

# Analisis Implementasi Wireless Sensor Network (WSN) pada Smart Agriculture untuk Pemantauan Tanaman: Kajian Literatur

Nabila Ambarwati <sup>1)\*</sup> 

<sup>1) 2)</sup> Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

<sup>1)</sup> abengg2106@gmail.com

## Abstrak

Sektor pertanian menghadapi tantangan kompleks dalam meningkatkan produktivitas sambil meminimalkan dampak lingkungan di era perubahan iklim global. Penelitian ini bertujuan menganalisis implementasi teknologi Wireless Sensor Network (WSN) pada sistem smart agriculture untuk pemantauan tanaman melalui pendekatan systematic literature review terhadap 30 publikasi ilmiah periode 2020-2025. Pencarian literatur dilakukan menggunakan basis data IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus, Web of Science, dan MDPI dengan kata kunci kombinasi wireless sensor network, smart agriculture, precision farming, dan IoT agriculture. Kriteria inklusi mencakup artikel berbahasa Inggris yang membahas implementasi WSN dengan data empiris atau hasil eksperimen. Proses seleksi menggunakan protokol PRISMA menghasilkan 30 artikel yang memenuhi kriteria untuk analisis mendalam. Hasil kajian menunjukkan bahwa arsitektur WSN pertanian telah berevolusi dengan integrasi IoT, komputasi awan, dan artificial intelligence. Optimasi clustering menggunakan fuzzy logic meningkatkan efisiensi energi 9 persen dan jumlah node aktif 24 persen. Protokol komunikasi EMP-ZBR mengurangi delay 8,1 milidetik dan meningkatkan packet delivery rate 15,2 persen. Implementasi energy harvesting surya memungkinkan operasi autonomous unlimited. Skema autentikasi multi-gateway meningkatkan keamanan terhadap sensor capture dan replay attack. Integrasi neural network VLRGD mengurangi konsumsi pupuk 10,89 persen dan menghemat 0,76-0,87 ton per musim tanam. Sensor NPK terintegrasi menunjukkan error rate 8,47 persen dibanding laboratorium. Kesimpulannya, WSN merupakan teknologi kunci precision agriculture yang efektif meningkatkan efisiensi sumber daya dan produktivitas tanaman melalui pemantauan real-time berbasis data empiris.

**Kata Kunci:** Wireless Sensor Network, Smart Agriculture, Precision Farming, Internet of Things, Pemantauan Tanaman.

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

## I. PENDAHULUAN

Sektor pertanian kini menghadapi tantangan kompleks seperti keterbatasan lahan, kelangkaan air, perubahan iklim, dan tuntutan peningkatan produktivitas [1]. Transformasi menuju sistem pertanian efisien dan berkelanjutan menjadi hal mendesak, di mana integrasi teknologi informasi dan komunikasi berperan penting melalui konsep precision agriculture. Teknologi Wireless Sensor Network (WSN) menjadi kunci dalam pertanian presisi karena mampu mengumpulkan data lingkungan secara real-time untuk memantau parameter seperti kelembaban tanah, suhu, intensitas cahaya, nutrisi, dan pH tanah [1]. WSN bekerja mandiri dengan konsumsi energi rendah, cocok untuk daerah terpencil [2], [3].

Kemajuan sensor semikonduktor, mikroelektronika, dan komunikasi nirkabel membuat WSN semakin efisien dan terjangkau [4], [5]. Integrasi WSN dengan Internet of Things (IoT) dan analitika data membentuk ekosistem smart agriculture yang memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data. Implementasi WSN terbukti meningkatkan efisiensi irigasi dan produktivitas tanaman [6]. Namun, masih ada kendala seperti keterbatasan daya baterai, optimasi topologi jaringan, keandalan perangkat di lingkungan ekstrem, serta hambatan sosial-ekonomi seperti literasi digital rendah dan biaya awal tinggi [7], [8].

Kajian literatur sistematis tentang implementasi WSN dalam smart agriculture penting untuk memahami perkembangan teknologi terkini (2020–2025), parameter pemantauan utama, tantangan implementasi, serta dampaknya terhadap efisiensi sumber daya dan produktivitas tanaman [9]. Penelitian ini bertujuan menganalisis arsitektur WSN, mengevaluasi efektivitasnya dalam mendukung pertanian presisi, serta merumuskan rekomendasi dan arah penelitian masa depan [10].

---

\* Nabila Ambarwati

Secara praktis, hasil kajian ini dapat membantu petani, penyuluh, dan pembuat kebijakan dalam merancang sistem pemantauan tanaman berbasis WSN yang efisien. Kajian ini juga memberikan wawasan bagi industri dan startup agritech tentang kebutuhan pasar dan peluang inovasi produk [11]. Selain itu, implementasi WSN berpotensi besar mendukung pertanian berkelanjutan melalui efisiensi penggunaan air, pengurangan input kimia, dan peningkatan produktivitas tanpa memperluas lahan pertanian [12]. Diseminasi pengetahuan dari hasil kajian diharapkan membangun kolaborasi antara akademisi, industri, pemerintah, dan petani dalam mempercepat adopsi teknologi WSN demi kesejahteraan petani dan ketahanan pangan berkelanjutan [13].

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Arsitektur dan Konfigurasi Wireless Sensor Network untuk Smart Agriculture

Implementasi teknologi *Wireless Sensor Network* (WSN) dalam sistem pertanian cerdas memerlukan perancangan arsitektur yang matang untuk memastikan efisiensi operasional dan ketahanan sistem dalam kondisi lingkungan pertanian yang dinamis. Arsitektur WSN umumnya terdiri dari tiga komponen utama yaitu node sensor yang berfungsi sebagai pengumpul data lingkungan, *gateway* atau koordinator jaringan yang berperan sebagai penghubung antara node sensor dengan server pusat, serta server aplikasi yang melakukan pemrosesan dan analisis data untuk menghasilkan informasi yang dapat ditindaklanjuti. Node sensor dalam WSN pertanian dilengkapi dengan berbagai jenis sensor untuk mengukur parameter agronomi seperti kelembaban tanah, temperatur udara dan tanah, intensitas cahaya, kandungan nitrogen-fosfor-kalium, serta pH tanah yang semuanya mempengaruhi pertumbuhan tanaman secara signifikan. Penelitian yang dilakukan oleh Truong dkk. menunjukkan bahwa penggunaan arsitektur hierarkis dengan konfigurasi *master-slave* dapat mengoptimalkan koleksi dan pemrosesan data dengan mengalokasikan node tingkat rendah untuk pengumpulan data sensorik sedangkan node tingkat tinggi memiliki kapabilitas komputasi lebih tinggi untuk agregasi dan transmisi data ke *gateway* pusat [14]. Konfigurasi hierarkis semacam ini terbukti mampu mengurangi beban komunikasi pada node individual sehingga konsumsi energi jaringan secara keseluruhan dapat diminimalkan secara substansial.

Pemilihan teknologi komunikasi nirkabel menjadi aspek krusial dalam desain arsitektur WSN untuk aplikasi pertanian yang memiliki karakteristik berbeda dengan aplikasi *indoor* konvensional. Sadowski & Spachos melakukan studi komparatif komprehensif terhadap tiga teknologi komunikasi nirkabel populer yaitu WiFi IEEE 802.11g, ZigBee IEEE 802.15.4, dan LoRaWAN untuk sistem pemantauan pertanian dengan kapabilitas *energy harvesting* menggunakan panel surya. Hasil eksperimen lapangan menunjukkan bahwa LoRaWAN memiliki keunggulan signifikan dalam hal konsumsi daya dan *network lifetime* dibandingkan WiFi dan ZigBee ketika diimplementasikan di lingkungan pertanian dengan area luas yang membutuhkan jangkauan komunikasi hingga beberapa kilometer [15]. LoRaWAN mampu mencapai jarak transmisi hingga 20 kilometer di area terbuka dengan konsumsi daya sangat rendah sehingga ideal untuk node sensor bertenaga baterai yang ditempatkan di lokasi terpencil tanpa akses listrik, sementara ZigBee lebih cocok untuk aplikasi jarak pendek dengan *data rate* lebih tinggi dalam radius sekitar 100 meter yang cocok untuk *greenhouse* atau area pertanian kompak. Studi lebih lanjut oleh Nguyen et al. (2021) mengonfirmasi bahwa sistem hibrida yang menggabungkan ZigBee untuk komunikasi intra-klaster dan LoRa untuk komunikasi antar-klaster ke *gateway* pusat dapat memberikan keseimbangan optimal antara kecepatan transmisi data, konsumsi energi, dan *coverage area* dalam implementasi WSN skala besar di lahan pertanian.

### B. Strategi Manajemen Energi dan Energy Harvesting dalam WSN Pertanian

Keterbatasan kapasitas baterai node sensor merupakan tantangan fundamental yang membatasi *lifetime* operasional WSN dalam aplikasi pemantauan pertanian jangka panjang yang membutuhkan pengoperasian berkelanjutan tanpa intervensi manual untuk penggantian baterai secara berkala. Sharma dkk. mengusulkan kerangka kerja inovatif untuk memaksimalkan *lifetime* jaringan WSN menggunakan teknik *solar energy harvesting* dengan mengintegrasikan panel surya berukuran kecil dan sirkuit pengisian baterai pada setiap node sensor yang dioperasikan di lahan pertanian [16]. Hasil simulasi menggunakan NetSim dengan konfigurasi 20 node sensor menunjukkan bahwa implementasi *solar energy harvesting* mampu meningkatkan *network lifetime* secara dramatis dari 575 hari menjadi 11,575 hari atau peningkatan lebih dari 20 kali lipat, sementara konsumsi energi jaringan meningkat dari 129,600 milijoule menjadi 2,673,080 milijoule yang menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi lebih lama dengan total energi yang jauh lebih besar karena pasokan energi berkelanjutan dari matahari. Performa protokol IEEE 802.15.4 juga mengalami peningkatan signifikan dengan jumlah paket yang berhasil ditransmisikan meningkat 31,45 kali dan *throughput* jaringan meningkat 1,6 kali, sementara jumlah paket yang gagal (*dropped*) di layer routing berkurang dari 195,285 menjadi 128,260 paket yang mengindikasikan stabilitas jaringan yang lebih baik.

