

Peran Teknologi IoT dan WSN dalam Pengelolaan Informasi Pertanian: Sebuah Kajian Sistematis

Nirwana Haidar Hari^{1*}, Joko Prasetyo²⁾, Khoironi³⁾, Lusiana Agustien⁴⁾, Ahmad Walid Hujairi⁵⁾

^{1*,2,3,4}Departemen Teknik Informatika dan Komputer, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

⁵Departemen Teknologi Multimedia Kreatif, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

Email: ¹nhh@pens.ac.id, joko@pens.ac.id, khoironi@pens.ac.id, lusiana@pens.ac.id, walid@pens.ac.id

Abstrak

Permintaan global terhadap pertanian yang efisien dan berkelanjutan telah mendorong adopsi teknologi Jaringan Sensor Nirkabel (Wireless Sensor Networks/WSN) dan Internet of Things (IoT). Artikel ini menyajikan tinjauan sistematis terhadap protokol routing dalam WSN untuk aplikasi pertanian cerdas berbasis IoT. Metodologi yang digunakan adalah PRISMA, dengan menganalisis 33 artikel dari basis data terkemuka seperti IEEE Xplore dan Scopus. Hasil kajian menunjukkan bahwa protokol seperti LEACH dan variannya, termasuk pendekatan berbasis heuristik, dapat meningkatkan efisiensi energi hingga 40%. Integrasi WSN dan IoT juga memungkinkan otomatisasi irigasi dan pengambilan keputusan berbasis data real-time, yang berkontribusi pada pengurangan konsumsi air hingga 30%. Meskipun demikian, tantangan seperti keterbatasan konektivitas dan isu keamanan data masih menjadi hambatan signifikan. Tinjauan ini menegaskan potensi besar pemanfaatan WSN dan IoT dalam merevolusi praktik pertanian tradisional, serta perlunya penelitian lanjutan untuk mengatasi keterbatasan infrastruktur dan daya komputasi di lingkungan pertanian.

Kata kunci: Wireless Sensor Networks (WSN), Internet of Things (IoT), Protokol Routing, Efisiensi Energi, Pertanian Cerdas.

Abstract

The global demand for more efficient and sustainable agriculture has driven the adoption of Wireless Sensor Networks (WSNs) and the Internet of Things (IoT). This article presents a systematic review of routing protocols in WSNs for IoT-based smart agriculture applications. The study follows the PRISMA methodology and analyzes 33 articles from leading databases such as IEEE Xplore and Scopus. The results indicate that protocols like LEACH and its variants, including heuristic-based algorithms, can improve energy efficiency by up to 40%. The integration of WSN and IoT enables automated irrigation and real-time data-driven decision-making, reducing water consumption by up to 30%. However, challenges such as limited connectivity and data security remain significant barriers. This review highlights the substantial potential of WSN and IoT technologies in transforming traditional agricultural practices and emphasizes the need for further research to address infrastructure and computational limitations in rural environments.

Keywords: Wireless Sensor Networks (WSN), Internet of Things (IoT), Routing Protocols, Energy Efficiency, Smart Agriculture.

PENDAHULUAN

Pertanian modern kini menghadapi tantangan besar dalam memenuhi kebutuhan pangan global, meningkatkan efisiensi produksi, dan menjaga keberlanjutan sumber daya alam. Seiring dengan meningkatnya kompleksitas sistem pertanian, kebutuhan akan sistem informasi yang mampu mengelola data secara cerdas, real-time, dan terdesentralisasi menjadi semakin mendesak [1], [2], [3]. Dalam konteks ini, Internet of Things (IoT) dan Jaringan Sensor Nirkabel (Wireless Sensor Networks/WSN) telah muncul sebagai teknologi utama dalam mendukung transformasi digital sektor pertanian, terutama dalam hal pengumpulan, penyimpanan, dan distribusi informasi berbasis data [4], [5].

WSN memungkinkan pengumpulan data lingkungan secara otomatis dan berkelanjutan melalui node sensor yang tersebar di lahan pertanian. Data tersebut dapat mencakup suhu, kelembapan tanah, intensitas cahaya, dan parameter lainnya yang relevan dalam pengambilan keputusan agronomis [6], [7], [8]. IoT kemudian bertindak sebagai penghubung antara sistem sensor dan platform manajemen informasi berbasis cloud atau edge computing, memungkinkan akses dan pemantauan jarak jauh terhadap kondisi lahan, serta otomatisasi proses pertanian [9], [10].

Dari perspektif manajemen informasi, kombinasi WSN dan IoT membentuk ekosistem digital yang mendukung siklus informasi mulai dari akuisisi, penyimpanan, integrasi, hingga diseminasi. Sistem ini mendukung institusi pertanian, pusat riset, dan komunitas petani dalam mengelola pengetahuan lokal, memprediksi kondisi tanaman, serta meningkatkan efisiensi penggunaan air, pupuk, dan energi [11], [12]. Teknologi ini juga memainkan peran penting dalam

peningkatan media and information literacy bagi petani, karena memungkinkan mereka untuk mengakses dan menafsirkan data berbasis visualisasi atau notifikasi berbasis perangkat.

Namun demikian, implementasi sistem informasi berbasis WSN-IoT tidak terlepas dari tantangan teknis dan struktural, seperti keterbatasan energi, ketergantungan jaringan, hingga kurangnya literasi teknologi pada tingkat pengguna akhir [13], [14], [15]. Oleh karena itu, optimalisasi protokol komunikasi dan strategi manajemen data sangat diperlukan untuk memastikan sistem dapat berfungsi andal dan berkelanjutan di berbagai konteks agrikultur, terutama di wilayah pedesaan atau tertinggal.

Artikel ini menyajikan sebuah kajian sistematis terhadap literatur terkait penerapan WSN dan IoT dalam sektor pertanian, dengan fokus pada bagaimana kedua teknologi ini berkontribusi terhadap pengelolaan informasi pertanian. Kajian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi tren terkini dalam pengembangan sistem pertanian berbasis sensor dan IoT; (2) menganalisis pendekatan manajemen data yang diterapkan; serta (3) merangkum tantangan dan arah penelitian masa depan dalam membangun ekosistem informasi digital pertanian yang efisien dan inklusif.

