

Tren Masa Depan Wireless Sensor Networks: Integrasi Artificial Intelligence untuk Jaringan Sensor yang Otonom dan Adaptif

Barrotut Taqiyah^{1)*} , Sri maulani²⁾ , Ilyana³⁾

^{1) 2) 3)} Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾Barqidoank@gmail.com, ²⁾nonikmaulani@gmail.com, ³⁾Doankilyana@gmail.com

Abstrak

Wireless Sensor Networks (WSN) merupakan komponen penting dalam ekosistem Internet of Things dan sistem cerdas, namun masih menghadapi keterbatasan mendasar terkait efisiensi energi, adaptivitas, skalabilitas, dan keandalan jaringan. Perkembangan Artificial Intelligence (AI) menawarkan peluang baru untuk mentransformasi WSN dari jaringan sensor konvensional menjadi jaringan yang cerdas dan otonom. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji tren masa depan WSN melalui integrasi AI dalam mendukung jaringan sensor yang otonom dan adaptif. Penelitian ini menggunakan metode tinjauan pustaka sistematis dengan analisis konseptual terhadap literatur ilmiah bereputasi yang membahas penerapan AI pada WSN, meliputi aspek arsitektur jaringan, routing, manajemen energi, keamanan, dan mekanisme otonomi. Hasil kajian menunjukkan bahwa pendekatan AI, seperti machine learning, deep learning, reinforcement learning, dan federated learning, secara signifikan meningkatkan efisiensi energi, adaptivitas jaringan, keandalan sistem, dan skalabilitas WSN. Selain itu, integrasi AI memungkinkan implementasi mekanisme self-configuration, self-optimization, self-healing, dan self-protection, yang menjadi ciri utama jaringan sensor otonom. Namun, ditemukan adanya trade-off antara peningkatan kecerdasan jaringan dan kompleksitas sistem, khususnya terkait kebutuhan komputasi dan konsumsi energi. Penelitian ini menegaskan bahwa AI merupakan elemen kunci dalam pengembangan WSN masa depan yang otonom dan adaptif. Penelitian lanjutan perlu difokuskan pada pengembangan model AI yang ringan, efisien energi, dan aman untuk mendukung implementasi WSN berskala besar.

Kata Kunci: Jaringan Sensor Nirkabel, Kecerdasan Buatan, Jaringan Otonom, Jaringan Adaptif, 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) telah menjadi salah satu teknologi kunci dalam perkembangan sistem jaringan modern dan berperan strategis dalam mendukung berbagai aplikasi kritis, seperti pemantauan lingkungan, sistem kesehatan cerdas, industri manufaktur berbasis Internet of Things (IoT), smart city, pertanian presisi, serta sistem siber-fisik[1]. WSN tersusun atas sejumlah besar node sensor berdaya rendah yang saling terhubung secara nirkabel untuk melakukan proses akuisisi, pemrosesan, dan transmisi data ke pusat pengendalian[2]. Fleksibilitas, skalabilitas, dan kemampuan deployment yang luas menjadikan WSN sebagai fondasi utama dalam ekosistem jaringan cerdas masa kini[3], [4]. Seiring dengan meningkatnya kompleksitas aplikasi dan skala jaringan, WSN menghadapi berbagai tantangan fundamental yang semakin kompleks. Tantangan tersebut meliputi keterbatasan energi node sensor, keterbatasan kapasitas komputasi dan memori, dinamika topologi jaringan, latensi komunikasi, serta isu keamanan dan keandalan data. Pendekatan konvensional dalam perancangan WSN umumnya mengandalkan algoritma deterministik atau statis, khususnya pada mekanisme routing, clustering, dan manajemen energi[5], [6], [7]. Meskipun pendekatan ini cukup efektif untuk skenario jaringan sederhana, efektivitasnya menurun secara signifikan ketika dihadapkan pada lingkungan jaringan yang dinamis, heterogen, dan berskala besar.

Perkembangan pesat IoT dan sistem cerdas menuntut WSN untuk bertransformasi dari jaringan sensor pasif menjadi jaringan sensor yang cerdas, otonom, dan adaptif[8], [9]. Dalam konteks ini, Artificial Intelligence (AI) dipandang sebagai teknologi kunci yang mampu menjawab berbagai keterbatasan WSN konvensional[10]. Integrasi AI memungkinkan WSN untuk melakukan analisis data secara cerdas, mempelajari pola lingkungan jaringan, serta mengambil keputusan secara mandiri berdasarkan kondisi aktual jaringan. Dengan demikian, WSN berbasis AI mampu mengimplementasikan konsep self-configuration, self-optimization, self-healing, dan self-protection, yang merupakan karakteristik utama jaringan generasi masa depan[11], [12]. Tren penelitian global menunjukkan

* Barrotut Taqiyah

meningkatnya adopsi teknik AI, seperti machine learning, deep learning, reinforcement learning, dan federated learning, dalam berbagai aspek WSN[13]. Teknik-teknik tersebut telah diterapkan untuk meningkatkan efisiensi routing, optimasi konsumsi energi, prediksi kegagalan node, deteksi anomali, serta peningkatan keamanan jaringan. Integrasi AI juga membuka peluang baru dalam mendukung aplikasi real-time dan mission-critical yang membutuhkan tingkat keandalan dan responsivitas tinggi[14], [15]. Oleh karena itu, AI tidak lagi dipandang sebagai komponen tambahan, melainkan sebagai elemen inti dalam arsitektur WSN masa depan[16].