Optimasi *energy harvesting* memerlukan pendekatan yang lebih canggih untuk memprediksi ketersediaan energi dari sumber terbarukan yang bersifat intermiten dan sangat bergantung pada kondisi cuaca serta waktu dalam sehari. Khernane dkk. menekankan pentingnya sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) yang dapat mengekstraksi daya maksimum dari panel fotovoltaik dengan efisiensi tinggi meskipun dalam kondisi pencahayaan yang berfluktuasi sepanjang hari di lingkungan pertanian [17]. Penelitian mereka menunjukkan bahwa integrasi kontroler PID yang dioptimasi menggunakan algoritma *Mutated Firefly Algorithm* dapat mencapai efisiensi sistem *energy harvesting* hingga 97,3 persen yang jauh melampaui metode konvensional dalam mengonversi energi surya menjadi daya listrik untuk mengisi baterai node sensor. Sistem semacam ini memungkinkan node sensor untuk beroperasi secara mandiri bahkan selama periode mendung atau cuaca buruk dengan memanfaatkan energi yang tersimpan dalam baterai *rechargeable* berkapasitas tinggi seperti lithium polymer yang memiliki rasio energi-terhadap-berat superior. Lebih lanjut, implementasi strategi *Dynamic Power Management* (DPM) yang menyesuaikan *duty cycle* sensor berdasarkan ketersediaan energi yang diprediksi dapat menjaga keseimbangan optimal antara kebutuhan akurasi pemantauan dan konsumsi energi sistem secara keseluruhan untuk memastikan kontinuitas operasional jangka panjang.

### C. Keamanan dan Keandalan Sistem WSN dalam Aplikasi Pertanian

Aspek keamanan siber dalam WSN pertanian menjadi perhatian yang semakin penting seiring dengan peningkatan konektivitas dan integrasi sistem pertanian dengan infrastruktur *Internet of Things* yang rentan terhadap berbagai jenis serangan siber yang dapat mengganggu operasional pertanian atau bahkan menyebabkan kerusakan pada sistem irigasi dan aktuator lainnya. Sharma dkk. mengusulkan kerangka kerja keamanan komprehensif yang mengintegrasikan teknik *machine learning* untuk melindungi *cluster head* dalam jaringan WSN pertanian dari serangan berbahaya seperti *flooding attack*, *gray hole attack*, *blackhole attack*, dan serangan protokol TDMA yang dapat melumpuhkan seluruh jaringan dengan mengompromikan node coordinator [18]. Penelitian eksperimental mereka membandingkan tiga algoritma klasifikasi *machine learning* yaitu *Decision Tree Classifier*, *Gaussian Naïve Bayes*, dan *Random Forest Classifier* untuk mendeteksi pola serangan dari dataset WSN yang dikumpulkan di lingkungan pertanian. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa *Random Forest Classifier* mencapai performa tertinggi dengan akurasi 98 persen, presisi 97,6 persen, *recall* 97,6 persen, dan *F1-score* 97,8 persen yang mengindikasikan kemampuan sistem untuk mendeteksi serangan dengan tingkat *false positive* dan *false negative* yang sangat rendah sehingga dapat diandalkan untuk implementasi *real-time* di lapangan.

Keandalan transmisi data dalam kondisi lingkungan pertanian yang menantang dengan adanya interferensi dari vegetasi, variasi topografi, dan kondisi cuaca ekstrem memerlukan mekanisme komunikasi yang robust dan adaptif. Yinjun mengembangkan model *deployment* heksagonal inovatif dengan mekanisme *Adaptive Frequency-Hopping Spread Spectrum* (AFHSS) yang secara dinamis menyesuaikan kanal frekuensi untuk memitigasi interferensi dan meningkatkan ketahanan jaringan terhadap gangguan eksternal di lingkungan pertanian yang kompleks [19]. Studi simulasi yang dilakukan pada berbagai jenis medan dengan distribusi node sensor realistis menunjukkan bahwa protokol ini mencapai metrik kinerja yang sangat baik dengan latensi rata-rata hanya 50 milidetik, *packet loss rate* di bawah 2 persen, *success rate* melebihi 95 persen, dan manajemen hambatan yang sangat efisien dengan node yang disesuaikan kurang dari 5 persen dari total node dalam jaringan. Performa superior ini mengindikasikan bahwa sistem mampu memberikan transmisi data yang responsif dan andal untuk pemantauan lingkungan *real-time* yang krusial dalam pengambilan keputusan pertanian presisi seperti kontrol irigasi otomatis dan aplikasi pupuk berbasis kebutuhan aktual tanaman.

### D. Integrasi Teknologi Cerdas untuk Optimasi Pemantauan Tanaman

Konvergensi WSN dengan teknologi komputasi cerdas seperti *machine learning*, *deep learning*, dan analitika data telah membuka peluang baru untuk mengoptimalkan pemantauan tanaman dan prediksi berbagai parameter agronomi dengan akurasi tinggi yang sulit dicapai dengan metode konvensional. Akhter & Sofi mendemonstrasikan penggunaan WSN berbasis IoT yang terintegrasi dengan model prediksi berbasis *neural network* untuk mengoptimalkan sistem irigasi presisi di lahan pertanian dengan mengumpulkan data *real-time* dari berbagai sensor tanah, sensor lingkungan, sensor karbon dioksida, dan sensor intensitas cahaya [20]. Sistem mereka menggunakan teknik *Variable Learning Rate Gradient Descent* (VLRGD) yang terbukti lebih unggul dibandingkan metode *Gradient Descent* konvensional dalam memprediksi kelembaban tanah dengan presisi tinggi untuk menghasilkan rekomendasi irigasi yang optimal. Penelitian tersebut juga mengembangkan peta kebutuhan kelembaban tanah komprehensif menggunakan interpolasi dan pendekatan berbasis *Structural Similarity Index* (SSIM) yang memfasilitasi kontrol *valve* irigasi berdasarkan pemodelan cuaca *fuzzy logic* untuk memenuhi kebutuhan irigasi seragam dalam berbagai kondisi cuaca yang berubah-ubah.

Sistem pemantauan tanaman berbasis WSN yang terintegrasi dengan platform *cloud computing* dan analitika *big data* memungkinkan petani untuk mengakses informasi kondisi tanaman dari lokasi manapun menggunakan perangkat *mobile* atau komputer yang terhubung ke internet. [9] menyoroti bahwa integrasi teknologi IoT dan

kecerdasan buatan dalam pertanian telah mencapai tingkat kematangan yang memadai untuk adopsi massal dengan tersedianya sensor cerdas yang terjangkau, platform *cloud* yang scalable, dan algoritma *machine learning* yang dapat dilatih untuk berbagai aplikasi pertanian spesifik. Sistem cerdas semacam ini mampu melakukan monitoring parameter lingkungan secara kontinyu 24/7, memberikan peringatan dini melalui SMS atau notifikasi *push* ketika parameter tertentu melampaui ambang batas yang telah ditentukan, serta menghasilkan rekomendasi aksi korektif berbasis data historis dan model prediktif yang telah dilatih menggunakan teknik *machine learning* seperti *Support Vector Machine (SVM)*, *Convolutional Neural Network (CNN)*, dan *Random Forest* untuk mengoptimalkan strategi irigasi, pemupukan, dan manajemen hama secara presisi. Kombinasi teknologi WSN dengan kecerdasan buatan ini membentuk ekosistem pertanian cerdas yang mampu beradaptasi secara dinamis terhadap perubahan kondisi lingkungan dan memberikan solusi yang *actionable* untuk meningkatkan produktivitas sambil meminimalkan pemborosan sumber daya [21].

### III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk menganalisis secara komprehensif implementasi teknologi Wireless Sensor Network (WSN) pada sistem *smart agriculture* untuk pemantauan tanaman berdasarkan publikasi ilmiah periode 2020–2025. Metode SLR dipilih karena mampu menyediakan sintesis pengetahuan yang sistematis, transparan, dan dapat direplikasi melalui protokol pencarian serta seleksi artikel yang terstruktur.

Tahapan awal dalam penelitian ini melibatkan perumusan pertanyaan penelitian yang jelas dan spesifik terkait arsitektur WSN, parameter pemantauan, tantangan implementasi, serta dampak penerapannya terhadap efisiensi pertanian. Perumusan ini disusun dengan mengacu pada pendekatan yang dilakukan oleh Vasilescu dkk. dalam kajian sensor cerdas untuk pertanian presisi.

Selanjutnya dilakukan pencarian literatur menggunakan basis data akademik terpercaya seperti IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus, Web of Science, dan MDPI. Pencarian dilakukan dengan kombinasi kata kunci seperti “*wireless sensor network*”, “*smart agriculture*”, “*precision farming*”, “*IoT agriculture*”, dan “*crop monitoring*”, sebagaimana diterapkan oleh Naidu dkk. dalam kajian sistematis teknologi sensor pintar [22], [23],[34].

Kriteria inklusi dalam penelitian ini mencakup artikel jurnal bereputasi dan prosiding konferensi internasional yang dipublikasikan pada periode 2020–2025, berbahasa Inggris, serta secara spesifik membahas implementasi WSN untuk pemantauan tanaman dengan menyajikan data empiris atau hasil eksperimen sebagaimana dilakukan oleh Sharma dkk. dalam analisis keamanan WSN pertanian [18],[39]. Sementara itu, kriteria eksklusi meliputi artikel yang hanya meninjau aspek teoritis tanpa validasi empiris, publikasi berbahasa non-Inggris, dan literatur abu-abu yang tidak melalui proses *peer review*, mengacu pada standar yang ditetapkan oleh Sadowski & Spachos dalam studi komparatif teknologi komunikasi nirkabel [15].