METODE

Bagian ini menjelaskan pendekatan dan langkah-langkah sistematis yang digunakan dalam penelitian ini untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menganalisis literatur terkait implementasi IoT dan WSN dalam pertanian cerdas. Penelitian ini mengadopsi metode yang dirancang untuk memastikan validitas dan relevansi hasil melalui tinjauan literatur yang komprehensif. Pendekatan yang digunakan mencakup analisis PRISMA dan prosedur pencarian literatur pada basis data akademik terkemuka. Penjelasan lebih

rinci mengenai proses ini disajikan dalam bagian-bagian berikut.

Pendekatan Metode

Metode penelitian yang diterapkan dalam studi ini menggunakan pendekatan PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Pendekatan ini memfasilitasi peninjauan literatur secara sistematis dan menyeluruh terhadap referensi yang relevan, terutama artikel dari jurnal internasional bereputasi dan terindeks Scopus. Proses metodologi ini divisualisasikan dalam Gambar 1 yang menunjukkan alur kerja secara rinci, mulai dari identifikasi hingga seleksi akhir artikel yang digunakan dalam kajian.

Prosedur Pencarian Literatur

Tinjauan literatur dilakukan melalui pencarian sistematis pada basis data akademik terkemuka, seperti IEEE Xplore, Scopus, dan Google Scholar. Prosedur ini dirancang untuk memastikan inklusi artikel-artikel dengan kualitas akademik tinggi yang relevan dengan topik kajian, khususnya yang berkaitan dengan teknologi IoT dan jaringan sensor dalam konteks pertanian presisi dan cerdas.

Basis Data dan Kata Kunci

Pencarian literatur dilakukan dengan merancang kombinasi kata kunci yang mencerminkan aspek teknis dan aplikatif dari topik yang ditinjau. Adapun string pencarian yang digunakan sebagai berikut:

((*"WSN"* OR *"Wireless Sensor Network"*) AND (*"Routing Protocol"*) AND (*"Efficiency"* OR *"Energy Efficiency"* OR *"Performance"*))
AND (*"IoT"* OR *"Internet of Things"*)
AND (*"Smart Farming"* OR *"Precision Agriculture"*)

Kata kunci tersebut dipilih untuk menjangkau artikel yang membahas pengoptimalan protokol routing, efisiensi energi, serta penerapan teknologi IoT dalam praktik pertanian. Proses pencarian

dilakukan terhadap artikel yang dipublikasikan pada periode 2020 hingga 2024 untuk menjamin relevansi dan aktualitas kajian.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Penetapan kriteria inklusi dan eksklusi bertujuan untuk memastikan kualitas serta relevansi artikel dalam studi ini. Berikut adalah rincian kriterianya:

a. Kriteria Inklusi:

- Artikel peer-reviewed yang diterbitkan antara tahun 2020 hingga 2024.
- Studi yang membahas penerapan IoT dalam bidang pertanian, khususnya pertanian presisi dan cerdas.
- Artikel yang membahas protokol routing dan efisiensi energi pada jaringan sensor nirkabel (WSN).
- Penelitian yang menyajikan solusi teknologi praktis terhadap tantangan pengelolaan informasi dan sumber daya pertanian.

b. Kriteria Eksklusi:

- Artikel yang tidak terindeks dalam basis data ternama seperti Scopus.
- Artikel yang tidak ditulis dalam Bahasa Inggris.
- Publikasi yang tidak menyertakan validasi eksperimen atau bukti empiris yang dapat diverifikasi.

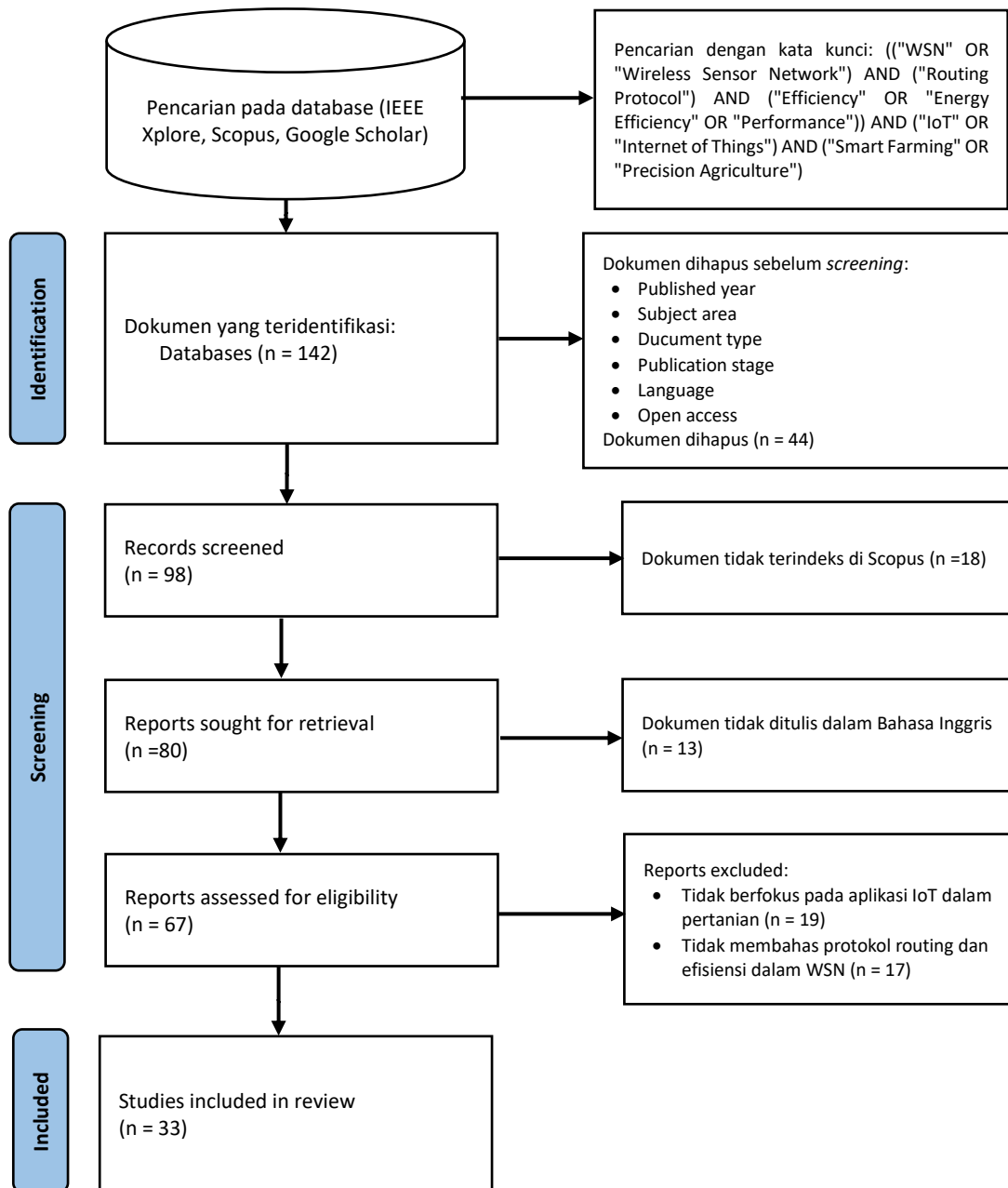
Proses seleksi ini memungkinkan penyaringan artikel yang relevan, memberikan pandangan menyeluruh tentang inovasi terbaru di bidang WSN dan IoT dalam pertanian cerdas. Artikel yang terpilih diprioritaskan berdasarkan kontribusi mereka terhadap pengembangan protokol routing, efisiensi energi, dan kemampuan aplikasi dalam kondisi lapangan.