Namun demikian, penerapan AI pada WSN menghadirkan tantangan tersendiri yang signifikan. Algoritma AI pada umumnya memerlukan sumber daya komputasi dan energi yang relatif besar, sedangkan node sensor memiliki keterbatasan yang sangat ketat pada aspek tersebut[17], [18]. Selain itu, overhead komunikasi yang dihasilkan oleh proses pembelajaran dan pertukaran model AI berpotensi meningkatkan konsumsi energi dan latensi jaringan. Isu keamanan dan privasi data juga menjadi semakin krusial, mengingat proses pembelajaran AI sering kali melibatkan data sensitif yang dikumpulkan oleh node sensor. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan desain AI yang ringan (lightweight), efisien energi, serta sesuai dengan karakteristik dan keterbatasan WSN[19]. Dalam literatur ilmiah terkini, berbagai penelitian telah mengkaji integrasi AI pada WSN dengan fokus pada solusi teknis tertentu. Namun, sebagian besar studi tersebut masih bersifat parsial dan terfragmentasi, serta belum memberikan gambaran komprehensif mengenai arah dan tren masa depan WSN berbasis AI. Masih terdapat kesenjangan penelitian dalam memahami bagaimana AI dapat diintegrasikan secara sistematis dan berkelanjutan untuk membangun WSN yang benar-benar otonom dan adaptif, khususnya dalam konteks arsitektur jaringan, manajemen sumber daya, dan keberlanjutan sistem[20], [21].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji tren masa depan Wireless Sensor Networks melalui integrasi Artificial Intelligence sebagai fondasi utama dalam pengembangan jaringan sensor yang otonom dan adaptif[22]. Penelitian ini menyoroti evolusi WSN dari pendekatan konvensional menuju paradigma jaringan cerdas berbasis AI, mengidentifikasi tantangan utama dalam implementasinya, serta menganalisis peluang riset yang masih terbuka. Dengan pendekatan ini, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi ilmiah yang signifikan, baik dari sisi konseptual maupun praktis, serta menjadi referensi bagi peneliti dan praktisi dalam pengembangan WSN generasi berikutnya[23], [24]. Secara keseluruhan, integrasi AI dalam WSN merupakan kebutuhan strategis untuk menjawab tuntutan aplikasi masa depan yang semakin kompleks, dinamis, dan kritis. Pemahaman yang komprehensif terhadap tren dan arah perkembangan WSN berbasis AI menjadi langkah penting dalam memastikan keberlanjutan dan relevansi teknologi ini dalam ekosistem jaringan global.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Networks (WSN) merupakan sistem jaringan yang terdiri dari node sensor berdaya rendah yang bekerja secara kolaboratif untuk melakukan penginderaan, pemrosesan, dan transmisi data melalui media nirkabel. Karakteristik utama WSN meliputi keterbatasan energi, kapasitas komputasi, dan memori, serta topologi jaringan yang dinamis[25]. Kondisi ini menuntut perancangan mekanisme jaringan yang efisien, adaptif, dan mampu beroperasi dalam jangka waktu yang panjang tanpa intervensi manusia secara intensif. Pendekatan konvensional dalam WSN umumnya mengandalkan algoritma deterministik untuk routing, clustering, dan manajemen energi. Algoritma tersebut dirancang berdasarkan asumsi lingkungan jaringan yang relatif statis dan terkontrol[26], [27], [28]. Meskipun mampu memberikan kinerja yang stabil pada skenario tertentu, pendekatan ini memiliki keterbatasan dalam menghadapi perubahan kondisi jaringan secara dinamis, seperti variasi kepadatan node, gangguan komunikasi, serta fluktuasi beban trafik. Keterbatasan ini mendorong kebutuhan akan mekanisme yang lebih cerdas dan adaptif dalam pengelolaan WSN[29].

Artificial Intelligence (AI) telah menjadi pendekatan yang semakin dominan dalam pengembangan WSN modern. Integrasi AI memungkinkan jaringan sensor untuk melakukan analisis data secara cerdas dan mengambil keputusan berbasis pembelajaran dari lingkungan jaringan. Teknik machine learning banyak digunakan untuk meningkatkan efisiensi routing dengan memilih jalur komunikasi yang optimal berdasarkan kondisi energi dan kualitas tautan[30]. Selain itu, AI juga dimanfaatkan dalam pembentukan cluster adaptif untuk menyeimbangkan beban energi antar node dan memperpanjang umur jaringan secara keseluruhan. Pendekatan deep learning mulai diterapkan dalam WSN untuk mendukung aplikasi yang membutuhkan analisis data kompleks, seperti deteksi anomali, klasifikasi pola lingkungan, dan pengenalan kejadian[31]. Meskipun menawarkan akurasi yang tinggi, penerapan deep learning pada WSN menghadapi tantangan besar terkait kebutuhan komputasi dan konsumsi energi. Oleh karena itu, berbagai studi mengusulkan penggunaan model pembelajaran yang disederhanakan atau penerapan mekanisme pemrosesan terdistribusi melalui edge computing untuk mengurangi beban pada node sensor[32]. Reinforcement learning menjadi pendekatan yang menjanjikan dalam mewujudkan WSN yang otonom dan adaptif. Melalui mekanisme trial-and-error, node sensor dapat mempelajari kebijakan optimal dalam pengambilan keputusan, seperti pemilihan rute, penjadwalan

transmisi, dan pengelolaan daya. Pendekatan ini memungkinkan WSN untuk beradaptasi terhadap perubahan kondisi jaringan secara real-time tanpa memerlukan model jaringan yang eksplisit. Namun, tantangan utama terletak pada konvergensi pembelajaran dan stabilitas kinerja dalam lingkungan jaringan yang sangat dinamis[33].

Aspek keamanan juga menjadi fokus penting dalam pengembangan WSN berbasis AI. Teknik AI dimanfaatkan untuk mendeteksi serangan jaringan, anomali perilaku node, dan pelanggaran integritas data. Pendekatan ini memberikan keunggulan dalam mendeteksi pola serangan yang kompleks dan sulit diidentifikasi oleh metode konvensional. Meskipun demikian, penerapan AI untuk keamanan WSN harus mempertimbangkan overhead komputasi dan komunikasi agar tidak mempercepat deplesi energi node sensor. Selain itu, konsep federated learning mulai diadopsi dalam WSN untuk mengatasi isu privasi dan efisiensi komunikasi[34], [35]. Melalui pendekatan ini, proses pembelajaran dilakukan secara lokal pada node sensor atau edge node, sementara hanya parameter model yang dipertukarkan. Pendekatan ini mengurangi kebutuhan transmisi data mentah dan meningkatkan perlindungan privasi, namun tetap memerlukan mekanisme koordinasi yang efisien untuk menjaga konsistensi model global[36]. Meskipun berbagai pendekatan AI telah diusulkan untuk meningkatkan kinerja WSN, sebagian besar penelitian masih berfokus pada solusi spesifik dan belum membahas integrasi AI secara holistik dalam arsitektur WSN. Masih terdapat keterbatasan dalam pemahaman mengenai trade-off antara kecerdasan jaringan, konsumsi energi, dan kompleksitas sistem. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang lebih komprehensif untuk mengidentifikasi tren masa depan WSN berbasis AI serta merumuskan arah penelitian yang berkelanjutan menuju jaringan sensor yang benar-benar otonom dan adaptif[37].