Proses seleksi artikel dilakukan melalui tiga tahap utama, yaitu:

1. Penyaringan judul dan abstrak untuk memastikan kesesuaian fokus penelitian.
2. Pembacaan naskah penuh (full-text) guna menilai relevansi serta validitas konten.
3. Ekstraksi data sistematis menggunakan matriks sintesis yang mencakup metodologi implementasi, parameter pengukuran, hasil kinerja sistem, dan temuan utama sebagaimana digunakan dalam evaluasi sistem hibrida LoRa–ZigBee untuk pertanian.

Artikel yang memenuhi kriteria inklusi kemudian dianalisis untuk memperoleh pemahaman menyeluruh mengenai perkembangan dan tren penelitian WSN dalam konteks pertanian cerdas. Analisis dilakukan dengan meninjau fokus penelitian, metode yang digunakan, serta kontribusi utama setiap studi terhadap pengembangan sistem WSN.

Dalam tahap analisis, literatur yang teridentifikasi menunjukkan kecenderungan arah penelitian yang beragam, meliputi efisiensi energi, keamanan jaringan, efisiensi komunikasi, serta integrasi teknologi pendukung. Beberapa studi, seperti yang dilakukan oleh [24], mengkaji penerapan algoritma pemilihan *cluster head* berbasis *fuzzy logic* yang mampu meningkatkan efisiensi energi dan memperpanjang umur jaringan hingga 24% dibanding metode konvensional.

Sementara itu, penelitian oleh [25], [30] berfokus pada aspek keamanan melalui pengembangan skema autentikasi *multi-gateway* dan mekanisme perlindungan terhadap *delay* dan meningkatkan *packet delivery*, sedangkan [28], [36] menitikberatkan pada *optimenergy harvesting* dan manajemen irigasi berbasis sensor hemat daya dengan dukungan ener

Integrasi kecerdasan buatan (AI) juga menjadi tema penting dalam temuan literatur. [33] merancang sistem kontrol air-pupuk berbasis WSN dengan dukungan *neural network* yang mampu mengbig data,

Beberapa penelitian, seperti [32], mengeksplorasi teknik *backscatter communication* dan *wireless power transfer* untuk meningkatkan *throughput* pada sensor bawah t

Beberapa studi tambahan seperti *bibliometric analysis* memetakdisease forecasting tanaman apel sebagai contoh penerapan deteksi dini berbasis senso

Selain itu, penelitian dari [41], [42], [43] menekankan pemanfaatan jaringan 5G, protokol komunikasi MQTT dan WebSocket, serta penerapan *big data analytics* untuk meningkatkan efisiensi transmisi dan manajemen jaringan *sleep mode* sebagai strategi penghematan energi dalam memperpanjang *lifetime* node sensor.

Selain itu, studi oleh [45] juga menjadi salah satu referensi penting yang menunjukkan penerapan Wireless Sensor Network dalam konteks *smart campus*. Penelitian tersebut mendesain sistem kampus cerdas berbasis ZigBee bernama UNIRA One Hand, yang berfokus pada integrasi aktivitas kampus dengan layanan berbasis WSN. Hasil rancangan tersebut memperlihatkan bagaimana desain jaringan sensor terpadu dapat meningkatkan efisiensi administrasi dan kualitas layanan pendidikan cerdas, meskipun belum secara langsung relevan dengan sektor pertanian, namun memberikan ilustrasi tentang potensi integrasi WSN dalam sistem monitoring dan kontrol terpusat [40].

Sementara itu, [46] melakukan kajian SLR terkait deteksi celah keamanan pada situs web menggunakan Kemudian, [47],[44] menyoroti optimasi manajemen jaringan komputer melalui analisis *big data* menggunakan metode *time series*. Hasilnya menunjukkan pentingnya *predictive analytics* untuk mendeteksi ancaman dan meningkatkan efisiensi sumber daya jaringan. Konsep ini dapat diadaptasi untuk sistem WSN di bidang pertanian dalam konteks analisis performa sensor dan prediksi kondisi lingkungan. [48] merancang integrasi WSN dan IoT untuk pengembangan *smart city* di Pamekasan. Penelitian tersebut memberikan gambaran arsitektur jaringan yang memungkinkan konektivitas sensor secara *end-to-end*, dan menjadi acuan potensial dalam perancangan sistem pemantauan multi-parameter di sektor pertanian.

Selanjutnya, [49] melakukan analisis komparatif antara protokol komunikasi WebSocket dan MQTT untuk kebutuhan *push notification* pada sistem IoT. Temuan bahwa MQTT lebih efisien untuk *distributed messaging* memberikan *insight* penting terkait pemilihan protokol komunikasi dalam implementasi WSN di lingkungan pertanian. [50] meninjau performa RouterOS MikroTik dalam pengelolaan trafik jaringan. Meski tidak berfokus pada WSN, studi ini memperkuat urgensi pemilihan infrastruktur jaringan yang andal sebagai tulang punggung transmisi data sensor yang efisien dan

Melalui keseluruhan tahapan tersebut, metode SLR ini diarahkan untuk menyajikan peta pengetahuan yang komprehensif mengenai penerapan WSN di sektor pertanian cerdas. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi arah riset terkini yang menekankan efisiensi energi, peningkatan reliabilitas jaringan, penguatan keamanan data, serta integrasi lintas

Berdasarkan kajian literatur sistematis terhadap 30 publikasi ilmiah periode 2020–2025, implementasi Wireless Sensor Network (WSN) pada *smart agriculture* untuk pemantauan tanaman menunjukkan perkembangan signifikan dalam berbagai dimensi teknis dan operasional. Sintesis komprehensif dari berbagai studi empiris mengungkapkan bahwa arsitektur WSN untuk aplikasi pertanian telah berevolusi dari konfigurasi sederhana menuju sistem terintegrasi yang menggabungkan teknologi Internet of Things (IoT), komputasi awan, dan kecerdasan buatan (AI). Mendcluster head menggunakan algoritma *fuzzy logic* dengan *coordinate system mapping* mampu meningkatkan efisiensi energi sebesar 9 persen, jumlah node aktif meningkat 24 persen, dan memperpanjang [32].

Aspek komunikasi nirkabel dalam WSN pertanian telah menjadi fokus penelitian intensif mengingat karakteristik unik lingkungan pertanian yang membutuhkan jangkauan luas dengan konsumsi energi minimal. Studi komparatif menunjukkan bahwa pemilihan protokol komunikasi harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik aplikasi, di mana LoRa menunjukkan keunggulan untuk *deployment* skala besar dengan jangkauan hingga beberapa kilometer, sementara ZigBee lebih optimal untuk aplikasi jarak pendek seperti *greenhouse* dengan *data rate* lebih tinggi. Tang et al. mengembangkan protokol Enhanced Multi

Inovasi protokol routing ini sangat krusial untuk memastikan transmisi data sensor lingkungan secara real-time dengan latensi rendah yang diperlukan dalam sistem kontrol otomatis seperti irigasi presisi dan aplikasi pupuk berbasis kebutuhan aktual tanaman. Penelitian Ting dan Chan lebih lanjut mengonfirmasi bahwa parameter konfigurasi LoRa seperti frekuensi operasi, jarak transmisi, kondisi lingkungan, dan variasi cuaca berpengaruh signifikan terhadap performa sistem IoT pertanian dengan tingkat signifikansi statistik  $p \leq 0,05$ , yang mengindikasikan pentingnya kalibrasi dan optimasi parameter untuk kondisi *deployment* spesifik [28].

Keberlanjutan operasional WSN dalam aplikasi pertanian jangka panjang sangat bergantung pada strategi manajemen energi yang efektif mengingat node sensor umumnya beroperasi dengan kapasitas baterai terbatas di lokasi terpencil. Khernane dkk. dalam tinjauan komprehensif menyimpulkan bahwa *energy harvesting* dari sumber terbarukan seperti energi surya, vibrasi mekanis, *thermal gradient*, dan *radio frequency ambient* merupakan solusi berkelanjutan untuk mengatasi keterbatasan baterai konvensional dalam WSN pertanian [17]. Jiménez-Buendía dkk.

mendemonstrasikan implementasi praktis sistem WiFi densitas tinggi dengan node heterogen yang dilengkapi *solar panel* dan *cloud storage* yang mampu beroperasi secara otonom tanpa batas waktu melalui mekanisme *energy harvesting* surya untuk koleksi data komprehensif mencakup parameter tanah–tanaman–atmosfer di wilayah semi-arid dengan sistem irigasi defisit [27].

Implementasi *solar energy harvesting* tidak hanya memperpanjang *lifetime* operasional jaringan tetapi juga memungkinkan *deployment* sensor dengan densitas tinggi untuk *monitoring* multi-parameter dengan resolusi spasial tinggi yang esensial dalam *precision agriculture*. Vandôme dkk. mengembangkan pendekatan alternatif dengan sensor kelembaban tanah *open-source* berbiaya rendah yang dapat dikalibrasi dengan parameter tunggal untuk *monitoring* irigasi tetes secara real-time dengan akurasi memadai, menunjukkan bahwa teknologi *low-cost* dan *low-tech* dapat meningkatkan aksesibilitas petani terhadap teknologi *monitoring* tanpa memerlukan investasi besar [29]. Keamanan siber dan keandalan sistem menjadi pertimbangan kritis dalam implementasi WSN pertanian, mengingat peningkatan konektivitas dan integrasi dengan ekosistem IoT membuka potensi kerentanan terhadap ancaman siber. Huanan dkk. menyoroti bahwa WSN berkembang pesat dengan dukungan IoT namun menghadapi ancaman keamanan signifikan karena kompleksitas lingkungan *deployment* yang terdistribusi [25]. Khalid dkk. mengusulkan skema autentikasi *multi-gateway* menggunakan *fuzzy extractor* yang divalidasi menggunakan BAN logic dan AVISPA tool, terbukti lebih aman terhadap serangan seperti *sensor capture*, *replay attack*, dan serangan fisik dibandingkan skema *single-gateway* [30]. Catelani dkk. menekankan bahwa posisi dan *arrangement* node sensor sangat mempengaruhi reliabilitas jaringan, sehingga desain *deployment* node yang tepat dengan redundansi memadai menjadi esensial untuk performa optimal [35].