Proses Seleksi Artikel

Proses seleksi artikel pada studi ini dilakukan secara sistematis menggunakan

pendekatan PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) guna menjamin kualitas, transparansi, dan keterulangan dalam tinjauan pustaka. Proses ini mencakup

empat tahapan utama: identifikasi, penyaringan, uji kelayakan, dan inklusion akhir, yang divisualisasikan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1: Diagram alir menunjukkan proses seleksi 142 artikel menjadi 33 artikel yang ditinjau.

a. Identifikasi

Pada tahap ini, artikel dikumpulkan dari beberapa basis data akademik terkemuka, yakni IEEE Xplore, Scopus, dan Google Scholar. Kata kunci pencarian yang digunakan

merupakan gabungan dari istilah-istilah berikut:

("WSN" OR "Wireless Sensor Network") AND ("Routing Protocol") AND ("Efficiency" OR "Energy

Efficiency" OR "Performance")) AND ("IoT" OR "Internet of Things") AND ("Smart Farming" OR "Precision Agriculture")

Proses ini menghasilkan 142 artikel awal yang potensial untuk dianalisis lebih lanjut.

b. Penyaringan (*Screening*)

Artikel yang diperoleh kemudian disaring untuk menghapus duplikasi serta artikel yang tidak relevan berdasarkan evaluasi terhadap judul dan abstraknya. Sebanyak 43 artikel dieliminasi karena:

- Duplikasi antar basis data
- Tidak relevan dengan tema pertanian cerdas berbasis IoT dan WSN
- Hanya berupa ulasan populer atau tidak ilmiah

Hasil dari tahap ini adalah 99 artikel yang masuk ke tahap uji kelayakan.

c. Uji Kelayakan (*Eligibility*)

Selanjutnya, artikel dibaca secara penuh untuk menilai kesesuaian topik dan kontribusi substansial. Artikel dinyatakan layak jika memenuhi kriteria:

- Fokus pada topik routing, efisiensi energi, atau arsitektur IoT dalam konteks pertanian
- Mengandung metode eksperimen, simulasi, atau implementasi sistem nyata
- Dipublikasikan dalam jurnal terindeks dan berbahasa Inggris

Sebanyak 66 artikel dieliminasi karena tidak memenuhi kriteria di atas, sehingga menyisakan 33 artikel.

d. Inklusi Akhir

Sebanyak 33 artikel akhir dipilih untuk ditelaah secara

mendalam. Artikel-artikel ini mewakili kontribusi signifikan dalam pengembangan sistem berbasis IoT dan WSN untuk pertanian cerdas, mencakup aspek teknis seperti algoritma routing, efisiensi konsumsi daya, dan adaptasi sistem dalam lingkungan pertanian yang dinamis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil penelitian terkait efisiensi protokol routing dalam Wireless Sensor Network (WSN) serta implementasinya dalam mendukung pertanian cerdas berbasis Internet of Things (IoT). Pembahasan difokuskan pada evaluasi berbagai protokol berdasarkan pendekatan yang digunakan, seperti berbasis clustering dan heuristik, serta analisis manfaat dalam peningkatan efisiensi energi, kinerja jaringan, dan umur sistem. Temuan ini memberikan wawasan penting bagi optimalisasi teknologi dalam sektor pertanian.

Efisiensi Protokol Routing dalam WSN

Beragam protokol routing telah dikembangkan untuk mengoptimalkan efisiensi energi dan performa jaringan dalam aplikasi pertanian cerdas berbasis IoT. Secara umum, pendekatan yang digunakan terbagi menjadi dua kategori utama:

a. Protokol Berbasis Clustering

Protokol seperti LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) menunjukkan efisiensi energi yang signifikan melalui pengelompokan adaptif node sensor [16], [17], [18]. Variannya, seperti E-FERP (Enhanced Fuzzy Energy-Efficient Routing Protocol), memanfaatkan logika fuzzy untuk pengambilan keputusan pengelompokan dan mampu meningkatkan efisiensi energi hingga 30% [19].

b. Protokol Berbasis Heuristik

Pendekatan berbasis algoritma cerdas, seperti Hybrid Particle Swarm Optimization (HPSO) dan Butterfly Optimization Algorithm, berhasil memperpanjang umur jaringan dengan meningkatkan distribusi beban antar node hingga 25% [20].

