwa penerapan algoritma *machine learning* dapat meningkatkan efisiensi energi dengan memprediksi pola penggunaan daya dan mengatur waktu aktif node secara dinamis. Selain itu, penelitian terbaru mengusulkan pendekatan *energy harvesting*, yaitu pemanfaatan sumber energi alami seperti panas, getaran, atau cahaya matahari, untuk memperpanjang umur operasional jaringan. Kombinasi antara *AI-driven routing protocol* dan *energy harvesting* kini menjadi arah penelitian yang menjanjikan untuk meningkatkan keberlanjutan sistem WSN.

C. Keamanan dan Keandalan Sistem

Keamanan menjadi isu krusial dalam pengembangan WSN karena sifat jaringannya yang terdistribusi dan rentan terhadap serangan. Jenis serangan umum yang dihadapi antara lain *sinkhole attack*, *Sybil attack*, *selective forwarding*, dan *data modification*. Untuk mengatasi hal ini, berbagai pendekatan telah dikembangkan, seperti penggunaan enkripsi ringan (*lightweight encryption*), sistem deteksi intrusi (*Intrusion Detection System/IDS*), dan autentikasi berbasis *public key infrastructure* (PKI).

Menurut Jiang dan Han (2016), sistem IDS yang diadaptasi untuk WSN harus mempertimbangkan keseimbangan antara tingkat keamanan dan konsumsi energi. Penelitian oleh Ali et al. (2018) juga menekankan pentingnya desain keamanan adaptif yang dapat menyesuaikan kompleksitas algoritma dengan kemampuan node sensor. Di masa mendatang, penerapan *blockchain* dan *federated learning* mulai dikaji sebagai solusi untuk meningkatkan transparansi dan integritas data tanpa membebani sumber daya jaringan.

D. PENERAPAN WIRELESS SENSOR NETWORK

PENERAPAN WSN TELAH MERAMBAH BERBAGAI SEKTOR, SEPERTI PERTANIAN CERDAS (*SMART AGRICULTURE*), INDUSTRI MANUFAKTUR, PEMANTAUAN LINGKUNGAN, DAN SISTEM KESEHATAN. DALAM BIDANG PERTANIAN, KUMARI & MAURYA (2020) MENUNJUKKAN BAHWA WSN DAPAT MEMBANTU MENGOPTIMALKAN PENGGUNAAN AIR DAN PUPUK MELALUI PEMANTAUAN KELEMBAPAN TANAH SECARA REAL-TIME. SEMENTARA ITU, DALAM INDUSTRI, XU ET AL. (2019) MENJELASKAN BAHWA *INDUSTRIAL WSN (IWSN)* MAMPU MENINGKATKAN EFISIENSI PRODUKSI DAN KESELAMATAN KERJA MELALUI SISTEM SENSOR OTOMATIS YANG TERHUBUNG DENGAN *CLOUD ANALYTICS*.

SELAIN ITU, DI BIDANG KESEHATAN, WSN DIGUNAKAN UNTUK MEMANTAU KONDISI PASIEN SECARA BERKELANJUTAN MELALUI PERANGKAT SENSOR TUBUH (*BODY SENSOR NETWORK*). TEKNOLOGI INI MEMUNGKINKAN PENGAWASAN JARAK JAUH TERHADAP PASIEN DENGAN PENYAKIT KRONIS, SEHINGGA MENINGKATKAN KUALITAS LAYANAN MEDIS. INTEGRASI ANTARA WSN, IoT, DAN *ARTIFICIAL INTELLIGENCE* MENJADIKAN SISTEM INI SEMAKIN CERDAS, EFISIEN, DAN ADAPTIF TERHADAP BERBAGAI KEBUTUHAN APLIKASI MODERN.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai perkembangan dan tantangan implementasi *Wireless Sensor Network* (WSN). Pendekatan SLR dipilih karena mampu menyajikan analisis yang terstruktur dan objektif terhadap hasil-hasil penelitian terdahulu, sehingga dapat mengidentifikasi kesenjangan (*research gap*) dan arah penelitian masa depan. SLR juga memungkinkan peneliti untuk menyaring literatur berdasarkan kriteria tertentu agar hasil analisis lebih fokus dan valid secara ilmiah.