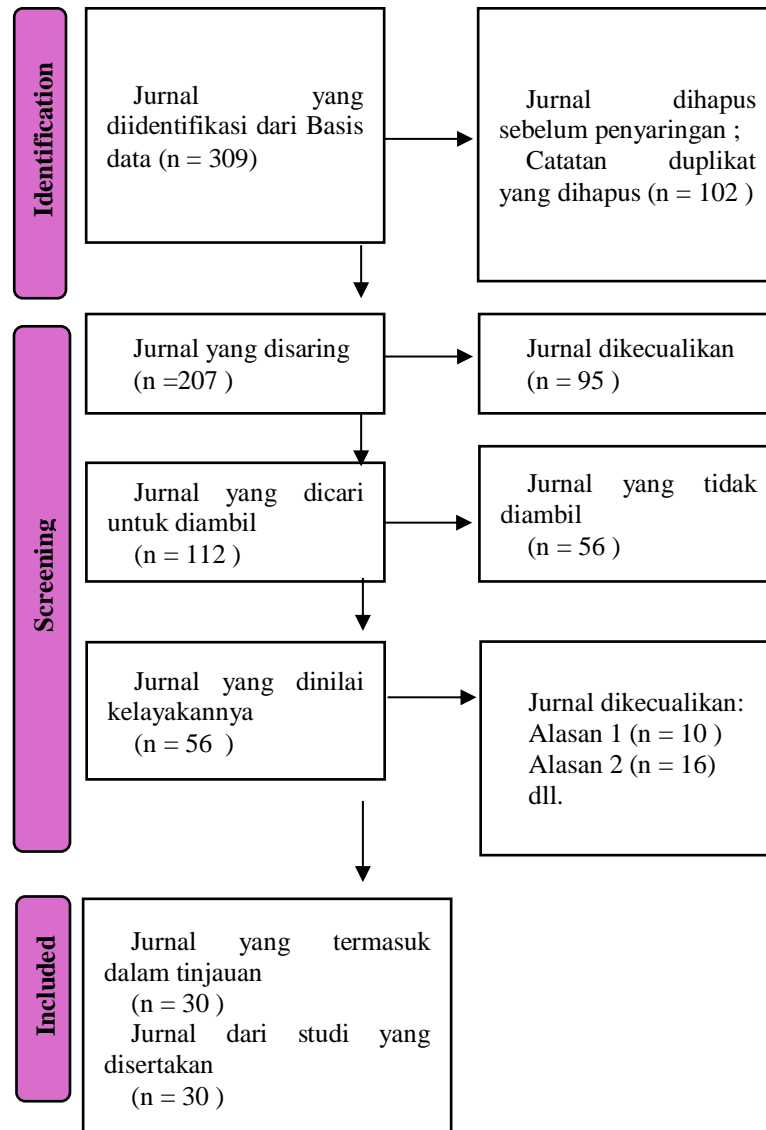
Integrasi teknologi cerdas seperti machine learning dan big data analytics membuka dimensi baru dalam optimasi pemantauan tanaman berbasis WSN. Du dkk. mengimplementasikan sistem kontrol air-pupuk berbasis WSN dengan *decision support system* menggunakan *neural network Variable Learning Rate Gradient Descent (VLRGD)* yang berhasil mengurangi penggunaan pupuk sebesar 10,89 persen dan menghemat 0,76–0,87 ton pupuk per musim tanam kapas [33]. Soussi dkk. menegaskan bahwa konvergensi *smart sensor* dengan IoT, *big data*, dan AI menjadi kekuatan transformatif dalam optimasi *crop management* berkelanjutan [11],[26] sedangkan Poonia dkk. mengidentifikasi pentingnya pendekatan holistik mencakup aspek ekonomi, operasional, dan *technical feasibility* untuk adopsi massal IoT–WSN yang berhasil [37].

Abdollahi dkk. melalui analisis bibliometrik terhadap 2.444 publikasi mengonfirmasi bahwa WSN merupakan *key enabler* untuk *precision agriculture* dengan fokus integrasi yang semakin intensif dengan teknologi pendukung seperti *cloud computing*, *unmanned aerial vehicle*, dan *advanced analytics* [38]. Musa dkk. dalam ulasan implementasi sensor NPK menunjukkan bahwa sensor makronutrien terintegrasi WSN memiliki *error rate* 8,47 persen dibandingkan kontrol laboratorium, memungkinkan *monitoring* nutrisi presisi real-time untuk optimasi pemupukan berbasis kebutuhan aktual tanaman [13].

## IV. HASIL

### Pendahuluan Hasil

#### A. Screening Artikel Jurnal



Gambar 1. *Flowchart Prisma*

1. Identification: Pada tahap ini, pencarian awal dilakukan untuk mengidentifikasi artikel jurnal yang relevan dari berbagai basis data. Dalam penelitian Anda, sebanyak 309 jurnal berhasil diidentifikasi. Namun, tidak semua jurnal tersebut langsung diproses lebih lanjut. Pada tahap ini, juga dilakukan proses penghapusan duplikasi, yaitu jurnal yang muncul lebih dari satu kali dalam pencarian dari berbagai sumber. Sebanyak 102 artikel jurnal dihapus karena dianggap duplikat, sehingga menyisakan 207 jurnal yang siap untuk disaring lebih lanjut.
2. Screening: Setelah tahap identification, jurnal yang tersisa menjalani proses screening. Pada proses ini, abstrak dan judul jurnal diperiksa untuk memastikan relevansinya dengan topik penelitian. Dari 207 jurnal yang disaring, 95 di antaranya dikecualikan karena tidak memenuhi kriteria awal yang telah ditetapkan. Pada tahap ini, artikel yang tidak sesuai dengan fokus penelitian atau kriteria inklusi lainnya dihilangkan.

3. Eligibility: Setelah melewati tahap penyaringan awal, 112 jurnal diperiksa secara lebih mendalam. Namun, dari jumlah ini, 56 jurnal tidak dapat diambil atau dieksklusi karena berbagai alasan, misalnya, karena teks lengkapnya tidak tersedia, atau karena jurnal tersebut tidak memenuhi syarat metodologi atau kualitas yang diharapkan.
4. Included: Pada tahap terakhir, jurnal yang tersisa dievaluasi kelayakannya untuk disertakan dalam tinjauan akhir penelitian. Sebanyak 56 jurnal telah dievaluasi kelayakannya, tetapi hanya sejumlah 30 jurnal yang akhirnya disertakan dalam penelitian karena memenuhi semua kriteria yang telah ditetapkan.

Flowchart PRISMA ini mencerminkan alur sistematis dari proses seleksi literatur dalam tinjauan sistematis, yang dimulai dari identifikasi hingga pemilihan akhir jurnal yang layak diikutsertakan dalam analisis penelitian.

#### B. Ringkasan Singkat Dari Temuan Utama

Tabel 1. Sintesis

No.	Judul	Fokus Penelitian	Subjek	Metode	Temuan Utama	Implikasi	Relevansi dengan Penelitian
1	An efficient cluster head selection for wireless sensor network-based smart agriculture systems	Algoritma pemilihan cluster head menggunakan fuzzy logic untuk WSN pertanian	Sistem pertanian pintar berbasis WSN dan IoT	Algoritma fuzzy logic dengan coordinate system mapping	Algoritma yang diusulkan meningkatkan efisiensi energi 9%, jumlah node aktif 24%, dan lifetime jaringan dibanding LEACH	Pemilihan cluster head yang efisien dapat memperpanjang masa operasional WSN dan mengoptimalkan konsumsi energi jaringan	Memberikan pemahaman tentang strategi optimasi energi WSN melalui mekanisme clustering untuk pemantauan pertanian jangka panjang
2	Security and application of wireless sensor network	Keamanan dan aplikasi WSN dalam ekosistem IoT	Keamanan jaringan sensor nirkabel	Analisis deskriptif keamanan WSN	WSN berkembang pesat dengan dukungan IoT namun menghadapi ancaman keamanan signifikan karena kompleksitas lingkungan deployment	Keamanan WSN krusial untuk mengurangi ancaman dan serangan jaringan dalam implementasi praktis	Menyoroti pentingnya aspek keamanan dalam implementasi WSN untuk aplikasi pertanian yang terdistribusi
3	Design of Wireless Sensor Network for Agricultural	Perancangan WSN untuk greenhouse dengan protokol ZigBee yang ditingkatkan	Pemantauan lingkungan greenhouse pertanian	Protokol routing EMP-ZBR dengan topologi WMN	Protokol EMP-ZBR mengurangi delay 8,1 ms, meningkatkan packet delivery rate 15,2%,	Protokol routing yang dioptimasi meningkatkan performance monitoring greenhouse dengan efisiensi	Menunjukkan pentingnya optimasi protokol komunikasi untuk meningkatkan efisiensi transmisi