Untuk meningkatkan efisiensi energi dan kinerja dalam jaringan sensor nirkabel

berbasis IoT, berbagai protokol routing telah dikembangkan dengan pendekatan yang beragam. Beberapa protokol menggunakan metode berbasis clustering adaptif, sementara lainnya memanfaatkan algoritma berbasis logika fuzzy atau pendekatan dua tahap [19]. Berikut adalah perbandingan protokol routing yang banyak digunakan berdasarkan metodologi dan performa utama mereka.

Tabel 1: Perbandingan Protokol Routing dalam WSN

Protokol	Metode Utama	Keunggulan	Keterbatasan
LEACH [21], [22], [23]	Clustering adaptif	Mengurangi konsumsi energi hingga 40%	Tidak cocok untuk jaringan berskala besar
I-SEP [24]	Routing stabil untuk IoT	Efisiensi energi yang lebih tinggi	Membutuhkan konfigurasi awal yang kompleks
EETSP [25]	Protokol dua tahap	Umur jaringan lebih panjang	Latensi tinggi pada jaringan besar
E-FEERP [19]	Logika fuzzy	Pengurangan energi lebih baik di aplikasi pertanian	Tidak cocok untuk node dinamis

Tabel 1 merangkum empat protokol routing utama yang banyak digunakan dalam jaringan sensor nirkabel berbasis IoT untuk aplikasi pertanian cerdas. Protokol LEACH menggunakan pendekatan clustering adaptif yang mampu mengurangi konsumsi energi secara signifikan, tetapi kurang optimal untuk jaringan dengan skala besar. Sebaliknya, I-SEP, yang dirancang khusus untuk stabilitas dalam lingkungan IoT, menawarkan efisiensi energi yang lebih tinggi, meskipun memerlukan konfigurasi awal yang rumit [24], [26].

Protokol EETSP menonjol karena kemampuannya memperpanjang umur jaringan melalui pendekatan dua tahap [25]. Namun, kelemahannya terletak pada latensi yang tinggi ketika diterapkan pada jaringan dengan skala besar. Sementara itu, E-FEERP menggunakan logika fuzzy untuk meningkatkan efisiensi energi, yang menjadikannya sangat cocok untuk

aplikasi pertanian [19]. Namun, pendekatan ini kurang efektif dalam lingkungan dengan node yang bersifat dinamis [19].

Dengan memahami karakteristik setiap protokol, para peneliti dan praktisi dapat memilih solusi yang paling sesuai dengan kebutuhan spesifik dari aplikasi pertanian berbasis IoT yang sedang dikembangkan.

Integrasi IoT dengan WSN untuk Pertanian Cerdas

Integrasi IoT dengan WSN telah menghadirkan berbagai inovasi signifikan dalam sektor pertanian cerdas [12], [27], [28]. Berikut adalah beberapa area utama yang mendapatkan manfaat besar dari teknologi ini:

a. Irigasi Otomatis

Sistem berbasis IoT menggunakan WSN untuk memantau parameter seperti kelembapan tanah, curah hujan, dan suhu udara. Dengan

data yang dikumpulkan secara real-time, sistem irigasi dapat diatur untuk menyuplai air secara otomatis hanya pada area yang membutuhkan. Hal ini tidak hanya menghemat air hingga 30% tetapi juga meningkatkan kesehatan tanaman dengan memastikan kondisi lingkungan yang optimal untuk pertumbuhan.

b. Analitik Data

Platform berbasis cloud, seperti AWS, Microsoft Azure, dan Google Cloud, memfasilitasi analisis data secara real-time. Data yang dikumpulkan dari sensor dapat digunakan untuk memprediksi hasil panen, mendeteksi potensi penyakit tanaman, dan memberikan rekomendasi penggunaan pupuk yang lebih efisien. Teknologi ini telah meningkatkan akurasi prediksi hasil panen hingga 85%, memungkinkan petani untuk merencanakan strategi pemasaran dan distribusi dengan lebih baik.

c. Keamanan Data

Keamanan data menjadi perhatian utama dalam sistem berbasis IoT [29]. Dengan memanfaatkan teknologi blockchain, data yang dikumpulkan dari WSN dapat diamankan melalui mekanisme enkripsi yang kuat. Blockchain juga meningkatkan transparansi dalam pengelolaan data, memungkinkan semua pihak yang terlibat (misalnya, petani, distributor, dan regulator) untuk memverifikasi data dengan mudah. Teknologi ini memberikan jaminan terhadap manipulasi data dan meningkatkan kepercayaan pengguna.

Berbagai fitur yang dihadirkan tidak hanya memberikan efisiensi operasional tetapi juga mendukung keberlanjutan dalam manajemen sumber daya pertanian. Tabel 2 menyajikan informasi tentang manfaat utama yang diperoleh dari integrasi teknologi IoT dan WSN dalam pertanian cerdas.

Tabel 2: Manfaat Integrasi IoT dan WSN dalam Pertanian Cerdas

Fitur	Manfaat Utama	Contoh Implementasi
Irigasi Otomatis	Pengurangan konsumsi air hingga 30%	Sistem irigasi pintar berbasis sensor tanah
Prediksi Hasil Panen	Akurasi prediksi hingga 85%	Analitik berbasis cloud
Keamanan Data	Meningkatkan transparansi dan kepercayaan	Protokol berbasis blockchain