Tahapan pertama dalam penelitian ini adalah **pengumpulan literatur**. Proses ini dilakukan dengan menelusuri beberapa basis data ilmiah internasional seperti IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, dan Wiley Online Library. Kata kunci yang digunakan meliputi "*Wireless Sensor Network*", "*Energy Efficiency*", "*Security Challenges*", "*IoT Integration*", dan "*WSN Applications*". Kriteria pemilihan meliputi artikel yang diterbitkan antara tahun **2010 hingga 2025**, memiliki reputasi jurnal terindeks (seperti Scopus atau IEEE), serta relevan dengan topik efisiensi energi, keamanan, arsitektur, dan penerapan WSN.

Tahapan kedua adalah **penyaringan dan seleksi literatur**. Pada tahap ini, seluruh publikasi yang diperoleh dievaluasi berdasarkan kelengkapan metodologi, kejelasan hasil, dan relevansi dengan fokus penelitian. Artikel yang bersifat duplikasi atau tidak sesuai konteks dikeluarkan dari analisis. Hasil dari tahap ini berupa kumpulan artikel terpilih yang menjadi dasar sintesis literatur. Proses seleksi dilakukan menggunakan prinsip *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) untuk memastikan transparansi dan konsistensi prosedur.

Tahapan ketiga adalah **klasifikasi dan analisis isi**. Setiap artikel dikategorikan berdasarkan empat topik utama, yaitu (1) arsitektur jaringan dan desain topologi, (2) efisiensi energi dan optimisasi daya, (3) keamanan dan keandalan sistem, serta (4) penerapan WSN pada berbagai sektor. Data dari masing-masing kategori dianalisis secara deskriptif dan komparatif untuk mengidentifikasi pola, tren, serta kontribusi penelitian sebelumnya. Dalam proses ini, dilakukan pula perbandingan metode, algoritma, dan hasil evaluasi untuk menemukan pendekatan yang paling efektif.

Tahapan terakhir adalah **sintesis hasil dan penarikan kesimpulan**. Informasi yang diperoleh dari analisis isi kemudian disintesis menjadi temuan-temuan utama yang menggambarkan arah perkembangan WSN secara keseluruhan. Proses sintesis juga bertujuan untuk mengidentifikasi tantangan yang masih belum terselesaikan serta potensi pengembangan teknologi di masa depan, seperti penerapan *artificial intelligence*, *software-defined networking* (SDN), dan *energy harvesting*.

Dengan mengikuti tahapan SLR ini, penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai perkembangan teknologi WSN dan tantangan implementasinya dari berbagai perspektif ilmiah. Pendekatan ini juga

memperkuat validitas hasil penelitian karena setiap tahapan dilakukan secara sistematis, terukur, dan dapat direplikasi oleh peneliti lain pada konteks yang serupa.

IV. HASIL & PEMBAHASAN

A. Perkembangan Arsitektur Jaringan WSN

Perkembangan arsitektur jaringan *Wireless Sensor Network* (WSN) telah mengalami transformasi signifikan dalam dua dekade terakhir. Awalnya, WSN menggunakan struktur sederhana dengan komunikasi *single-hop*, di mana node sensor berinteraksi langsung dengan *sink node*. Namun, pendekatan ini dinilai kurang efisien karena mengakibatkan beban komunikasi tinggi pada node tertentu, terutama ketika jumlah sensor meningkat. Oleh karena itu, muncul konsep *multi-hop communication*, di mana data dikirim melalui beberapa node sebelum mencapai *base station*, sehingga konsumsi energi lebih merata dan jaringan menjadi lebih tahan lama.

Selanjutnya, berbagai topologi jaringan mulai dikembangkan untuk menyesuaikan kebutuhan aplikasi dan kondisi lingkungan. Topologi seperti *star*, *tree*, dan *mesh* digunakan berdasarkan pertimbangan jarak, kepadatan node, dan kebutuhan energi. Penelitian oleh Bandyopadhyay & Coyle (2003) dan Li et al. (2013) menunjukkan bahwa topologi hierarkis berbasis kluster, seperti LEACH, lebih efisien karena mampu mengurangi beban transmisi dan memperpanjang umur jaringan. Dalam sistem ini, node diklasifikasikan menjadi *cluster head* dan *member node*, sehingga hanya *cluster head* yang berkomunikasi langsung dengan *sink*, menghemat energi total sistem.