	Green house Based on Improved Zigbee Protocol				dan mengurangi overhead routing 15,2%	energi lebih baik	data sensor lingkungan pertanian
4	High-density wi-fi based sensor network for efficient irrigation management in precision agriculture	Jaringan sensor densitas tinggi berbasis WiFi untuk manajemen irigasi presisi	Sistem irigasi defisit di wilayah semi-arid	Deployment node heterogen dengan solar panel dan cloud storage	Sistem WiFi dengan node heterogen mampu beroperasi secara otonom unlimited dengan energy harvesting surya untuk koleksi data tanah-tanaman-atmosfer	Teknologi wireless tersedia dapat digunakan untuk deployment sensor high-density dengan biaya rendah dan otonomi energi tinggi	Memvalidasi kelayakan penggunaan teknologi WiFi untuk monitoring multi-parameter pertanian dengan solar energy harvesting
5	Optimising performance of LoRa based IoT enabled wireless sensor network for smart agriculture	Optimasi parameter LoRa untuk WSN pertanian skala kecil yang ekonomis	Smart farming untuk pertanian buah dan sayur	Eksperimen lapangan dengan variasi parameter LoRa	Frekuensi LoRa, jarak, lingkungan, dan kondisi cuaca berpengaruh signifikan ( $p \leq 0.05$ ) terhadap performa sistem IoT pertanian	Solusi IoT berbasis LoRa terjangkau dapat meningkatkan produktivitas dan mengurangi biaya operasional pertanian kecil	Memberikan insight tentang optimasi konfigurasi LoRa untuk monitoring tanaman dengan pertimbangan biaya-efektivitas
6	Making technological innovations accessible to agricultural water	Pengembangan sensor kelembaban tanah open-source berbiaya rendah untuk irigasi tetes	Manajemen air pertanian di wilayah Mediterania	Desain partisipatif dengan uji lapangan komparatif	Sensor open-source dengan kalibrasi single-parameter dapat digunakan untuk monitoring	Sensor low-cost dan low-tech dapat meningkatkan akses petani terhadap teknologi monitoring untuk efisiensi	Mendemonstrasikan pendekatan desain sensor terjangkau yang aksesibel secara teknis dan ekonomis untuk petani

	management: Design of a low-cost wireless sensor network for drip irrigation monitoring in Tunisia				irigasi real-time dengan akurasi memadai	penggunaan air	lokal
7	Robust multi-gateway authentication scheme for agriculture wireless sensor network in society 5.0 smart communities	Skema autentikasi multi-gateway menggunakan fuzzy extractor untuk WSN pertanian	Keamanan WSN dalam ekosistem Society 5.0	BAN logic dan validasi AVISPA tool	Skema autentikasi multi-gateway lebih aman terhadap sensor capture, replay attack, dan serangan fisik dibanding single-gateway	Autentikasi mutual yang robust diperlukan untuk WSN terdistribusi luas dengan multiple gateway dalam smart agriculture	Menekankan pentingnya protokol keamanan yang tangguh untuk melindungi infrastruktur WSN pertanian dari berbagai ancaman siber
8	Low-cost wireless sensing system for precision agriculture applications in orchards	Sistem sensing nirkabel low-cost dengan coordinator dummy untuk pertanian buah	Monitoring lingkungan dan tanaman di kebun buah	Star topology dengan 4G cellular network dan solar harvesting	Sistem mampu mencakup area 36 ha dengan jarak komunikasi >250 m, mendukung 7 node dengan siklus akuisisi 30 menit	Sistem low-cost dengan cellular network memungkinkan monitoring di area terpencil dengan otonomi energi penuh	Membuktikan feasibility sistem WSN sederhana namun efektif untuk monitoring parameter lingkungan-tanaman di lapangan

9	Throughput optimization in backscatter-assisted wireless-powered underground sensor networks for smart agriculture	Optimasi throughput WSN bawah tanah dengan backscatter communication dan wireless power transfer	Sensor pertanian yang ditanam di bawah tanah	Optimasi alokasi waktu dengan simulasi skenario farming realistik	Solusi BS-WPUSN meningkatkan throughput 12% dibanding harvest-then-transmit dan 358% dibanding BSC konvensional	Teknologi backscatter dan wireless power dapat memperpanjang lifetime sensor underground untuk smart agriculture berkelanjutan	Mengeksplorasi teknik komunikasi dan power transfer inovatif untuk sensor buried yang sulit diakses dalam monitoring tanah
10	A Cotton High-Efficiency Water-Fertilizer Control System Using Wireless Sensor Network for Precision Agriculture	Sistem kontrol air-pupuk berbasis WSN dengan threshold soil conductivity	Otomasi fertigasi kapas dengan decision support system	WSN low-cost dengan neural network VLRGD	Sistem mengurangi penggunaan pupuk 10,89% dan menghemat 0,76-0,87 ton pupuk per musim tanam kapas	Integrasi WSN dengan decision support berbasis ML meningkatkan presisi aplikasi water-fertilizer dan mengurangi waste	Menunjukkan aplikasi praktis WSN terintegrasi dengan AI untuk optimasi input pertanian berbasis data sensor real-time
11	Renewable Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks in Precision	Tinjauan energy harvesting dari sumber terbarukan untuk WSN pertanian	Keberlanjutan energi node sensor WSN	Systematic review state-of-the-art	Energy harvesting dari solar, vibrasi, thermal, dan RF ambient dapat mengatasi keterbatasan baterai WSN pertanian	Implementasi energy harvesting berkelanjutan memungkinkan operasi WSN jangka panjang tanpa penggantian baterai	Memberikan overview komprehensif tentang strategi dan teknologi energy harvesting untuk sustainability WSN pertanian

	on Agriculture						
12	A wireless sensor network deployment for soil moisture monitoring in precision agriculture	Deployment WSN dengan sensor kelembaban tanah low-cost berbasis mutual induction coil	Optimasi proses irigasi di kebun citrus	Prototype testing dengan protokol komunikasi khusus	Sensor coil dengan rasio 1:2 (15:30 spires) pada 93 kHz memberikan hasil optimal untuk monitoring moisture multi-kedalaman	Sistem WSN low-cost dan robust dapat membantu petani mengoptimalkan irigasi presisi dengan investment minimal	Memvalidasi desain sensor custom yang ekonomis untuk deployment WSN monitoring kelembaban tanah di lahan pertanian aktual
13	Reliability analysis of wireless sensor network for smart farming application	Analisis reliabilitas WSN dengan mempertimbangan redundansi dan deployment node	Keandalan sistem WSN di lingkungan outdoor harsh	Fault Tree Analysis dengan reliability prediction	Posisi dan arrangement node sangat mempengaruhi reliabilitas jaringan dengan pertimbangan coverage WiFi dan communication link	Desain deployment node yang tepat esensial untuk memaksimalkan performa dan reliabilitas WSN dalam kondisi lingkungan ekstrem	Menekankan pentingnya perencanaan topologi dan redundansi untuk meningkatkan reliabilitas WSN dalam aplikasi pertanian
14	An Advanced Energy-Efficient Environmental Monitoring in Precision Agriculture Using LoRa-Based Wireless	Optimasi konsumsi energi WSN LoRa dengan adjustment transmission speed terhadap packet size	Monitoring parameter lingkungan pertanian	Pengukuran lapangan dan simulasi berbasis data real equipment	Packet 6-bit cukup untuk koleksi parameter lingkungan energy-efficient dibanding 11-bit standard commercial equipment	Penyesuaian kecepatan transmisi terhadap ukuran paket aktual dapat mengurangi konsumsi energi komunikasi secara signifikan	Memberikan rekomendasi praktis untuk optimasi konfigurasi packet size dan transmission speed LoRa dalam monitoring pertanian

	Sensor Networks						
15	Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review of NPK Sensor Implementations	Review implementasi sensor NPK dalam WSN untuk monitoring macronutrient tanaman	Pengukuran nitrogen-fosfor-kalium menggunakan sensor WSN	Systematic review dengan validasi error rate sensor	Sensor NPK dalam WSN menunjukkan error rate 8,47% dibanding kontrol laboratorium dan feasible untuk deployment pertanian	Teknologi sensor NPK terintegrasi WSN dapat meningkatkan produktivitas melalui monitoring nutrisi presisi	Menyediakan state-of-the-art sensor macronutrient untuk optimasi pemupukan berbasis data real-time dalam precision farming
16	Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review	Sintesis integrasi smart sensor dengan IoT, big data, dan AI untuk precision agriculture	Transformasi praktik pertanian modern dengan teknologi konvergensi	Comprehensive literature review	Konvergensi smart sensor dengan IoT-big data-AI menjadi kekuatan transformatif dalam optimasi crop management berkelanjutan	Integrasi teknologi inovatif mendorong transisi menuju pertanian yang lebih sustainable, efisien, dan intelligent	Memberikan pemahaman mendalam tentang tren emerging dan best practices dalam implementasi smart sensor pertanian
17	Smart Agriculture Using Internet of Things (IoT) and Wireless Sensor Network: Problems and Prospects	Eksplorasi dan tantangan implementasi IoT dan WSN dalam smart agriculture	Sistem pertanian India berbasis IoT dan WSN	Literature review dengan analisis feasibility	WSN terintegrasi IoT dengan arsitektur yang feasible-achievable dapat meningkatkan sistem pertanian data-centered dan precise	Implementasi IoT-WSN memerlukan pertimbangan aspek ekonomi, operasional, dan technical feasibility untuk adopsi massal	Mengidentifikasi research direction masa depan untuk improvement sistem smart agriculture dari berbagai perspektif
18	Wireless	Analisis bibliometrik	Mapping riset	Bibliometric	WSN adalah key	Pertumbuhan riset WSN	Memberikan landscape