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian sistematis dan analisis konseptual untuk mengidentifikasi serta mengevaluasi tren masa depan Wireless Sensor Networks (WSN) melalui integrasi Artificial Intelligence (AI) dalam mewujudkan jaringan sensor yang otonom dan adaptif[38]. Metode penelitian dirancang untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai perkembangan arsitektur, teknik, serta tantangan WSN berbasis AI dengan mengacu pada praktik terbaik penelitian jaringan komputer.

1. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan utama, yaitu identifikasi ruang lingkup penelitian, pengumpulan literatur ilmiah, klasifikasi pendekatan AI dalam WSN, analisis komparatif, serta sintesis tren dan arah penelitian masa depan. Alur metodologi penelitian secara keseluruhan disajikan pada Gambar 1.



Gambar. 1 Diagram alur metodologi penelitian WSN berbasis AI

Tahap pertama dimulai dengan penentuan ruang lingkup penelitian yang difokuskan pada integrasi AI dalam WSN untuk mendukung otonomi dan adaptivitas jaringan[39]. Ruang lingkup ini mencakup aspek routing, manajemen energi, clustering, keamanan, serta arsitektur jaringan. Fokus tersebut dipilih karena merepresentasikan komponen inti yang menentukan kinerja dan keberlanjutan WSN.

2. Pengumpulan dan Seleksi Literatur

Tahap kedua melibatkan pengumpulan literatur ilmiah dari jurnal internasional bereputasi dan prosiding konferensi utama di bidang jaringan komputer dan sistem cerdas. Literatur yang dikaji difokuskan pada penelitian yang membahas penerapan AI dalam WSN, baik pada level node sensor, edge computing, maupun arsitektur jaringan secara keseluruhan. Proses seleksi literatur dilakukan secara bertahap dengan mempertimbangkan relevansi topik, kontribusi ilmiah, serta kedalaman pembahasan terhadap aspek otonomi dan adaptivitas jaringan[40], [41].

Kriteria seleksi literatur dirangkum dalam Tabel 1 untuk memastikan konsistensi dan objektivitas dalam proses kajian.

Tabel 1: Kriteria inklusi dan eksklusi literatur penelitian

Aspek	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Topik Penelitian	Membahas Wireless Sensor Networks (WSN) dan/atau integrasi Artificial Intelligence dalam jaringan sensor	Tidak berhubungan dengan WSN atau tidak melibatkan pendekatan AI
Fokus Kajian	Routing, manajemen energi, clustering, keamanan, arsitektur WSN berbasis AI	Fokus pada jaringan nirkabel umum tanpa konteks WSN
Pendekatan Metodologi	Menggunakan pendekatan AI seperti machine learning, deep learning, reinforcement learning, atau federated learning	Menggunakan metode konvensional tanpa elemen pembelajaran atau kecerdasan
Kontribusi Ilmiah	Menyajikan kontribusi konseptual, metodologis, atau evaluasi kinerja yang jelas	Tidak memiliki kontribusi ilmiah yang terdefinisi dengan baik
Kualitas Publikasi	Dipublikasikan pada jurnal internasional bereputasi atau prosiding konferensi utama	Publikasi non-ilmiah, laporan teknis informal, atau artikel populer
Ketersediaan Informasi	Teks lengkap tersedia dan dapat diakses untuk keperluan analisis	Hanya tersedia dalam bentuk abstrak atau informasi terbatas
Relevansi terhadap Otonomi Jaringan	Mendukung konsep jaringan sensor otonom dan adaptif	Tidak relevan dengan konsep otonomi dan adaptivitas jaringan

3. Klasifikasi Pendekatan AI dalam WSN

Literatur yang terpilih selanjutnya diklasifikasikan berdasarkan jenis pendekatan AI yang digunakan, seperti machine learning, deep learning, reinforcement learning, dan federated learning[42]. Selain itu, klasifikasi juga dilakukan berdasarkan fungsi jaringan yang ditingkatkan, meliputi routing, manajemen energi, deteksi anomali, dan keamanan jaringan. Proses klasifikasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola penggunaan AI serta kecenderungan penelitian pada masing-masing aspek WSN[43].

Hasil klasifikasi pendekatan AI terhadap fungsi WSN disajikan dalam Tabel 2 untuk memberikan gambaran perbandingan yang sistematis.

Tabel 2: Klasifikasi pendekatan AI dan fungsi dalam WSN

Pendekatan AI	Fungsi dalam WSN	Tujuan Utama	Karakteristik Implementasi
Machine Learning	Routing adaptif	Memilih jalur komunikasi optimal dan efisien energi	Model ringan, pembelajaran berbasis data historis jaringan
Machine Learning	Manajemen energi	Mengoptimalkan konsumsi daya dan memperpanjang umur jaringan	Prediksi penggunaan energi dan adaptasi beban node
Deep Learning	Deteksi anomali	Mengidentifikasi perilaku abnormal dan gangguan jaringan	Akurasi tinggi, kebutuhan komputasi relatif besar
Deep Learning	Klasifikasi data sensor	Meningkatkan kualitas analisis data lingkungan	Pemrosesan pola kompleks dan non-linear
Reinforcement Learning	Routing dan penjadwalan	Pengambilan keputusan adaptif berbasis interaksi lingkungan	Pembelajaran berbasis reward, adaptasi real-time
Reinforcement Learning	Clustering dinamis	Menyeimbangkan beban energi antar node	Responsif terhadap perubahan topologi jaringan
Federated Learning	Pembelajaran terdistribusi	Menjaga privasi dan mengurangi transmisi data mentah	Pertukaran parameter model, efisien komunikasi
Federated Learning	Keamanan jaringan	Deteksi serangan tanpa berbagi data sensitif	Peningkatan privasi dan keamanan sistem
Hybrid AI	Manajemen jaringan terintegrasi	Menggabungkan keunggulan berbagai teknik AI	Kompleksitas sistem lebih tinggi, fleksibilitas tinggi

4. Analisis dan Sintesis Tren

Tahap analisis dilakukan dengan membandingkan berbagai pendekatan AI berdasarkan keunggulan, keterbatasan, serta dampaknya terhadap kinerja jaringan. Analisis ini mencakup parameter utama seperti efisiensi energi, latensi komunikasi, skalabilitas, dan kompleksitas sistem. Selain itu, dilakukan evaluasi terhadap trade-off antara kecerdasan jaringan dan keterbatasan sumber daya node sensor[44], [45]. Berdasarkan hasil analisis komparatif, dilakukan sintesis untuk mengidentifikasi tren utama dan arah perkembangan WSN berbasis AI. Sintesis ini menghasilkan pemetaan tren penelitian yang menunjukkan pergeseran dari pendekatan statis menuju jaringan sensor yang semakin otonom dan adaptif[46], [47]. Pemetaan tren tersebut dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik atau diagram konseptual pada Gambar 2.