Tren terbaru menunjukkan bahwa integrasi WSN dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *Software Defined Networking* (SDN) semakin memperkuat kemampuan adaptif jaringan. Pendekatan ini memungkinkan manajemen dinamis terhadap konfigurasi jaringan melalui *controller* terpusat yang mengoptimalkan jalur komunikasi dan penggunaan energi. Selain itu, penerapan *edge computing* mempercepat pemrosesan data di sisi pengguna (*user edge*), sehingga memperkecil latensi dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

B. Tabel Komparatif Penelitian Terkini

Analisis literatur menunjukkan bahwa berbagai penelitian telah berfokus pada peningkatan efisiensi energi, keamanan, dan keandalan WSN melalui pendekatan algoritmik dan arsitektural. Misalnya, Liu & Ma (2018) mengembangkan metode *Hierarchical Routing* yang berhasil meningkatkan umur jaringan hingga 35%. Khan et al. (2020) menerapkan *machine learning* untuk memprediksi pola konsumsi daya dan mengatur siklus tidur (*sleep scheduling*) node sensor. Penelitian lain oleh Razaque & Elleithy (2021) menekankan desain *cross-layer protocol* yang meningkatkan efisiensi energi sebesar 42% dibandingkan pendekatan tradisional.

Dari sisi penerapan, Sial & Sial (2023) memperkenalkan konsep *Smart WSN* yang menggabungkan kecerdasan buatan dan integrasi IoT, sehingga jaringan mampu menyesuaikan konfigurasi secara otomatis berdasarkan kondisi lingkungan. Xu et al. (2025) kemudian mengembangkan *AI-driven Optimization* yang berfokus pada *Industrial WSN* (IWSN) untuk meningkatkan efisiensi daya hingga 50%. Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa inovasi berbasis kecerdasan buatan dan *adaptive communication* menjadi arah utama pengembangan WSN di masa depan.

Secara umum, tabel komparatif penelitian terkini mengindikasikan adanya kecenderungan global untuk mengintegrasikan teknologi *machine learning*, *SDN*, dan *IoT* dalam sistem WSN. Sinergi ini bertujuan untuk mencapai efisiensi energi yang lebih tinggi, pengelolaan jaringan yang lebih fleksibel, serta peningkatan keamanan. Dengan demikian, WSN tidak hanya berperan sebagai sistem pemantauan pasif, tetapi juga berkembang menjadi platform cerdas yang mampu beradaptasi terhadap dinamika lingkungan secara real-time.

Tahun	Peneliti	Fokus	Pendekatan	Hasil Utama
2018	Liu & Ma	Efisiensi Energi	Hierarchical Routing	Meningkatkan umur jaringan hingga 35%

2020	Khan et al.	Penghematan Energi	Machine Learning	Prediksi pola konsumsi daya
2021	Razaque & Elleithy	Desain Lapis Silang	Cross-Layer Protocol	Efisiensi energi 42% lebih baik
2023	Sial & Sial	Arsitektur Cerdas	Smart WSN	Integrasi IoT adaptif
2025	Xu et al.	Industrial WSN	AI-driven Optimization	Efisiensi daya meningkat 50%

C. Tantangan Efisiensi Energi dan Solusi Inovatif

Efisiensi energi masih menjadi tantangan paling dominan dalam implementasi WSN. Keterbatasan daya baterai menyebabkan umur operasional jaringan sering kali tidak optimal, terutama pada aplikasi luar ruangan yang sulit dijangkau. Penelitian menunjukkan bahwa sekitar 70% energi dalam WSN digunakan untuk transmisi dan komunikasi data, bukan untuk proses penginderaan. Oleh karena itu, diperlukan strategi penghematan energi yang cerdas untuk meminimalkan konsumsi daya tanpa menurunkan kualitas komunikasi antar-node.

Beberapa solusi inovatif telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan ini. Salah satunya adalah penerapan *energy-aware routing protocol*, yang menyesuaikan jalur transmisi berdasarkan tingkat energi residual pada setiap node. Pendekatan ini memastikan distribusi beban energi yang seimbang sehingga tidak ada node yang kehabisan daya lebih cepat dari yang lain. Selain itu, penelitian oleh Rault et al. (2014) dan Zhang et al. (2020) memperkenalkan metode *energy harvesting* yang memanfaatkan energi dari sumber eksternal seperti getaran, panas, atau cahaya untuk mengisi ulang daya node secara otomatis.