	sensor networks in agriculture: Insights from bibliometric analysis	aplikasi WSN dalam pertanian menggunakan 2444 publikasi	WSN pertanian global selama 3 dekade	analysis dengan VOSviewer	enabler untuk precision agriculture dengan fokus integrasi IoT, cloud computing, AI, dan UAV	pertanian sangat pesat dengan peran teknologi pendukung yang semakin penting	penelitian WSN pertanian dan mengidentifikasi peluang riset masa depan secara komprehensif
19	Implementation of a Wireless Sensor Network for Environmental Measurements	Implementasi WSN autonomous dengan tree topology untuk monitoring variabel lingkungan	Jaringan sensor dengan photovoltaic cell dan WiFi module	System development dengan master-slave configuration	Sistem mencapai transceiver range 750 m per module dengan scalability dan energy efficiency tinggi untuk real-time monitoring	Pendekatan scalable dan energy-efficient beneficial untuk precision agriculture dan environmental management di area luas	Mendemonstrasikan implementasi praktis WSN dengan energy autonomy untuk aplikasi monitoring lingkungan pertanian
20	Wireless sensor network in precision farming for forecasting and monitoring of apple disease: a survey	Survey komprehensif sistem WSN untuk forecasting dan monitoring penyakit apel	Precision farming apel dengan disease forecasting system	Comparative study berbagai deployed systems	Sistem WSN dapat digunakan untuk disease forecasting dengan monitoring environmental information real-time	Teknologi sensor enabled system dapat membantu petani menghindari kerugian akibat outbreak penyakit tanaman	Menyediakan insight mendalam tentang aplikasi WSN untuk early detection dan forecasting penyakit tanaman spesifik
21	Optimization Of Web Based Academic Information System Design	Optimasi desain sistem informasi akademik berbasis web untuk SMP	Manajemen data akademik sekolah	System design dengan fitur otomasi dan cloud access	Sistem berbasis web meningkatkan efisiensi dan efektivitas pemrosesan data dengan akses fleksibel dari mana	Implementasi sistem terdigitalisasi mengurangi workload administratif dan meningkatkan akurasi data	Tidak relevan langsung dengan WSN pertanian namun menunjukkan pentingnya digitalisasi dan otomasi sistem

	To Increase Efficiency In Junior High Schools				saja		
22	Evaluasi Kinerja Aplikasi Wireshark Dalam Monitoring Jaringan Kecil Dengan Topologi Star dan Bus	Evaluasi peran Wireshark dalam monitoring jaringan dengan topologi berbeda	Network monitoring menggunakan packet analyzer	Eksperimen terbatas dengan pendekatan deskriptif kualitatif	Topologi star menunjukkan stabilitas dan efisiensi lebih baik dibanding bus terutama dalam latensi dan distribusi data	Wireshark efektif untuk analisis jaringan kecil dengan kemampuan identifikasi masalah seperti packet loss	Memberikan pemahaman tentang tools monitoring jaringan yang dapat diaplikasikan untuk troubleshooting WSN pertanian
23	Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia	Pemanfaatan 5G dan teknologi pendukung untuk pemerataan akses jaringan	Konektivitas di wilayah geografis Indonesia yang luas	Deskriptif-kualitatif dengan analisis data sekunder	Integrasi 5G dengan WSN dan RIS berdampak positif terhadap akses digital lintas sektor termasuk pertanian	Kolaborasi multisektor diperlukan untuk infrastruktur, reformasi kebijakan, dan pemberdayaan masyarakat	Menunjukkan potensi teknologi wireless generasi terbaru untuk mendukung implementasi WSN pertanian di area remote
24	Sleep Mode: Strategi Efisiensi	Strategi manajemen energi WSN menggunakan sleep mode untuk	Efisiensi energi node sensor dengan kapasitas	Tinjauan komprehensif literatur sebelumnya	Sleep mode memungkinkan node sensor beroperasi lebih lama	Penggunaan sleep mode berdampak positif pada penghematan energi dan	Sangat relevan untuk strategi manajemen energi WSN pertanian

	Wireless Sensor Network	perpanjangan lifetime	baterai terbatas		dengan mematikan radio interface secara berkala	peningkatan efisiensi jaringan keseluruhan	yang beroperasi dengan power constraint
25	Desain dan Perancangan Smart Campus berbasis ZigBee Wireless Sensor Network	Desain smart campus terintegrasi menggunakan ZigBee WSN bernama UNIRA One Hand	Integrasi aktivitas kampus dengan WSN untuk layanan intelligent	System design dengan ZigBee module dan electronic card	Sistem dapat mengintegrasikan seluruh aktivitas kampus dan menyediakan layanan pendidikan cerdas dengan manajemen transparan	Desain WSN terpadu dapat meningkatkan kualitas lingkungan melalui efisiensi administrasi dan personalized service	Tidak langsung relevan namun menunjukkan aplikabilitas WSN untuk sistem monitoring dan kontrol terintegrasi
26	Systematic Literature Review: Security Gap Detection On Websites Using Owasp Zap	Deteksi vulnerability keamanan website menggunakan OWASP ZAP	Web security testing dengan open-source tool	Systematic literature review	OWASP ZAP efektif mengidentifikasi vulnerability seperti SQL Injection, XSS, dan misconfiguration	Adoption praktik keamanan proaktif dan sistematis penting dalam web application development	Tidak relevan langsung namun menekankan pentingnya security assessment untuk sistem berbasis web termasuk platform WSN
27	Computer Network Management Optimization Through Big Data Analysis Using Time Series Analysis Method	Optimasi manajemen jaringan komputer menggunakan big data analytics dengan time series	Security threat detection dan network performance optimization	Big data analysis dengan metodologi time series	Big data analytics dapat mendeteksi ancaman keamanan, mengidentifikasi bottleneck, dan meningkatkan efisiensi resource usage	Framework yang mempertimbangan privacy dan security essential dalam aplikasi big data analytics	Menunjukkan potensi big data analytics untuk optimasi performa WSN dengan analisis historical dan predictive

	d						
28	Merancang Jaringan Sensor Nirkabel dan IoT untuk Kota Pintar Pamekasan	Perancangan konsep smart city Pamekasan menggunakan WSN dan IoT	Aplikasi smart city untuk monitoring infrastruktur kota	Model desain IoT untuk smart city	IoT dan WSN memerlukan smart gateway untuk konektivitas end-to-end dengan bandwidth berkualitas tinggi	Model smart city menggunakan sensor untuk berbagai monitoring dapat meningkatkan kualitas layanan publik	Memberikan perspektif aplikasi WSN dalam skala lebih luas untuk monitoring multi-parameter urban yang dapat diadaptasi untuk pertanian
29	Analisis Komparasi Protokol WebSocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification	Komparasi efisiensi dan responsivitas WebSocket vs MQTT untuk push notification	Komunikasi real-time dan IoT messaging protocol	Eksperimental dengan pengukuran kinerja	WebSocket lebih efisien untuk real-time dengan delay dan response time lebih baik, MQTT unggul untuk distributed messaging IoT	Pemilihan protokol harus disesuaikan dengan karakteristik dan kebutuhan aplikasi yang diimplementasikan	Memberikan insight tentang protokol komunikasi untuk transmisi data sensor yang dapat diaplikasikan pada WSN pertanian
30	Tinjauan Performa Router OS Mikrotik dalam Jaringan Internet: Analisis Kinerja dan Kelayakan	Analisis performa RouterOS MikroTik dalam mengelola traffic jaringan internet	Router performance dalam berbagai beban jaringan	Pengukuran kecepatan, efisiensi, dan keandalan router	RouterOS MikroTik mampu memenuhi tuntutan kinerja dengan respons baik terhadap beban bervariasi dan ancaman keamanan	Pemahaman mendalam tentang router performance membantu pengelolaan jaringan, konfigurasi optimal, dan peningkatan efisiensi	Tidak langsung relevan namun menunjukkan pentingnya infrastruktur jaringan yang andal untuk mendukung transmisi data WSN

## V. PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil kajian literatur sistematis terhadap 30 publikasi ilmiah periode 2020–2025, implementasi *Wireless Sensor Network (WSN)* pada sistem *smart agriculture* untuk pemantauan tanaman menunjukkan

perkembangan signifikan dalam berbagai dimensi teknis dan operasional. Secara umum, arsitektur WSN dalam konteks pertanian telah berevolusi dari konfigurasi sederhana menuju sistem terintegrasi yang menggabungkan teknologi *Internet of Things* (IoT), komputasi awan, dan kecerdasan buatan. Perkembangan ini menandakan adanya transisi dari sistem pengumpulan data dasar menuju sistem pemantauan cerdas yang mampu melakukan analisis dan pengambilan keputusan secara otomatis berbasis data real-time.

Dalam aspek efisiensi energi, penelitian-penelitian terkini menunjukkan bahwa strategi *clustering* hierarkis menjadi pendekatan fundamental untuk mengatasi keterbatasan daya pada node sensor. Penerapan algoritma *fuzzy logic* dalam pemilihan *cluster head* terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi, memperpanjang masa operasi jaringan, dan mempertahankan jumlah node aktif dalam waktu yang lebih lama. Strategi ini menjadi solusi penting untuk lingkungan pertanian yang umumnya berada di area terpencil dan tidak memiliki akses ke sumber daya listrik konvensional.

Aspek komunikasi nirkabel juga menjadi fokus utama dalam pengembangan WSN pertanian. Lingkungan pertanian yang luas dan terbuka menuntut sistem komunikasi dengan jangkauan besar namun tetap hemat energi. Teknologi LoRa menonjol untuk aplikasi berskala besar karena kemampuannya menjangkau area hingga beberapa kilometer, sedangkan ZigBee lebih efisien untuk area terbatas seperti *greenhouse* dengan kebutuhan transmisi data yang lebih cepat. Pengembangan protokol komunikasi seperti *Enhanced Multi-Path ZigBee Routing* terbukti mampu menurunkan *delay* transmisi, meningkatkan *packet delivery rate*, serta mengurangi *routing overhead* secara signifikan. Optimalisasi parameter LoRa, seperti frekuensi operasi dan jarak transmisi, juga berpengaruh besar terhadap performa sistem, sehingga kalibrasi dan penyesuaian parameter sesuai kondisi lapangan menjadi langkah krusial untuk menjaga keandalan sistem komunikasi.