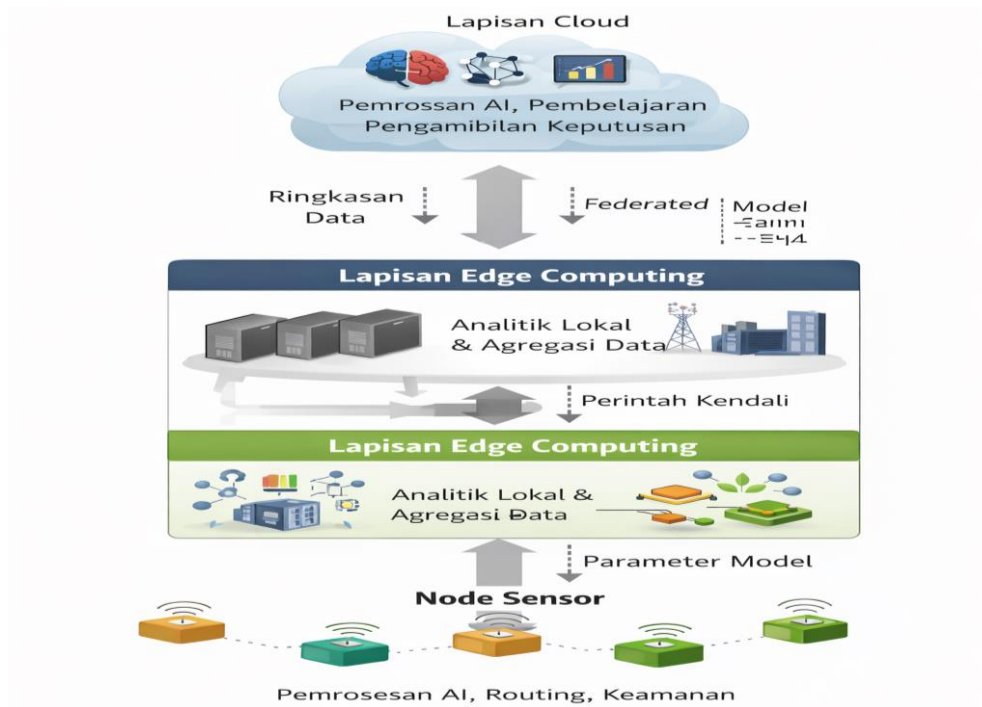
Gambar 2: Peta tren evolusi WSN berbasis AI menuju jaringan otonom

5. Validasi Konseptual

Sebagai tahap akhir, dilakukan validasi konseptual terhadap temuan penelitian dengan membandingkan hasil sintesis tren dengan kebutuhan aplikasi WSN masa depan, seperti smart city, industri cerdas, dan sistem pemantauan real-time[48], [49]. Validasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa tren dan arah penelitian yang diidentifikasi relevan dan aplikatif dalam konteks pengembangan WSN generasi berikutnya. Melalui metode penelitian ini, diharapkan diperoleh pemahaman yang sistematis dan mendalam mengenai peran AI dalam membentuk Wireless Sensor Networks yang otonom dan adaptif, serta memberikan landasan konseptual yang kuat bagi penelitian lanjutan di bidang jaringan sensor cerdas[50].