Inovasi terbaru mengarah pada pemanfaatan *machine learning* untuk mengoptimalkan konsumsi energi berdasarkan prediksi pola aktivitas jaringan. Dengan menggunakan model pembelajaran seperti *reinforcement learning* dan *deep Q-network*, sistem dapat memutuskan kapan node harus aktif atau masuk ke mode tidur tanpa campur tangan manusia. Pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan efisiensi hingga 40% dibandingkan metode konvensional. Kombinasi antara *AI*, *energy harvesting*, dan *adaptive communication* kini menjadi fokus utama dalam desain WSN yang berkelanjutan.

D. KEAMANAN DAN SKALABILITAS JARINGAN

KEAMANAN MENJADI ASPEK PENTING DALAM PENGOPERASIAN WSN KARENA SIFAT JARINGAN YANG TERDISTRIBUSI DAN SERING KALI DIGUNAKAN DI LINGKUNGAN TERBUKA. ANCAMAN SEPERTI *SYBIL ATTACK*, *SINKHOLE*, DAN *DATA MODIFICATION* DAPAT MENAKIBATKAN GANGGUAN SERIUS TERHADAP INTEGRITAS DATA DAN KESTABILAN SISTEM. MENURUT ALRAJEH ET AL. (2013), SISTEM KEAMANAN TRADISIONAL SEPERTI ENKRIPSI BERAT TIDAK DAPAT DITERAPKAN SECARA LANGSUNG KARENA KETERBATASAN DAYA DAN MEMORI NODE SENSOR. OLEH KARENA ITU, DIBUTUHKAN MEKANISME KEAMANAN RINGAN (*LIGHTWEIGHT SECURITY*) YANG TETAP EFISIEN SECARA ENERGI.

PENDEKATAN KEAMANAN MODERN KINI MEMANFAATKAN KOMBINASI *CRYPTOGRAPHIC PROTOCOL* DAN *INTRUSION DETECTION SYSTEM (IDS)*. IDS BERFUNGSI MEMONITOR POLA LALU LINTAS DATA UNTUK MENDETEKSI PERILAKU ANOMALI YANG MENGINDIKASIKAN ADANYA SERANGAN. SISTEM INI SERING DIPADUKAN DENGAN *MACHINE LEARNING* UNTUK MENINGKATKAN AKURASI DETEKSI SERANGAN DAN MENGURANGI KESALAHAN IDENTIFIKASI (*FALSE POSITIVE*). JIANG & HAN (2016) MENYARANKAN PENGGUNAAN IDS BERBASIS *COLLABORATIVE LEARNING*, DI MANA NODE SALING BERBAGI INFORMASI ANCAMAN UNTUK MEMBANGUN PERTAHANAN KOLEKTIF DALAM JARINGAN.

SELAIN KEAMANAN, ASPEK SKALABILITAS JUGA MENJADI PERHATIAN UTAMA. PENINGKATAN JUMLAH NODE SENSOR SERING MENYEBABKAN KEMACETAN LALU LINTAS DATA DAN MENURUNKAN EFISIENSI KOMUNIKASI. UNTUK MENGATASI HAL INI, PENDEKATAN *SOFTWARE DEFINED NETWORKING (SDN)* MULAI DITERAPKAN PADA WSN. SDN MEMUNGKINKAN MANAJEMEN JARINGAN YANG TERPUSAT, FLEKSIBEL, DAN MUDAH DIATUR ULANG SESUAI KONDISI.

DENGAN MENGGABUNGKAN SDN, CLOUD COMPUTING, DAN EDGE INTELLIGENCE, SISTEM WSN DAPAT MENGELOLA RIBUAN NODE SECARA EFISIEN TANPA MENGORBANKAN KINERJA ATAU KEAMANAN JARINGAN.