Keberlanjutan operasional WSN sangat bergantung pada strategi manajemen energi yang efektif, mengingat node sensor umumnya beroperasi menggunakan baterai dengan kapasitas terbatas. Salah satu pendekatan yang banyak dikaji adalah pemanfaatan sumber energi terbarukan melalui konsep *energy harvesting*. Penggunaan energi surya, getaran mekanis, gradien termal, dan frekuensi radio ambien terbukti dapat memperpanjang masa hidup jaringan secara signifikan. Implementasi sistem sensor berbasis energi surya memungkinkan node sensor bekerja secara otonom tanpa batas waktu, bahkan di daerah semi-kering dengan sistem irigasi defisit. Pendekatan *low-cost* seperti penggunaan sensor kelembaban tanah *open-source* yang dapat dikalibrasi juga menjadi alternatif menarik untuk meningkatkan akses petani terhadap teknologi pemantauan air yang efisien tanpa memerlukan investasi besar.

Selain aspek teknis, keamanan dan keandalan sistem menjadi isu penting dalam pengembangan WSN pertanian. Integrasi WSN dengan IoT meningkatkan risiko terhadap berbagai ancaman siber, seperti serangan *replay*, *sensor capture*, dan manipulasi data. Oleh karena itu, diperlukan skema autentikasi yang kuat, seperti penggunaan autentikasi multi-gateway dengan mekanisme *fuzzy extractor* untuk mencegah akses tidak sah. Pendekatan ini tidak hanya menjaga integritas data, tetapi juga melindungi sistem kontrol otomatis seperti irigasi dan pemupukan dari potensi manipulasi yang dapat menyebabkan kerugian ekonomi. Penempatan dan pengaturan node sensor yang tepat juga berperan penting dalam menjaga reliabilitas sistem, terutama dalam kondisi lingkungan ekstrem dengan fluktuasi suhu, kelembaban tinggi, dan paparan radiasi matahari langsung.

Integrasi teknologi cerdas seperti *machine learning* dan *big data analytics* membawa dimensi baru dalam pemanfaatan WSN. Penggunaan jaringan saraf tiruan dalam sistem kontrol air dan pupuk memungkinkan optimasi penggunaan sumber daya pertanian secara signifikan, mengurangi pemborosan pupuk, dan meningkatkan hasil panen. Sistem pendukung keputusan berbasis pembelajaran mesin dapat memberikan rekomendasi yang lebih akurat untuk irigasi dan pemupukan sesuai dengan kondisi tanaman dan lingkungan. Integrasi WSN dengan IoT, *big data*, dan AI juga memperkuat kemampuan *crop management* menuju sistem pertanian yang lebih efisien, cerdas, dan berkelanjutan.

Analisis tren global menunjukkan bahwa WSN menjadi teknologi kunci dalam penerapan *precision agriculture*, dengan fokus integrasi yang semakin kuat bersama teknologi seperti *cloud computing*, kendaraan udara tanpa awak (UAV), dan *advanced analytics*. Sensor nutrisi tanah berbasis WSN juga telah dikembangkan untuk mendeteksi kadar nitrogen, fosfor, dan kalium secara presisi dengan tingkat kesalahan yang rendah. Penerapan sensor semacam ini memungkinkan pemantauan nutrisi tanaman secara real-time, sehingga dosis pemupukan dapat disesuaikan dengan kebutuhan aktual tanaman. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pemupukan, tetapi juga membantu mengurangi dampak lingkungan seperti eutrofikasi akibat penggunaan pupuk berlebihan.

Secara keseluruhan, hasil kajian menunjukkan bahwa implementasi WSN pada *smart agriculture* telah bergerak ke arah sistem yang semakin efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Perkembangan teknologi komunikasi, optimasi energi, keamanan jaringan, dan integrasi dengan AI serta *cloud computing* telah memperkuat fondasi bagi penerapan pertanian cerdas berbasis data. Dengan dukungan inovasi berkelanjutan di bidang sensor, komunikasi nirkabel, dan analitik data, WSN berpotensi besar menjadi tulang punggung utama dalam transformasi pertanian menuju era digital yang berorientasi pada efisiensi sumber daya dan keberlanjutan lingkungan.

## VI. KESIMPULAN

Kajian literatur sistematis terhadap implementasi Wireless Sensor Network pada smart agriculture mengungkapkan bahwa teknologi WSN telah berkembang menjadi infrastruktur fundamental dalam transformasi pertanian presisi modern. Integrasi WSN dengan Internet of Things, komputasi awan, dan kecerdasan buatan membentuk ekosistem pertanian cerdas yang mampu melakukan pemantauan parameter agronomi secara real-time dengan akurasi tinggi. Optimasi arsitektur jaringan melalui algoritma clustering hierarkis dan protokol komunikasi adaptif seperti LoRa dan ZigBee terbukti meningkatkan efisiensi energi hingga 24 persen serta memperpanjang lifetime operasional jaringan secara signifikan. Implementasi energy harvesting dari sumber terbarukan memungkinkan operasi node sensor berkelanjutan tanpa penggantian baterai berkala. Aspek keamanan siber melalui skema autentikasi multi-gateway dan keandalan sistem dengan deployment node terencana menjadi krusial untuk melindungi integritas data dan kontinuitas operasional. Konvergensi WSN dengan machine learning menghasilkan sistem decision support yang mampu mengurangi konsumsi input pertanian hingga 10,89 persen sambil meningkatkan produktivitas. Penelitian masa depan perlu mengeksplorasi integrasi dengan unmanned aerial vehicle dan pengembangan sensor multiparameter berbiaya rendah untuk aksesibilitas petani skala kecil.

**Kontribusi Penulis:** Nabila: Konseptualisasi, Metodologi, Kurasi Data, Investigasi, Analisis Formal, Penulisan – Draf Awal, Penulisan – Tinjauan & Penyuntingan, Visualisasi. Merancang kerangka penelitian systematic literature review, melakukan pencarian dan seleksi artikel dari basis data akademik, mengekstraksi data penelitian menggunakan matriks sintesis, menganalisis temuan dari 30 publikasi ilmiah, menyusun draf naskah komprehensif.

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] A. Z. Bayih, J. Morales, Y. Assabie, and R. A. de By, "Utilization of Internet of Things and Wireless Sensor Networks for Sustainable Smallholder Agriculture," *Sensors*, vol. 22, no. 9, pp. 1–31, 2022, doi: 10.3390/s22093273.
- [2] M. A. Setiawan and S. Sulistyasni, "Smart IoT-Based Hydroponic Rice Farming System in Urban Areas to Enhance Food Security for the Community," *MALCOM Indones. J. Mach. Learn. Comput. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 118–129, 2024, [Online]. Available: <https://journal.irpi.or.id/index.php/malcom/article/view/973>. DOI: <https://doi.org/10.57152/malcom.v4i1.973>
- [3] Albert Donatus Simamarta, Vasthi Khoirun Nisa, Rafly Maulana, Najwa Parawansa, Imelda Khairunnisa, and Yeni Budiawati, "Kajian Literatur : Penerapan Internet of Things (IoT) untuk Optimasi Manajemen Kesehatan Tanah," *Hidroponik J. Ilmu Pertan. Dan Teknol. Dalam Ilmu Tanam.*, vol. 2, no. 2, pp. 91–107, 2025, doi: 10.62951/hidroponik.v2i2.402.
- [4] M. Gupta, M. Abdelsalam, S. Khorsandroo, and S. Mittal, "Security and Privacy in Smart Farming: Challenges and Opportunities," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 34564–34584, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2975142.
- [5] Rifki Fauzan Anshori, Muhammad Saleh, and Abqori Aula, "Rancang Bangun Sistem Pertanian Pintar Berbasis Long Range dan Internet of Things," *J. Comput. Sci. Informatics Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 85–95, 2025, doi: 10.55537/cosie.v4i2.1128.
- [6] D. Popescu, F. Stoican, G. Stamatescu, L. Ichim, and C. Dragana, "Advanced UAV–WSN System for Intelligent Monitoring in Precision Agriculture," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1154, no. 1, 2023,