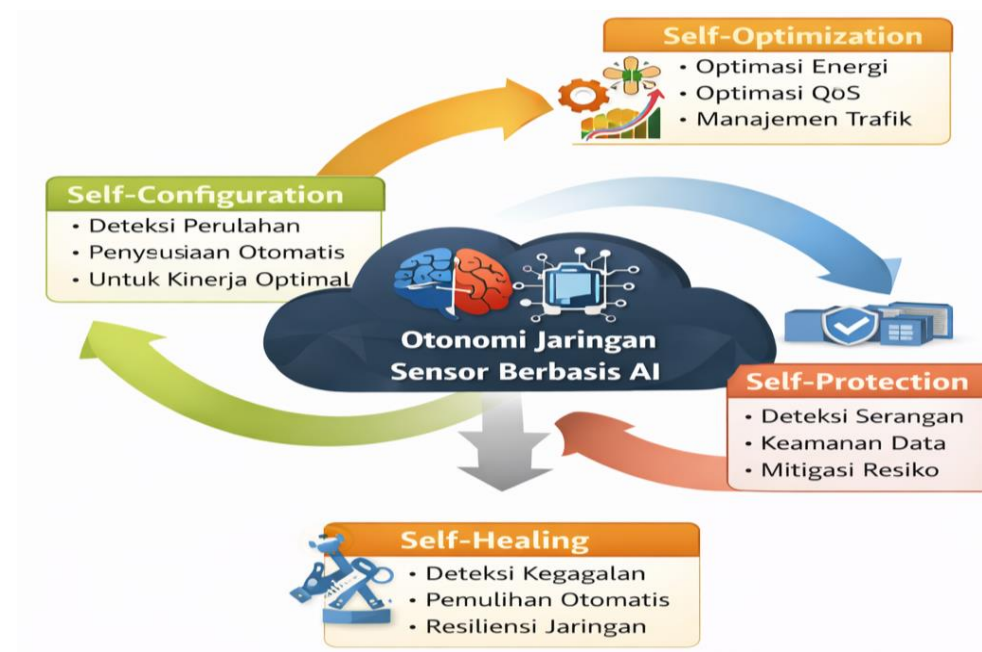
IV. HASIL

Bagian ini menyajikan hasil utama penelitian terkait integrasi Artificial Intelligence (AI) dalam Wireless Sensor Networks (WSN) untuk mewujudkan jaringan sensor yang otonom dan adaptif. Hasil diperoleh melalui analisis sistematis terhadap pendekatan AI, arsitektur jaringan, serta dampaknya terhadap kinerja WSN. Temuan penelitian menunjukkan adanya transformasi signifikan dari WSN konvensional menuju jaringan sensor cerdas yang mampu melakukan pengambilan keputusan secara mandiri. Hasil analisis arsitektural menunjukkan bahwa WSN berbasis AI umumnya mengadopsi struktur berlapis yang terdiri dari node sensor, lapisan edge computing, dan lapisan cloud. Arsitektur ini memungkinkan distribusi beban komputasi secara efisien serta mendukung penerapan algoritma AI tanpa membebani node sensor secara berlebihan. Integrasi AI pada berbagai lapisan jaringan memungkinkan pengambilan keputusan adaptif, baik pada tingkat lokal maupun global jaringan. Representasi arsitektur WSN berbasis AI ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar. 3 Arsitektur Wireless Sensor Networks Berbasis AI

Selanjutnya, hasil penelitian menunjukkan bahwa WSN berbasis AI memiliki mekanisme otonomi yang lebih matang dibandingkan pendekatan konvensional. Jaringan sensor tidak hanya mampu menyesuaikan konfigurasi awal secara otomatis, tetapi juga melakukan optimasi kinerja, pemulihan dari kegagalan node, serta perlindungan terhadap ancaman keamanan secara adaptif. Mekanisme ini merupakan fondasi utama dalam pengembangan jaringan sensor otonom. Peta mekanisme otonomi WSN berbasis AI disajikan pada Gambar 4.



Gambar. 4 Mekanisme Otonomi WSN Berbasis Artificial Intelligence

Dari sisi kinerja jaringan, hasil perbandingan antara WSN konvensional dan WSN berbasis AI menunjukkan peningkatan yang signifikan pada berbagai parameter utama. WSN berbasis AI mampu meningkatkan efisiensi energi melalui routing adaptif dan manajemen daya berbasis pembelajaran. Selain itu, jaringan menjadi lebih skalabel dan tangguh terhadap gangguan, sehingga mampu mendukung aplikasi real-time dan mission-critical. Ringkasan perbandingan kinerja tersebut disajikan pada Tabel 3.

Tabel. 3 Perbandingan Kinerja WSN Konvensional dan WSN Berbasis AI

Parameter Kinerja	WSN Konvensional	WSN Berbasis AI
Mekanisme pengambilan keputusan	Statis, berbasis aturan	Adaptif, berbasis pembelajaran
Routing jaringan	Jalur tetap	Jalur dinamis dan adaptif
Efisiensi energi	Rendah–menengah	Tinggi
Skalabilitas	Terbatas pada skala tertentu	Tinggi dan fleksibel
Kemampuan adaptasi	Rendah	Sangat tinggi
Ketahanan terhadap kegagalan	Terbatas	Tinggi (self-healing)
Manajemen trafik	Reaktif	Proaktif dan prediktif
Keamanan jaringan	Berbasis mekanisme konvensional	Adaptif dan berbasis deteksi cerdas
Dukungan aplikasi real-time	Terbatas	Optimal
Tingkat otonomi	Rendah	Tinggi (self-* mechanisms)

Hasil penelitian juga mengungkap bahwa setiap pendekatan AI memberikan dampak yang berbeda terhadap parameter kinerja WSN. Machine learning dan reinforcement learning cenderung memberikan keseimbangan yang baik antara efisiensi energi dan latensi, sehingga cocok diterapkan pada node sensor dengan keterbatasan sumber daya. Deep learning menunjukkan keunggulan dalam keandalan dan akurasi analisis data, namun dengan kompleksitas sistem yang lebih tinggi. Federated learning memberikan kontribusi signifikan dalam menjaga privasi data dan mengurangi overhead komunikasi. Evaluasi dampak pendekatan AI terhadap parameter kinerja WSN dirangkum dalam Tabel 4.

Tabel. 4 Dampak Pendekatan AI terhadap Parameter Kinerja WSN

Pendekatan AI	Efisiensi Energi	Latensi Jaringan	Keandalan Sistem	Skalabilitas	Kompleksitas Implementasi
Machine Learning	Tinggi	Rendah	Tinggi	Tinggi	Rendah
Deep Learning	Sedang	Sedang	Sangat tinggi	Sedang	Tinggi
Reinforcement Learning	Tinggi	Rendah	Tinggi	Tinggi	Sedang
Federated Learning	Tinggi	Sedang	Tinggi	Tinggi	Sedang
Hybrid AI	Sangat tinggi	Rendah	Sangat tinggi	Sangat tinggi	Tinggi

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan adanya tren yang jelas menuju WSN berbasis AI yang otonom dan adaptif. Evolusi ini ditandai dengan pergeseran dari algoritma statis menuju mekanisme pembelajaran cerdas, serta peningkatan peran AI sebagai komponen inti dalam arsitektur jaringan. Namun demikian, hasil juga menegaskan adanya trade-off antara peningkatan kecerdasan jaringan dan kompleksitas sistem, khususnya terkait konsumsi energi dan kebutuhan komputasi. Temuan-temuan ini menegaskan bahwa integrasi AI tidak hanya meningkatkan kinerja WSN, tetapi juga membuka peluang baru dalam pengembangan jaringan sensor masa depan yang lebih mandiri, efisien, dan andal. Hasil penelitian ini menjadi dasar penting untuk pembahasan lebih lanjut mengenai implikasi teknis, tantangan implementasi, serta arah penelitian lanjutan dalam pengembangan Wireless Sensor Networks berbasis Artificial Intelligence.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi Artificial Intelligence (AI) dalam Wireless Sensor Networks (WSN) telah membawa perubahan paradigma yang signifikan dalam pengelolaan dan kinerja jaringan sensor. Pergeseran dari pendekatan konvensional menuju WSN berbasis AI memungkinkan jaringan untuk beroperasi secara lebih adaptif, efisien, dan mandiri. Temuan ini menguatkan posisi AI sebagai komponen inti dalam pengembangan WSN generasi masa depan, khususnya dalam menghadapi tuntutan aplikasi yang semakin kompleks dan dinamis. Secara arsitektural, WSN berbasis AI menunjukkan keunggulan dalam hal distribusi fungsi dan pengambilan keputusan. Pemanfaatan lapisan edge computing memungkinkan proses analitik dan pembelajaran dilakukan lebih dekat dengan sumber data, sehingga mengurangi latensi dan overhead komunikasi ke pusat pengolahan. Hal ini sangat penting dalam konteks aplikasi real-time dan mission-critical, di mana respons sistem yang cepat dan andal menjadi kebutuhan utama. Selain itu, pendekatan ini juga membantu mengatasi keterbatasan sumber daya pada node sensor dengan membagi beban komputasi secara lebih efisien.