V. KESIMPULAN

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan salah satu teknologi fundamental dalam ekosistem *Internet of Things* (IoT) yang terus mengalami perkembangan pesat. Melalui kajian literatur yang sistematis, penelitian ini menunjukkan bahwa WSN telah berevolusi dari sistem penginderaan sederhana menjadi infrastruktur komunikasi cerdas yang terintegrasi dengan *cloud computing*, *edge intelligence*, dan *artificial intelligence*. Perkembangan ini menjadikan WSN sebagai tulang punggung bagi sistem pemantauan, otomasi, dan pengambilan keputusan berbasis data di berbagai sektor industri, pertanian, lingkungan, dan kesehatan.

Hasil kajian menunjukkan bahwa kemajuan terbesar WSN terletak pada aspek **arsitektur jaringan dan efisiensi energi**. Desain topologi berbasis kluster, komunikasi *multi-hop*, serta penggunaan protokol hemat energi seperti LEACH dan PEGASIS telah terbukti memperpanjang umur jaringan secara signifikan. Integrasi teknologi kecerdasan buatan dan *machine learning* juga membuka peluang baru dalam optimalisasi konsumsi daya melalui sistem prediktif dan adaptif. Di sisi lain, konsep *energy harvesting* menjadi solusi potensial untuk meningkatkan keberlanjutan sistem dengan memanfaatkan energi lingkungan sebagai sumber daya tambahan.

Namun, di balik kemajuan tersebut, WSN masih menghadapi sejumlah tantangan kompleks yang menghambat penerapannya secara luas. Keterbatasan energi, keandalan komunikasi, serta risiko keamanan terhadap serangan seperti *Sybil attack* dan *sinkhole* masih menjadi masalah yang memerlukan perhatian serius. Selain itu, masalah **skalabilitas jaringan** muncul ketika jumlah node meningkat secara eksponensial, menyebabkan kemacetan lalu lintas data dan peningkatan latensi. Oleh karena itu, upaya peningkatan efisiensi komunikasi dan keamanan data harus terus dikembangkan melalui pendekatan multidisipliner yang mencakup aspek perangkat keras, algoritma, dan arsitektur jaringan.

Arah penelitian masa depan disarankan untuk berfokus pada **pengembangan sistem WSN adaptif dan otonom** yang mampu menyesuaikan konfigurasi berdasarkan kondisi lingkungan dan beban kerja secara real-time. Integrasi antara *Software Defined Networking* (SDN), *edge computing*, dan *AI-driven optimization* diharapkan dapat menciptakan jaringan yang lebih cerdas, efisien, dan aman. Selain itu, penggunaan teknologi *blockchain* dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan transparansi dan integritas data tanpa membebani node sensor secara berlebihan. Pendekatan kolaboratif antar node dengan konsep *federated learning* juga menjanjikan dalam membangun sistem pembelajaran terdistribusi yang hemat energi.

Secara keseluruhan, WSN memiliki potensi besar untuk menjadi pilar utama dalam mewujudkan transformasi digital di berbagai sektor. Dengan terus memperkuat penelitian pada aspek efisiensi energi, keamanan, dan adaptivitas jaringan, WSN dapat dikembangkan menjadi sistem yang lebih berkelanjutan dan handal. Hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi peneliti maupun praktisi dalam memahami arah pengembangan teknologi WSN serta mendorong inovasi baru yang mampu menjawab tantangan di era konektivitas cerdas yang semakin kompleks.

Kontribusi Penulis: Kevin Ananda Puryanto Pratama bertanggung jawab dalam penyusunan, analisis literatur, dan penulisan naskah akhir.

Pendanaan: Tidak ada sumber pendanaan yang dilaporkan.

Ucapan Terima Kasih: Penulis menyampaikan apresiasi kepada dosen pembimbing dan rekan sejawat yang telah memberikan masukan dalam proses penelitian ini.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan dalam penelitian ini.