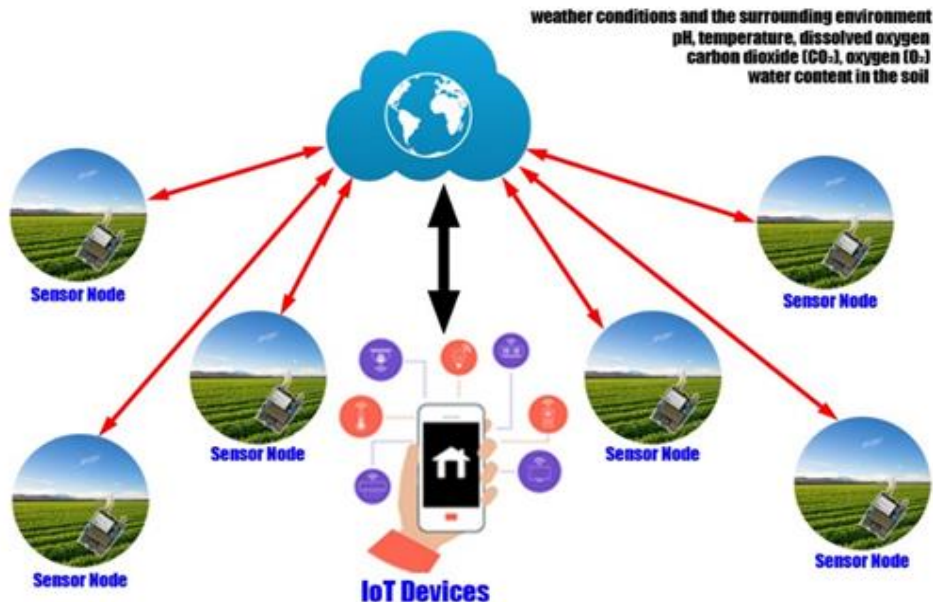
Tabel 2 menunjukkan manfaat utama dari integrasi IoT dan WSN dalam mendukung pertanian cerdas. Salah satu fitur utama adalah irigasi otomatis, di mana sistem berbasis sensor tanah dapat mengurangi konsumsi air hingga 30% dengan mengatur jadwal dan volume irigasi secara real-time berdasarkan data kelembapan tanah. Selain itu, teknologi analitik berbasis cloud memungkinkan prediksi hasil panen dengan tingkat akurasi hingga 85%, membantu petani dalam perencanaan dan pengambilan keputusan

yang lebih tepat. Keamanan data juga menjadi aspek penting, di mana protokol berbasis blockchain meningkatkan transparansi dan melindungi integritas data yang dikumpulkan, menciptakan kepercayaan di seluruh ekosistem teknologi. Kombinasi fitur-fitur ini memberikan efisiensi operasional sekaligus mendukung keberlanjutan dan manajemen sumber daya yang lebih baik dalam pertanian modern.

Data yang dikumpulkan oleh sensor kemudian diteruskan ke gateway melalui protokol komunikasi seperti LoRaWAN,

untuk diteruskan ke platform cloud. Di cloud, data disimpan, diolah, dan dianalisis untuk menghasilkan informasi yang dapat digunakan oleh petani melalui aplikasi berbasis web atau mobile. Proses ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pengelolaan lahan pertanian tetapi juga membantu

pengambilan keputusan secara real-time. Gambar 2 menyajikan diagram integrasi teknologi IoT dan WSN dalam mendukung implementasi pertanian cerdas.



Gambar 2: Diagram Integrasi IoT dan WSN dalam Pertanian Cerdas

Gambar 2 menunjukkan arsitektur sistem yang mengintegrasikan perangkat IoT dan *Wireless Sensor Network* (WSN) untuk aplikasi pertanian cerdas. Sistem ini terdiri dari beberapa elemen kunci yang saling berinteraksi untuk mengoptimalkan pengelolaan sumber daya di lahan pertanian.

a. Sensor Node

Node sensor ditempatkan di berbagai lokasi pada lahan pertanian untuk mengukur parameter lingkungan seperti kelembapan tanah, suhu, pH, kandungan oksigen terlarut, kadar karbon dioksida (CO_2), dan kondisi cuaca. Sensor-sensor ini dirancang untuk bekerja secara otonom dan efisien dalam mengumpulkan data secara real-time [30], [31].

b. Gateway

Data yang dikumpulkan oleh node sensor dikirimkan ke gateway

menggunakan teknologi komunikasi seperti LoRaWAN atau ZigBee. Gateway bertindak sebagai penghubung antara WSN di lapangan dengan platform cloud [30], [32].

c. Cloud Platform

Di cloud, data yang diterima dari gateway disimpan dan dianalisis. Platform ini menggunakan teknologi analitik data canggih untuk memberikan wawasan yang berguna, seperti pola kelembapan tanah, prediksi kebutuhan air, atau estimasi hasil panen. Contoh platform yang dapat digunakan meliputi *Amazon Web Services* (AWS) atau *Google Cloud* [5], [24]

d. Aplikasi IoT

Data yang telah dianalisis di cloud disampaikan kepada pengguna melalui aplikasi IoT pada perangkat mobile atau web. Pengguna dapat mengakses informasi dalam bentuk

laporan atau grafik yang mudah dipahami dan juga memiliki kemampuan untuk mengontrol perangkat lapangan, seperti sistem irigasi otomatis [5], [33].

Arsitektur ini memungkinkan petani untuk mengelola lahan pertanian secara efisien dan responsif. Dengan bantuan teknologi IoT dan WSN, konsumsi air dapat dikurangi, produktivitas tanaman dapat ditingkatkan, dan keputusan berbasis data dapat diambil secara lebih cepat dan akurat. Keuntungan lain adalah kemampuan untuk meningkatkan keberlanjutan dan efisiensi pertanian dalam skala besar.

Tantangan Implementasi Teknologi

Penggunaan teknologi IoT dan WSN dalam pertanian cerdas menghadapi beberapa tantangan signifikan yang perlu diatasi agar sistem dapat diimplementasikan secara optimal [28], [34], [35]. Dua tantangan utama yang sering ditemui adalah keterbatasan konektivitas dan kompleksitas sistem yang tinggi [36], [37].

a. Konektivitas Terbatas:

Salah satu kendala terbesar dalam penerapan teknologi di sektor pertanian adalah keterbatasan konektivitas, terutama di daerah terpencil yang jauh dari infrastruktur telekomunikasi modern. Untuk mengatasi masalah ini, teknologi seperti LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) digunakan karena mampu menyediakan komunikasi jarak jauh dengan konsumsi daya yang sangat rendah. LoRaWAN memungkinkan sensor yang berada jauh dari gateway untuk tetap terhubung tanpa memerlukan infrastruktur yang kompleks [32], [38]. Selain itu, penggunaan *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) atau drone dapat memperluas cakupan jaringan di area yang sulit dijangkau. UAV dapat berfungsi

sebagai relay node sementara untuk mentransmisikan data dari sensor ke gateway, memastikan keberlangsungan komunikasi meskipun berada di wilayah dengan akses jaringan terbatas. Namun, implementasi ini memerlukan perencanaan yang matang terkait daya tahan UAV, pengisian ulang daya, dan interferensi sinyal [28].