Dari sisi mekanisme otonomi, hasil penelitian menegaskan bahwa WSN berbasis AI mampu mengimplementasikan fungsi self-configuration, self-optimization, self-healing, dan self-protection secara terintegrasi. Mekanisme ini memungkinkan jaringan untuk menyesuaikan diri terhadap perubahan lingkungan, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, serta mempertahankan kinerja jaringan meskipun terjadi gangguan atau kegagalan node. Dengan demikian, WSN berbasis AI memiliki tingkat ketahanan dan keberlanjutan yang lebih tinggi dibandingkan WSN konvensional.

Pembahasan lebih lanjut terhadap temuan penelitian dapat dirangkum dalam beberapa poin utama berikut.

1. Efisiensi dan adaptivitas jaringan
Pendekatan AI, khususnya machine learning dan reinforcement learning, terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi dan adaptivitas jaringan. Mekanisme pembelajaran memungkinkan jaringan untuk menyesuaikan strategi routing dan manajemen energi secara dinamis, sehingga memperpanjang umur jaringan dan meningkatkan kualitas layanan.
2. Trade-off antara kecerdasan dan kompleksitas system
Meskipun AI memberikan peningkatan kinerja yang signifikan, hasil penelitian juga menunjukkan adanya trade-off antara tingkat kecerdasan jaringan dan kompleksitas implementasi. Pendekatan deep learning dan hybrid AI menawarkan keandalan tinggi, namun memerlukan sumber daya komputasi yang lebih besar. Hal ini menuntut perancangan model AI yang efisien dan sesuai dengan karakteristik WSN.
3. Arah pengembangan WSN masa depan
Tren evolusi WSN mengarah pada jaringan sensor yang sepenuhnya otonom dan adaptif. Integrasi AI secara holistik, didukung oleh edge computing dan pembelajaran terdistribusi, menjadi kunci dalam mewujudkan visi tersebut. Penelitian lanjutan perlu difokuskan pada pengembangan arsitektur dan algoritma AI yang ringan, aman, dan berkelanjutan untuk mendukung implementasi WSN pada skala besar.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menegaskan bahwa WSN berbasis AI merupakan solusi strategis dalam menghadapi tantangan jaringan sensor masa depan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kinerja jaringan, tetapi juga membuka peluang baru dalam pengembangan sistem jaringan cerdas yang lebih mandiri dan resilien.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji tren masa depan Wireless Sensor Networks (WSN) melalui integrasi Artificial Intelligence (AI) sebagai pendekatan utama dalam mewujudkan jaringan sensor yang otonom dan adaptif. Hasil kajian menunjukkan bahwa penerapan AI memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan kinerja WSN, khususnya dalam aspek efisiensi energi, adaptivitas jaringan, keandalan sistem, dan skalabilitas. Pergeseran dari algoritma konvensional menuju mekanisme berbasis pembelajaran memungkinkan jaringan sensor untuk mengambil keputusan secara mandiri berdasarkan kondisi lingkungan jaringan yang dinamis. Integrasi AI dalam WSN juga mendorong perubahan arsitektur jaringan, dengan pemanfaatan edge computing dan pembelajaran terdistribusi untuk mengatasi keterbatasan sumber daya node sensor. Mekanisme otonomi yang dihasilkan, seperti self-configuration, self-optimization, self-healing, dan self-protection, menjadikan WSN lebih tangguh dan berkelanjutan dalam mendukung aplikasi kritis dan real-time. Temuan ini menegaskan bahwa AI bukan sekadar teknologi pendukung, melainkan elemen inti dalam pengembangan WSN generasi berikutnya.

Meskipun demikian, penelitian ini juga mengidentifikasi adanya trade-off antara peningkatan kecerdasan jaringan dan kompleksitas sistem. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu difokuskan pada pengembangan model AI yang ringan, efisien energi, dan aman. Secara keseluruhan, WSN berbasis AI memiliki potensi besar sebagai fondasi jaringan sensor masa depan yang cerdas, mandiri, dan adaptif.

Kontribusi Penulis: Barrotut Taqiyah: berperan dalam perancangan konsep dan metodologi penelitian, penulisan naskah, serta penyuntingan dan supervisi keseluruhan penelitian. **Sri Maulani:** berkontribusi dalam pengumpulan dan analisis literatur, penyusunan tabel, serta visualisasi hasil penelitian. **Ilyana:** berperan dalam analisis konseptual, validasi isi penelitian, serta peninjauan teknis naskah.