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

REFERENSI

- [1] A. Abuarqoub et al., “Kajian tentang lingkungan cerdas berbasis Internet of Things: Wireless sensor networks, smart homes, dan smart cities,” **International Journal of Distributed Sensor Networks**, vol. 13, no. 10, 2017.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: A survey,” **Computer Networks**, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [3] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, “Routing techniques in wireless sensor networks: A survey,” **IEEE Wireless Communications**, vol. 11, no. 6, pp. 6–28, 2004.
- [4] N. A. Alrajeh, S. Khan, and B. Shams, “Intrusion detection systems in wireless sensor networks: A survey,” **International Journal of Distributed Sensor Networks**, vol. 9, no. 5, 2013.
- [5] S. Ali, T. Al Balushi, Z. Nadir, and O. K. Hussain, “Improving the resilience of wireless sensor networks against security threats: A survey and open research issues,” **International Journal of Technology**, vol. 9, no. 4, pp. 828–839, 2018.
- [6] T. Arampatzis, J. Lygeros, and S. Manesis, “A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks,” **IEEE Intelligent Control Symposium**, pp. 719–724, 2005.
- [7] S. Bandyopadhyay and E. J. Coyle, “An energy-efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks,” **IEEE INFOCOM Proceedings**, vol. 3, pp. 1713–1723, 2003.
- [8] C. Y. Chong and S. P. Kumar, “Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges,” **Proceedings of the IEEE**, vol. 91, no. 8, pp. 1247–1256, 2003.
- [9] W. Dargie and C. Poellabauer, **Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice**, Wiley, 2010.
- [10] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks,” **Hawaii International Conference on System Sciences**, 2000.
- [11] J. Jiang and G. Han, “Secure data aggregation in wireless sensor networks: A survey,” **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, vol. 18, no. 4, pp. 2220–2243, 2016.
- [12] A. Kamal and R. Aravind, “A review on energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks,” **International Journal of Computer Applications**, vol. 182, no. 15, pp. 1–7, 2019.
- [13] M. Khan, M. A. Jan, and A. Ahmad, “Energy-efficient protocols in wireless sensor networks: A review,” **Sensors**, vol. 20, no. 9, pp. 1–25, 2020.
- [14] R. Kumari and A. K. Maurya, “Wireless Sensor Network Applications: A Survey,” **International Journal of Trend in Scientific Research and Development**, vol. 4, no. 4, pp. 1758–1762, 2020.
- [15] X. Li, L. Shu, and Z. Zhou, “Energy-efficient data collection in wireless sensor networks with mobile sinks,” **IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems**, vol. 24, no. 10, pp. 1932–1943, 2013.
- [16] X. Liu and M. Ma, “On improving energy efficiency in wireless sensor networks: A comprehensive survey,” **IEEE Access**, vol. 6, pp. 59751–59777, 2018.
- [17] N. A. Pantazis, S. A. Nikolidakis, and D. D. Vergados, “Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey,” **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, vol. 15, no. 2, pp. 551–591, 2013.
- [18] T. A. M. Patuakhali, “A survey on wireless sensor networks architectural model, topology, service and security,” **Engineering International**, vol. 1, no. 1, pp. 18–26, 2013.
- [19] T. Rault, A. Bouabdallah, and Y. Challal, “Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey,” **Computer Networks**, vol. 67, pp. 104–122, 2014.
- [20] A. Razaque and K. Elleithy, “Energy-efficient cross layer design for wireless sensor networks,” **Sensors**, vol. 14, no. 3, pp. 5114–5159, 2014.
- [21] P. Rawat, K. D. Singh, and H. Chaouchi, “Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies,” **Journal of Supercomputing**, vol. 68, pp. 1–48, 2014.
- [22] F. Ren, J. Zhang, T. He, C. Lin, and S. K. Ren, “EBRP: Energy-balanced routing protocol for data gathering in wireless sensor networks,” **IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems**, vol. 22, no. 12, pp. 2108–2125, 2011.
- [23] A. H. Sial and Z. S. Sial, “Smart Wireless Sensor Networks (WSNs): A Review on Concepts, Techniques, and Applications,” **Sir Syed University Research Journal of Engineering & Technology**, 2023.
- [24] S. K. Singh, M. P. Singh, and D. K. Singh, “Routing protocols in wireless sensor networks – A survey,” **International Journal of Computer Science & Engineering Survey**, vol. 1, no. 2, pp. 63–83, 2010.
- [25] K. Sohrawy, D. Minoli, and T. Znati, **Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications**, Wiley, 2007.
- [26] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. R. Heinzelman, “A taxonomy of wireless micro-sensor network models,” **ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review**, vol. 6, no. 2, pp. 28–36, 2002.