b. Kompleksitas Sistem:

Kompleksitas sistem menjadi tantangan lain yang signifikan, terutama karena semakin canggihnya algoritma yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi jaringan. Algoritma berbasis kecerdasan buatan, seperti *Deep Reinforcement Learning* (DRL), memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi routing data dalam WSN [39]. Dengan DRL, sistem dapat belajar secara adaptif untuk memilih jalur komunikasi yang paling efisien berdasarkan kondisi jaringan saat itu, seperti kepadatan node atau tingkat konsumsi daya [39]. Meski demikian, algoritma ini membutuhkan daya komputasi yang tinggi, yang sering kali tidak sejalan dengan kapasitas perangkat sensor berbasis IoT yang biasanya memiliki keterbatasan daya dan prosesor [39]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan hibrida, seperti memindahkan sebagian beban komputasi ke cloud atau edge computing untuk mengurangi beban pada perangkat sensor. Namun, langkah ini membawa tantangan tambahan, seperti latensi komunikasi dan kebutuhan akan keamanan data yang lebih tinggi.

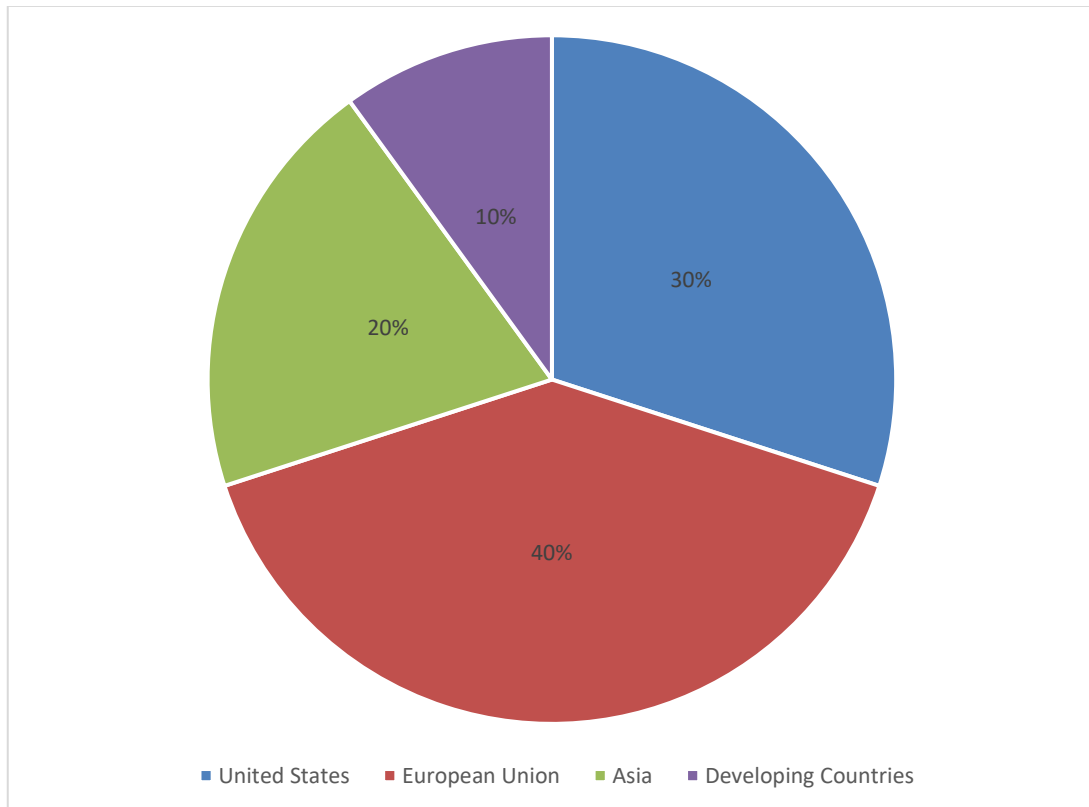
Kedua tantangan tersebut menunjukkan bahwa meskipun teknologi IoT dan WSN memiliki potensi besar dalam revolusi pertanian cerdas, keberhasilan implementasinya memerlukan kombinasi teknologi yang tepat, manajemen sumber daya yang

efisien, dan pendekatan inovatif untuk mengatasi keterbatasan yang ada.

Visualisasi Analisis Wilayah Penelitian

Bagian ini menyajikan visualisasi distribusi geografis penelitian terkait implementasi teknologi IoT dan WSN dalam pertanian cerdas. Analisis wilayah

bertujuan untuk memahami sejauh mana adopsi teknologi ini dilakukan di berbagai kawasan, serta mengidentifikasi potensi pengembangan lebih lanjut di wilayah tertentu. Visualisasi ini memberikan gambaran proporsi kontribusi penelitian dari berbagai negara dan wilayah, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3: Distribusi Penelitian Berdasarkan Wilayah

Pie chart yang menunjukkan kontribusi Amerika Serikat (30%), Uni Eropa (40%), Asia (20%), dan negara berkembang (10%). Sebagian besar penelitian berasal dari negara maju, menunjukkan perlunya eksplorasi lebih lanjut di negara berkembang.

KESIMPULAN

Tinjauan sistematis ini menegaskan peran krusial Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) dan Internet of Things (IoT) dalam meningkatkan efisiensi dan produktivitas di sektor pertanian cerdas. Protokol routing seperti LEACH, I-SEP, dan E-FEERP

telah menunjukkan efektivitasnya dalam mengurangi konsumsi energi hingga 40% melalui mekanisme pengelompokan adaptif dan algoritma berbasis heuristik. Pendekatan ini tidak hanya memperpanjang umur jaringan tetapi juga memungkinkan pengelolaan sumber daya yang lebih efisien, terutama pada aplikasi seperti irigasi otomatis yang dapat mengurangi konsumsi air hingga 30%.

Integrasi IoT dengan WSN memberikan kemampuan analitik data real-time yang memperkuat pengambilan keputusan berbasis data. Teknologi seperti cloud computing dan blockchain semakin memperluas fungsionalitas sistem ini, meningkatkan transparansi, keamanan, dan

skalabilitas. Studi ini juga mengidentifikasi tantangan utama, termasuk keterbatasan infrastruktur jaringan di wilayah pedesaan, risiko keamanan data, dan kebutuhan akan daya komputasi tinggi untuk algoritma berbasis kecerdasan buatan.