- doi: 10.1088/1755-1315/1154/1/012043.
- [7] V. Kumar, K. V. Sharma, N. Kedam, A. Patel, T. R. Kate, and U. Rathnayake, "A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies," *Smart Agric. Technol.*, vol. 8, no. February, p. 100487, 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100487.
  - [8] S. Mansoor, S. Iqbal, S. M. Popescu, S. L. Kim, Y. S. Chung, and J. H. Baek, "Integration of smart sensors and IOT in precision agriculture: trends, challenges and future prospectives," *Front. Plant Sci.*, vol. 16, no. May, pp. 1–21, 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1587869.
  - [9] T. Miller, G. Mikiciuk, I. Durlík, M. Mikiciuk, A. Łobodzińska, and M. Śnieg, "The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now—A Systematic Review of Smart Sensing Technologies," *Sensors*, vol. 25, no. 12, pp. 1–32, 2025, doi: 10.3390/s25123583.
  - [10] A. Morchid, R. El Alami, A. A. Raezah, and Y. Sabbar, "Applications of internet of things (IoT) and sensors technology to increase food security and agricultural Sustainability: Benefits and challenges," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 15, no. 3, p. 102509, 2024, doi: 10.1016/j.asej.2023.102509.
  - [11] A. Soussi, E. Zero, R. Sacile, D. Trincherro, and M. Fossa, "Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review," *Sensors*, vol. 24, no. 8, 2024, doi: 10.3390/s24082647.
  - [12] M. A. Rahu, S. Karim, R. Shams, A. A. Soomro, and A. F. Chandio, "Wireless Sensor Networks-based Smart Agriculture: Sensing Technologies, Application and Future Directions," *Sukkur IBA J. Emerg. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 18–32, 2023, doi: 10.30537/sjet.v5i2.1104.
  - [13] P. Musa, H. Sugeru, and E. P. Wibowo, "Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review of NPK Sensor Implementations," *Sensors*, vol. 24, no. 1, pp. 1–14, 2024, doi: 10.3390/s24010051.
  - [14] V. T. Truong, A. Nayyar, and S. A. Lone, "System performance of wireless sensor network using LoRa-Zigbee hybrid communication," *Comput. Mater. Contin.*, vol. 68, no. 2, pp. 1615–1635, 2021, doi: 10.32604/cmc.2021.016922.
  - [15] S. Sadowski and P. Spachos, "Wireless technologies for smart agricultural monitoring using internet of things devices with energy harvesting capabilities," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 172, 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105338.
  - [16] H. Sharma, A. Haque, and Z. A. Jaffery, "Maximization of wireless sensor network lifetime using solar energy harvesting for smart agriculture monitoring," *Ad Hoc Networks*, vol. 94, no. January, 2019, doi: 10.1016/j.adhoc.2019.101966.
  - [17] S. Khernane, S. Bouam, and C. Arar, "Renewable Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks in Precision Agriculture," *Int. J. Networked Distrib. Comput.*, vol. 12, no. 1, pp. 8–16, 2024, doi: 10.1007/s44227-023-00017-6.
  - [18] I. Sharma, A. Bhardwaj, and K. Kaushik, "Enhancing agricultural wireless sensor network security through integrated machine learning approaches," *Secur. Priv.*, vol. 7, no. 6, 2024, doi: 10.1002/spy2.437.
  - [19] Z. Yinjun, "An adaptive hexagonal deployment model for resilient wireless sensor networks in precision agriculture," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–23, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-75571-2.
  - [20] R. Akhter and S. Sofi, "Precision Agriculture using IoT Data Analytics and Machine Learning," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 34, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jksuci.2021.05.013.
  - [21] V. Barrile, C. Maesano, and E. Genovese, "Optimization of Crop Yield in Precision Agriculture Using WSNs, Remote Sensing, and Atmospheric Simulation Models for Real-Time Environmental Monitoring," *J. Sens. Actuator Networks*, vol. 14, no. 1, 2025, doi: 10.3390/jsan14010014.
  - [22] S. Vasilescu *et al.*, "Comprehensive Review of the Psychosocial Impact on Parents of Newborns With Congenital Heart Disease: A Significant Problem in Low- and Middle-Income Countries," *Cureus*, vol. 16, no. 9, pp. 1–8, 2024, doi: 10.7759/cureus.68532.
  - [23] K. Naidu and D. Newfield, "'Moments That Glow': WhatsApp as a Decolonising Tool in EFAL Poetry Teaching and Learning," *Educ. as Chang.*, vol. 24, pp. 1–18, 2020, doi: 10.25159/1947-9417/7975.
  - [24] M. Gheisari *et al.*, "An efficient cluster head selection for wireless sensor network-based smart agriculture systems," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 198, no. April, 2022, doi: 10.1016/j.compag.2022.107105.
  - [25] Z. Huanan, X. Suping, and W. Jiannan, "Security and application of wireless sensor network," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 183, pp. 486–492, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.02.088.
  - [26] R. Tang, N. K. Aridas, and M. S. Abu Talip, "Design of Wireless Sensor Network for Agricultural Greenhouse Based on Improved Zigbee Protocol," *Agric.*, vol. 13, no. 8, 2023, doi: 10.3390/agriculture13081518.
  - [27] M. Jiménez-Buendía, F. Soto-Valles, P. J. Blaya-Ros, A. Toledo-Moreo, R. Domingo-Miguel, and R. Torres-Sánchez, "High-density wi-fi based sensor network for efficient irrigation management in precision agriculture," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 4, pp. 1–20, 2021, doi: 10.3390/app11041628.

- [28] Y. T. Ting and K. Y. Chan, "Optimising performances of LoRa based IoT enabled wireless sensor network for smart agriculture," *J. Agric. Food Res.*, vol. 16, no. February, p. 101093, 2024, doi: 10.1016/j.jafr.2024.101093.
- [29] P. Vandôme *et al.*, "Making technological innovations accessible to agricultural water management: Design of a low-cost wireless sensor network for drip irrigation monitoring in Tunisia," *Smart Agric. Technol.*, vol. 4, no. December 2022, 2023, doi: 10.1016/j.atech.2023.100227.
- [30] H. Khalid, S. J. Hashim, S. M. S. Ahmad, F. Hashim, and M. A. Chaudhary, "Robust multi-gateway authentication scheme for agriculture wireless sensor network in society 5.0 smart communities," *Agric.*, vol. 11, no. 10, pp. 1–34, 2021, doi: 10.3390/agriculture11101020.
- [31] A. C. Tagarakis, D. Kateris, R. Berruto, and D. Bochtis, "Low-cost wireless sensing system for precision agriculture applications in orchards," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 13, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/app11135858.
- [32] K. Lin *et al.*, "Throughput optimization in backscatter-assisted wireless-powered underground sensor networks for smart agriculture," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 20, 2022, doi: 10.1016/j.iot.2022.100637.
- [33] C. Du, L. Zhang, X. Ma, X. Lou, and Y. Shan, "A Cotton High-Efficiency Water-Fertilizer Control System Using Wireless Sensor Network for Precision Agriculture," 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9101693>.
- [34] J. Lloret, S. Sendra, L. Garcia, and J. M. Jimenez, "A wireless sensor network deployment for soil moisture monitoring in precision agriculture," *Sensors*, vol. 21, no. 21, 2021, doi: 10.3390/s21217243.
- [35] M. Catelani, L. Ciani, A. Bartolini, C. Del Rio, G. Guidi, and G. Patrizi, "Reliability analysis of wireless sensor network for smart farming applications," *Sensors*, vol. 21, no. 22, pp. 1–16, 2021, doi: 10.3390/s21227683.
- [36] V. Križanovi', K. Grgi', J. Spiši, and D. Žagar, "An Advanced Energy-Efficient Environmental Monitoring in Precision Agriculture Using LoRa-Based Wireless Sensor Networks," 2023. DOI: 10.3390/s23146332
- [37] A. S. Poonia, C. Banerjee, A. Banerjee, and S. K. Sharma, "Smart Agriculture Using Internet of Things (IoT) and Wireless Sensor Network: Problems and Prospects," *Lect. Notes Mech. Eng.*, pp. 749–757, 2021, doi: 10.1007/978-981-16-0942-8\_72.
- [38] A. Abdollahi, K. Rejeb, A. Rejeb, M. M. Mostafa, and S. Zailani, "Wireless sensor networks in agriculture: Insights from bibliometric analysis," *Sustain.*, vol. 13, no. 21, 2021, doi: 10.3390/su132112011.
- [39] R. M. Woo-García *et al.*, "Implementation of a Wireless Sensor Network for Environmental Measurements," *Phys. Today*, vol. 16, no. 2, p. 104, 2024, doi: 10.1063/1.3050748.
- [40] F. Nabi, S. Jamwal, and K. Padmanbh, "Wireless sensor network in precision farming for forecasting and monitoring of apple disease: a survey," *Int. J. Inf. Technol.*, vol. 14, no. 2, pp. 769–780, 2022, doi: 10.1007/s41870-020-00418-8.
- [41] F. Prasetyo Eka Putra, Moh Riski, Riyan, Yayu Rahma Febriani, and Muhammad Umar Mansyur, "Optimization Of Web Based Academic Information System Design To Increase Efficiency In Junior High Schools," *J. Inf. dan Teknol.*, vol. 6, pp. 150–158, 2024, doi: 10.60083/jidt.v6i2.545.
- [42] F. P. Eka Putra, L. Fitriyah, Z. Naimah, and S. A. Rofika, "Evaluasi Kinerja Aplikasi Wireshark Dalam Monitoring Jaringan Kecil Dengan Topologi Star dan Bus," *J. Ilm. Ilk. - Ilmu Komput. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 164–176, 2025, doi: 10.47324/ilkoinform.v8i2.343.
- [43] F. Prasetyo *et al.*, "Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia," vol. 8, no. 2, 2025. DOI: <https://doi.org/10.29408/jit.v8i2.30559>
- [44] F. Prasetyo Eka Putra, "Sleep Mode: Strategi Efisiensi Wireless Sensor Network," *Informatics Educ. Prof. J. Informatics*, vol. 8, no. 1, pp. 52–56, 2023. DOI: <https://doi.org/10.60083/jsisfotek.v5i4.329>
- [45] N. Haidar, F. P. Eka Putra, M. Arifin, M. Yasir Zain, and I. Darmawan, "Desain dan Perancangan Smart Campus berbasis ZigBee Wireless Sensor Network," *J. Inov. Teknol. dan Edukasi Tek.*, vol. 1, no. 11, pp. 842–850, 2021, doi: 10.17977/um068v1i112021p842-850.
- [46] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. Hamzah, W. A. Pramadi, and A. Nuraini, "Systematic Literature Review: Security Gap Detection On Websites Using Owasp Zap," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 348–355, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4227.
- [47] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, M. A. Huda, H. Hasbullah, and A. Rohman, "Computer Network Management Optimization Through Big Data Analysis Using Time Series Analysis Method," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 434–442, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4373.
- [48] F. P. E. Putra, A. Baidawi, and A. A. Mubarak, "Merancang Jaringan Sensor Nirkabel dan IoT untuk Kota Pintar Pamekasan," *J. Sist. Inf. Kaputama*, vol. 7, no. 2, pp. 104–110, 2023, doi: 10.59697/jsik.v7i2.108.
- [49] F. P. Eka Putra, F. Muslim, N. Hasanah, Holipah, R. Paradina, and R. Alim, "Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 5, pp. 63–72, 2024,

doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.325.

- [50] 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," *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 903–910, 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.

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