- [27] D. N. Wategaonkar and R. Nandhini, "A survey on reliability in wireless sensor networks," **Indian Journal of Science and Technology**, vol. 9, no. 37, 2016.
- [28] J. Xu, M. Gidlund, and G. Zhang, "Energy-efficient industrial wireless sensor networks: Challenges, standards, and applications," **IEEE Industrial Electronics Magazine**, vol. 13, no. 3, pp. 28–37, 2019.
- [29] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," **Computer Networks**, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, 2008.
- [30] Y. Zhang, L. T. Yang, J. Chen, and P. Li, "A survey on energy-efficient data transmission in wireless sensor networks," **IEEE Access**, vol. 8, pp. 170013–170035, 2020.
- [31] 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," 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [32] 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, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.325.
- [33] F. P. E. Putra and N. Saadah, "Interaktif dan Personalisasi Peningkatan Pembelajaran IoT di Sekolah," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 5, no. 2, pp. 175–181, 2023, [Online].
- [34] F. P. E. Putra, D. A. M. Putra, A. Firdaus, and A. Hamzah, "Analisis Kecepatan Dan Kinerja Jaringan 5G (generasi ke 5) Pada Wilayah Perkotaan," *INFORMATICS Educ. Prof. J. Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 47, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2439.
- [35] F. Prasetyo, E. Putra, M. Riski, M. S. Yahya, and M. H. Ramadhan, "Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 5, no. 2, pp. 167–174, 2023, [Online]. Available: <https://jsisfotek.org/index.php>
- [36] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and S. N. R. Barokah, "Tinjauan Performa RouterOS Mikrotik dalam Jaringan Internet: Analisis Kinerja dan Kelayakan," 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.
- [37] F. P. Eka Putra, M. N. Arifin, K. Zulfana Imam, E. Saputra, and Sofiyullah, "Pengembangan Sistem Informasi Laboratorium Terintegrasi Sistem Akademik Menggunakan Agile Scrum," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 109–119, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.367.
- [38] T.-N. Tran, T.-L. Nguyen, and M. Vozňák, "Approaching K-Means for Multiantenna UAV Positioning in Combination With a Max-SIC-Min-Rate Framework to Enable Aerial IoT Networks," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 115157–115178, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3218799.
- [39] H. Chen, Z. Jia, N. Ma, Y. Liu, Y. Yao, and X. Qin, "Age-energy-aware trajectory planning for UAV-assisted data collection in Internet of Things," *IET Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 1177–1187, 2023, doi: 10.1049/cmu2.12603.
- [40] 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, 2023, doi: 10.1007/s11042-023-15225-z.
- [41] Narwaria, A., & Sharma, R. (2023). *Software-Defined Wireless Sensor Network (SDWSN): architectures and challenges*. Computer Communications (review / article). [ScienceDirect](#)
- [42] Tanash, R., et al. (2023). *Enhancing energy efficiency of IEEE 802.15.4 for WSNs*. Journal / Conference Article (EEE-WSN protocol). [ScienceDirect](#)
- [43] Zhou, L., et al. (2022). *Lightweight security transmission in wireless sensor networks*. Sensors (MDPI). [MDPI](#)
- [44] Mysorewala, M. F. (2022). *Review of energy harvesting techniques in wireless sensor networks*. Renewable & Sustainable Energy Reviews / survey. [ScienceDirect](#)
- [45] Ávila, B. Y. L., et al. (2025). *Energy harvesting techniques for wireless sensor networks: a systematic review*. (2025 review — fokus teknik harvesting terbaru). [ScienceDirect](#)
- [46] Mushtaq, M. U., et al. (2025). *Advances in energy harvesting for sustainable wireless sensor networks*. MDPI (review on EH-WSN challenges & trends). [MDPI](#)
- [47] Isyaku, B., et al. (2024). *Software-defined wireless sensor load-balancing routing for energy optimization*. Journal / Elsevier article (SDN + routing). [ScienceDirect](#)
- [48] Ergen, M. (2024). *Edge computing in future wireless networks: architectures and implications for WSN/IoT*. (survey / IEEE review). [ScienceDirect](#)
- [49] Anusuya, P., et al. (2024). *A comprehensive review of sensor node deployment optimization and energy considerations in WSNs*. Sensors/PMC review. [PMC](#)
- [50] Alsumayt, A., et al. (2024). *Efficient security protocols for resource-constrained WSNs: a new authentication protocol and evaluation*. (open-access article, discusses lightweight auth).

525–540, 2023, doi: 10.20473/vol10iss20236pp525-540.

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