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

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

Penulis Pertama: https: -

Penulis Kedua: https: -

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] Y. Y. Ghadi *et al.*, "Machine Learning Solutions for the Security of Wireless Sensor Networks: A Review," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 12699–12719, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3355312.
- [2] S. Handayani and N. Mutiara, "Transformasi Perpustakaan Berbasis Inklusi Sosial UPT Perpustakaan Proklamator Bung Karno Dalam Meningkatkan Kesejahteraan Masyarakat," *Otonomi*, vol. 25, no. April, pp. 22–30, 2025, [Online]. Available: http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- [3] Saherimiko, *Optimalisasi fungsi Dewan Perwakilan Rakyat Daerah (DPRD) dalam penyelenggaraan otonomi daerah*. books.google.com, 2022. [Online]. Available: https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=IX3EEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=jaringan+otonom&ots=GGp2_RhC07&sig=OPRW5A1mXuo2lAsSukGjqUIzVcQ
- [4] E. Kaukili, "Perancangan Game Pembelajaran Jaringan Komputer Untuk Meningkatkan Pemahaman Pemula," *IJITECH Indones. J. Inf. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 8–11, 2025, doi: 10.71155/ift5vy25.
- [5] P. Sharma and A. K. Singh, "A survey on RF energy harvesting techniques for lifetime enhancement of wireless sensor networks," *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 37, 2023, doi: 10.1016/j.suscom.2022.100836.
- [6] M. E. Al-Sadoon, A. Jedidi, and H. Al-Raweshidy, "Dual-Tier Cluster-Based Routing in Mobile Wireless Sensor Network for IoT Application," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 4079–4094, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3235200.
- [7] 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>
- [8] G. Tabella, D. Ciunzo, N. Paltrinieri, and P. S. Rossi, "Bayesian Fault Detection and Localization Through Wireless Sensor Networks in Industrial Plants," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 8, pp. 13231–13246, 2024, doi: 10.1109/IJOT.2024.3359646.
- [9] Muhammad Rizqi Afandi, Ardiansyah, and Kamdani, "Otonomi Daerah sebuah Kajian Literature Review," *J. Lit. Rev.*, vol. 1, no. 1, pp. 211–217, 2025, doi: 10.63822/e50m4s79.
- [10] J. F. Bonnefon, I. Rahwan, and A. Shariff, "The Moral Psychology of Artificial Intelligence," 2024, *annualreviews.org*. doi: 10.1146/annurev-psych-030123-113559.
- [11] E. Aminah and N. Naziyah, "Analisis Asuhan Keperawatan Intervensi Cadexomer Iodine Powder dan Zinc Cream untuk Biofilm pada Pasien Ny. E & Ny. D Diagnosa Diabetic Foot Ulcer di Wocare Center Bogor," *J. Kreat. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 6, no. 3, pp. 1071–1083, 2023, doi: 10.33024/jkpm.v6i3.8746.
- [12] M. Maulana, S. Kakoe, and S. Puwa, "Kedudukan Self-Determination Dalam Konteks Otonomi Dan Pengakuan Identitas Kultural Masyarakat Adat Di Indonesia," *J. Huk. Bisnis*, vol. 3, no. 1, pp. 53–70, 2025, [Online]. Available: <https://e-journal.unbitago.ac.id/home/index.php/J-Kumbis/article/view/286>
- [13] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Dea Aulia Siswoyo, M. Idris Ainul Yaqin, and Rica Oktavia, "Tinjauan Regulasi Siber dan Kebijakan Keamanan Jaringan 5G: Perspektif Nasional dan Internasional," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.6141.
- [14] D. Suryadi, C. S. Octiva, T. I. Fajri, U. W. Nuryanto, and M. L. Hakim, "Optimasi Kinerja Sistem IoT Menggunakan Teknik Edge Computing," *J. Minfo Polgan*, vol. 13, no. 2, pp. 1456–1461, 2024, doi: 10.33395/jmp.v13i2.14102.
- [15] S. Rifky, "Dampak Penggunaan Artificial Intelligence Bagi Pendidikan Tinggi," *Indones. J. Multidiscip. Soc. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 37–42, 2024, doi: 10.31004/ijmst.v2i1.287.
- [16] Y. Oktavia, N. Putri, R. Ranita, and A. Apriliana, "Revitalisasi Kewenangan Pengelolaan Pertambangan Oleh Pemerintah Daerah Dalam Mengoptimalkan Pelaksanaan Otonomi Daerah di Bangka Belitung," *J. Penelit. Serambi Huk.*, vol. 16, no. 02, pp. 114–124, 2023, doi: 10.59582/sh.v16i02.789.
- [17] N. Kumar, P. Rani, V. Kumar, P. K. Verma, and D. Koundal, "TEEECH: Three-Tier Extended Energy Efficient Clustering Hierarchy Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Network," *Expert Syst. Appl.*, vol. 216, 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2022.119448.
- [18] Y. Singh and T. Walingo, "Smart Water Quality Monitoring with IoT Wireless Sensor Networks," 2024, *mdpi.com*. doi: 10.3390/s24092871.
- [19] Iriaji *et al.*, "Pengembangan Konten Terintegrasi Smart Design Media Platform Mata Kuliah Media Pembelajaran Seni dalam Sistem Pembelajaran Jaringan," *EduInovasi J. Basic Educ. Stud.*, vol. 4, no. 3, pp. 1408–1423, 2024, doi: 10.47467/edu.v4i3.4008.