Distribusi geografis penelitian menunjukkan bahwa negara maju, seperti Amerika Serikat dan Uni Eropa, mendominasi inovasi di bidang ini. Namun, potensi besar masih ada di negara berkembang yang memiliki kebutuhan mendesak akan teknologi pertanian cerdas. Untuk itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengembangkan solusi yang lebih ekonomis, dapat diakses, dan sesuai dengan kebutuhan lokal.

Selain itu, pengembangan protokol routing berbasis kecerdasan buatan, seperti reinforcement learning dan algoritma evolusi, memiliki potensi besar dalam memperbaiki efisiensi energi dan kinerja jaringan. Pendekatan-pendekatan baru yang memanfaatkan teknologi LoRaWAN dan UAV juga menjanjikan solusi untuk mengatasi kendala konektivitas di wilayah terpencil.

Secara keseluruhan, tinjauan ini menegaskan bahwa WSN dan IoT adalah kunci dalam transformasi pertanian menuju sistem yang lebih cerdas, berkelanjutan, dan efisien. Penelitian masa depan harus fokus pada peningkatan interoperabilitas, pengembangan perangkat keras yang lebih hemat biaya, dan strategi mitigasi risiko keamanan untuk memaksimalkan manfaat dari teknologi ini di seluruh dunia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Sanjeevi, S. Prasanna, B. Siva Kumar, G. Gunasekaran, I. Alagiri, and R. Vijay Anand, "Precision agriculture and farming using Internet of Things based on wireless sensor network," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 31, no. 12, p. e3978, Dec. 2020, doi: 10.1002/ETT.3978.
- [2] A. Ariawan, "Smart Sprout: Irigasi Cerdas Berbasis AIoT untuk Pertanian Modern dan Ramah Lingkungan," *Bit-Tech*, vol. 7, no. 2, pp. 434–444, Dec. 2024, doi: 10.32877/BT.V7I2.1841.
- [3] N. Khan, R. L. Ray, G. R. Sargani, M. Ihtisham, M. Khayyam, and S. Ismail, "Current Progress and Future Prospects of Agriculture Technology: Gateway to Sustainable Agriculture," *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 4883*, vol. 13, no. 9, p. 4883, Apr. 2021, doi: 10.3390/SU13094883.
- [4] S. Dhal *et al.*, "Internet of Things (IoT) in digital agriculture: An overview," *Agron J*, vol. 116, no. 3, pp. 1144–1163, May 2024, doi: 10.1002/agj2.21385.
- [5] A. Rehman, T. Saba, M. Kashif, S. M. Fati, S. A. Bahaj, and H. Chaudhry, "A Revisit of Internet of Things Technologies for Monitoring and Control Strategies in Smart Agriculture," *Agronomy*, vol. 12, no. 1, p. 127, Jan. 2022, doi: 10.3390/AGRONOMY12010127.
- [6] M. F. Koşum and A. O. Özkan, "Analysis of the effect of environmental data collected through the WSN on plant development by the WEKA program," *Turkish Journal of Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 202–210, Sep. 2024, doi: 10.31127/TUJE.1532313.
- [7] G. Patrizi, A. Bartolini, L. Ciani, V. Gallo, P. Sommella, and M. Carratu, "A Virtual Soil Moisture Sensor for Smart Farming Using Deep Learning," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 71, 2022, doi: 10.1109/TIM.2022.3196446.
- [8] R. Ouni and K. Saleem, "Framework for Sustainable

- Wireless Sensor Network Based Environmental Monitoring,” *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 8356, vol. 14, no. 14, p. 8356, Jul. 2022, doi: 10.3390/SU14148356.
- [9] A. R. A. Rajak, “Emerging Technological Methods for Effective Farming by Cloud Computing and IoT,” *Emerging Science Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 1017–1031, Aug. 2022, doi: 10.28991/ESJ-2022-06-05-07.
- [10] N. N. Thilakarathne, M. S. A. Bakar, P. E. Abas, and H. Yassin, “Towards making the fields talks: A real-time cloud enabled IoT crop management platform for smart agriculture,” *Front Plant Sci*, vol. 13, p. 1030168, Jan. 2023, doi: 10.3389/fpls.2022.1030168.
- [11] G. Vitali, M. Francia, M. Golfarelli, and M. Canavari, “Crop Management with the IoT: An Interdisciplinary Survey,” *Agronomy* 2021, Vol. 11, Page 181, vol. 11, no. 1, p. 181, Jan. 2021, doi: 10.3390/AGRONOMY11010181.
- [12] T. Alahmad, M. Neményi, and A. Nyéki, “Applying IoT Sensors and Big Data to Improve Precision Crop Production: A Review,” *Agronomy*, vol. 13, no. 10, p. 2603, Oct. 2023, doi: 10.3390/agronomy13102603.
- [13] B. Yamini, P. G. K. D, J. M, J. G, and U. G S, “Theoretical study and analysis of advanced wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT),” *Measurement: Sensors*, vol. 33, p. 101098, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.MEASEN.2024.101098.
- [14] H. Rizvi, A. Arif, M. Z. Hasan, and Z. M. Hanapi, “Efficient and Secured Mechanisms for Data Link in IoT WSNs: A Literature Review,” *Electronics* 2023, Vol. 12, Page 458, vol. 12, no. 2, p. 458, Jan. 2023, doi: 10.3390/ELECTRONICS12020458.
- [15] G. S. Uthayakumar, B. Jackson, C. Ramesh Babu Durai, A. Kalaimani, S. Sargunavathi, and S. Kamatchi, “Systematically efficiency enabled energy usage method for an IOT based WSN environment,” *Measurement: Sensors*, vol. 25, p. 100615, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.MEASEN.2022.100615.
- [16] A. Purnama, A. A. Rahman, and E. Fauzi, “The LEACH Protocol to Improve Energy Efficiency of Wireless Sensor Networks in Smart Agriculture,” *Jurnal Ilmiah Informatika Global*, vol. 15, no. 1, pp. 38–44, Apr. 2024, doi: 10.36982/JIIG.V15I1.3805.
- [17] R. Zuhdianto and F. S. Mukti, “A Clustering Optimization for Energy Efficiency in Wireless Sensor Network using K-Means Algorithm,” *Jurnal Teknik Informatika (JUTIF)*, vol. 4, no. 1, pp. 225–234, Feb. 2023, doi: 10.52436/1.JUTIF.2023.4.1.523.
- [18] C. P. Verma, “Enhancing Parameters of LEACH Protocol for Efficient Routing in Wireless Sensor Networks,” *Journal of Computers, Mechanical and Management*, vol. 2, no. 1, pp. 30–34, Feb. 2023, doi: 10.57159/GADL.JCMM.2.1.23040.
- [19] V. Narayan, A. K. Daniel, and P. Chaturvedi, “E-FEERP: Enhanced Fuzzy Based Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Network,” *Wirel Pers Commun*, vol. 131, no. 1, pp. 371–398, Jul. 2023, doi: 10.1007/S11277-023-10434-Z/METRICS.
- [20] S. Sharmin, I. Ahmedy, and R. Md Noor, “An Energy-Efficient Data Aggregation Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks Using Hybrid PSO,” *Energies (Basel)*, vol.