- [20] F. P. Eka Putra, . S., A. Ramadhani, and . M., "Integrasi Teknologi Kuantum dan fiber Optik untuk Meningkatkan Keamanan dan Efisiensi Jaringan Masa Depan," *J. Ilm. Ilk. - Ilmu Komput. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 151–163, 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.342.
- [21] F. Soleymaani, M. A. Sandidzadeh, and A. Mirabadi, "Calibrating the train position and speed in signalling systems using balises and wireless sensor networks," *Int. J. Sens. Networks*, vol. 46, no. 2, pp. 100–113, 2024, doi: 10.1504/IJSNET.2024.141785.
- [22] V. D. Karalis, "The Integration of Artificial Intelligence into Clinical Practice," 2024, *mdpi.com*. doi: 10.3390/applbiosci3010002.
- [23] T. tama Wisnusesa, P. bashir Alamin, H. azam Bishiddqi, D. D. Yudi Putra, and R. P. Laksana, "Optimalisasi Kualitas Jaringan Mobile Berbasis 5G Untuk Mendukung Keandalan Dalam Kinerja Iot," *J. Data Anal. Information, Comput. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 124–131, 2025, doi: 10.70248/jdaics.v2i1.1818.
- [24] 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)," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.5836.
- [25] N. Meenakshi *et al.*, "Efficient Communication in Wireless Sensor Networks Using Optimized Energy Efficient Engroove Leach Clustering Protocol," *Tsinghua Sci. Technol.*, vol. 29, no. 4, pp. 985–1001, 2024, doi: 10.26599/TST.2023.9010056.
- [26] S. S. Vellela and R. Balamaniandan, "An intelligent sleep-awake energy management system for wireless sensor network," *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 16, no. 6, pp. 2714–2731, 2023, doi: 10.1007/s12083-023-01558-x.
- [27] B. Singh and P. Bharti, "Implementation of Artificial Intelligence in Agriculture: An Empirical Approach," 2024, *scholar.archive.org*. doi: 10.1109/KHI-HTC60760.2024.10482365.
- [28] T. Jabeen, I. Jabeen, H. Ashraf, N. Z. Jhanjhi, A. Yassine, and M. S. Hossain, "An Intelligent Healthcare System Using IoT in Wireless Sensor Network," 2023, *mdpi.com*. doi: 10.3390/s23115055.
- [29] S. Safiuddin and F. P. E. Putra, "Strategi Efisiensi Wireless Sensor Network (WSN)," *INFORMATICS Educ. Prof. J. Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 52, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2441.
- [30] B. Meenakshi, B. Gopi, L. Ramalingam, A. Vanathi, S. Sangeetha, and S. Murugan, "Wireless Sensor Networks for Disaster Management and Emergency Response using SVM Classifier," 2023 *2nd Int. Conf. Smart Technol. Smart Nation, SmartTechCon 2023*, pp. 647–651, 2023, doi: 10.1109/SmartTechCon57526.2023.10391435.
- [31] T. Zhao *et al.*, "Artificial intelligence for geoscience: Progress, challenges, and perspectives," 2024, *cell.com*. doi: 10.1016/j.xinn.2024.100691.
- [32] 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, 2024, doi: 10.1007/s11831-023-10039-6.
- [33] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Noviyani Dwi Saputri, Fathur Rosi, and Rohilia Loati, "Optimalisasi Infrastruktur Cloud Networking melalui Integrasi SDN, NFV, dan Multi-Cloud," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.6099.
- [34] E. Erdisna, S. R. Ningsih, F. Suryana, and D. Gusrión, "Pemanfaatan Internet Secara Efektif Sebagai Media Pembelajaran Di Panti Asuhan Putra Darul Ma'arif Al Karimiyah Padang," *J. Pengabd. Masy. Dharma Andalas*, vol. 3, no. 1, pp. 34–40, 2024, doi: 10.47233/jpmda.v3i1.1398.
- [35] Rizkie Maulana and Nurdin Nurdin, "Kajian Literatur Perbandingan Teknik Kecerdasan Komputasional : Jaringan Syaraf Tiruan Vs. Algoritma Evolusioner," 2025. doi: 10.59059/mutiara.v3i3.2366.
- [36] D. Zha *et al.*, "Data-centric Artificial Intelligence: A Survey," *ACM Comput. Surv.*, vol. 57, no. 5, 2025, doi: 10.1145/3711118.
- [37] A. Bagwari *et al.*, "An Enhanced Energy Optimization Model for Industrial Wireless Sensor Networks Using Machine Learning," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 96343–96362, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3311854.
- [38] F. P. Eka Putra, A. M. Ubaidillah Solichin, M. N. Wildanul Hakim, and M. T. Ramadhan, "Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia," *Infotek J. Inform. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 415–425, 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30559.
- [39] A. Cindy Fatika Sari, "Proyek Strategis Nasional Bernama Food Estate: Ancaman Otonomi Petani dan Keragaman Pangan Lokal di Desa Umbu Mamijuk, Sumba Tengah," *J. Pembang. Huk. Indones.*, vol. 3, no. 436, pp. 352–375, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jphi/article/view/21097>
- [40] E. J. A. H. Nasution, L. Molefe, and R. T. Utami, "Platform E-Learning Adaptif Meningkatkan Aksesibilitas bagi Berbagai Demografi Pembelajaran," *J. MENTARI Manajemen, Pendidik. dan Teknol. Inf.*, vol. 3, no. 2, pp. 177–186, 2025, doi: 10.33050/mentari.v3i2.774.
- [41] M. K. Fauzan Prasetyo Eka Putra and Muhammad Umar Mansyur, "Jaringan Komputer Untuk Pemula," 2023, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/379445302_Jaringan_Komputer_Untuk_Pemula/links/6609a87b390c214cfd2cc36c/Jaringan-Komputer-Untuk-Pemula.pdf
- [42] N. Yüksel, H. R. Böklü, H. K. Sezer, and O. E. Canyurt, "Review of artificial intelligence applications in engineering design perspective," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 118, 2023, doi: 10.1016/j.engappai.2022.105697.
- [43] A. Zein and C. Rozali, "Tren Penelitian Artificial Intelegence Dalam Pengembangan Teknologi Militer," *Spectr. Multidiscip. J.*, vol. 2, no. 1, pp. 33–39, 2025, [Online]. Available: <https://journals.sanusantara.com/index.php/spectrum/article/view/208%0Ahttps://journals.sanusantara.com/index.php/spectrum/article/download/208/164>
- [44] S. Arifin, N. P. Dewi, . U., M. N. Arifin, and F. P. E. Putra, "Aplikasi Pengolahan Data Mahasiswa Kkn Pada Universitas Madura," *Ins. Comtech Inf. Sci. Comput. Technol. J.*, vol. 8, no. 2, p. 24, 2023, doi: 10.53712/jic.v8i2.2085.
- [45] K. Finata and K. Nasution, *Analisis Kinerja Protokol Routing Open Shortest Path First (OSPF) pada Jaringan Universitas Islam Sumatera Utara*, vol. 3, no. 2, repository.uisu.ac.id, 2024, doi: 10.56211/sudo.v3i2.532.
- [46] F. P. E. Putra, F. Mu'minin, A. Nuraini, S. N. R. Barokah, and K. Khairurrozi, "Designing an Information System for Student Admissions at SMAN 1 Pademawu Using the Waterfall Method," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 1, pp. 582–591, 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.6508.
- [47] R. C. de Oliveira and R. D. de S. e. Silva, "Artificial Intelligence in Agriculture: Benefits, Challenges, and Trends," 2023, *mdpi.com*. doi: 10.3390/app13137405.
- [48] W. Shafik, "IoT-based energy harvesting and future research trends in wireless sensor networks," *Handb. Res. Network-Enabled IoT Appl. Smart City Serv.*, pp. 282–306, 2023, doi: 10.4018/979-8-3693-0744-1.ch016.
- [49] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Maktusuful Ghummah, Moh. Amrullah, and Rafli Hidayatullah, "Studi Kinerja Mesh Network untuk Penerapan Internet of Things (IoT) di Lingkungan Perkotaan," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.5895.
- [50] M. Syahdi Nasution, Muhammad Amin, and Wirda Fitriani, "Smart Sistem Iot Pemberi Pakan Ikan Dengan Menggunakan Metode Time Schedulling Berbasis Mikrokontroler," *J. Zetroem*, vol. 5, no. 2, pp. 161–164, 2023, doi: 10.36526/ztr.v5i2.3082.