- 16, no. 5, p. 2487, Mar. 2023, doi: 10.3390/EN16052487.
- [21] S. Firdous, N. Bibi, M. Wahid, and S. Alhazmi, "Efficient Clustering Based Routing for Energy Management in Wireless Sensor Network-Assisted Internet of Things," *Electronics (Basel)*, vol. 11, no. 23, p. 3922, Nov. 2022, doi: 10.3390/electronics11233922.
- [22] C. Nakas, D. Kandris, and G. Visvardis, "Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey," *Algorithms*, vol. 13, no. 3, p. 72, Mar. 2020, doi: 10.3390/A13030072.
- [23] G. Kaur, P. Chanak, and M. Bhattacharya, "Energy-Efficient Intelligent Routing Scheme for IoT-Enabled WSNs," *IEEE Internet Things J*, vol. 8, no. 14, pp. 11440–11449, Jul. 2021, doi: 10.1109/jiot.2021.3051768.
- [24] T. M. Behera, S. K. Mohapatra, U. C. Samal, M. S. Khan, M. Daneshmand, and A. H. Gandomi, "I-SEP: An Improved Routing Protocol for Heterogeneous WSN for IoT-Based Environmental Monitoring," *IEEE Internet Things J*, vol. 7, no. 1, pp. 710–717, Jan. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2940988.
- [25] A. K. Dwivedi, P. S. Mehra, O. Pal, M. N. Doja, and B. Alam, "EETSP: Energy-efficient two-stage routing protocol for wireless sensor network-assisted Internet of Things," *International Journal of Communication Systems*, vol. 34, no. 17, p. e4965, Nov. 2021, doi: 10.1002/DAC.4965.
- [26] R. Nagaraju *et al.*, "Secure Routing-Based Energy Optimization for IoT Application with Heterogeneous Wireless Sensor Networks," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 13, p. 4777, Jun. 2022, doi: 10.3390/EN15134777.
- [27] K. Lakshmana, N. Subramani, Y. Alotaibi, S. Alghamdi, O. I. Khalafand, and A. K. Nanda, "Improved Metaheuristic-Driven Energy-Aware Cluster-Based Routing Scheme for IoT-Assisted Wireless Sensor Networks," *Sustainability*, vol. 14, no. 13, p. 7712, Jun. 2022, doi: 10.3390/SU14137712.
- [28] N. Islam, M. M. Rashid, F. Pasandideh, B. Ray, S. Moore, and R. Kadel, "A Review of Applications and Communication Technologies for Internet of Things (IoT) and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Based Sustainable Smart Farming," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 1821, Feb. 2021, doi: 10.3390/SU13041821.
- [29] S. H. Awan *et al.*, "BlockChain with IoT, an Emergent Routing Scheme for Smart Agriculture," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 4, pp. 420–429, Jun. 2020, doi: 10.14569/IJACSA.2020.0110457.
- [30] P. Chithaluru, F. Al-Turjman, M. Kumar, and T. Stephan, "I-AREOR: An energy-balanced clustering protocol for implementing green IoT in smart cities," *Sustain Cities Soc*, vol. 61, p. 102254, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.SCS.2020.102254.
- [31] W. Li *et al.*, "Review of Sensor Network-Based Irrigation Systems Using IoT and Remote Sensing," *Advances in Meteorology*, vol. 2020, no. 1, p. 8396164, Jan. 2020, doi: 10.1155/2020/8396164.
- [32] S. J. Suji Prasad *et al.*, "An efficient LoRa-based smart agriculture management and monitoring system using wireless sensor networks," *International Journal of Ambient*

- Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 5447–5450, Dec. 2022, doi: 10.1080/01430750.2021.1953591.
- [33] D. Xue and W. Huang, “Smart Agriculture Wireless Sensor Routing Protocol and Node Location Algorithm Based on Internet of Things Technology,” *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 22, pp. 24967–24973, Nov. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3035651.
- [34] A. K. Dwivedi, A. K. Sharma, and P. S. Mehra, “Energy Efficient Sensor Node Deployment Scheme for Two Stage Routing Protocol of Wireless Sensor Networks assisted IoT,” *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, vol. 18, no. 2, pp. 158–169, Aug. 2020, doi: 10.37936/ECTI-EEC.2020182.240541.
- [35] A. I. Khan, F. Alsolami, F. Alqurashi, Y. B. Abushark, and I. H. Sarker, “Novel energy management scheme in IoT enabled smart irrigation system using optimized intelligence methods,” *Eng Appl Artif Intell*, vol. 114, p. 104996, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2022.104996.
- [36] X. Zhou, X. Yang, J. Ma, and K. I. K. Wang, “Energy-Efficient Smart Routing Based on Link Correlation Mining for Wireless Edge Computing in IoT,” *IEEE Internet Things J*, vol. 9, no. 16, pp. 14988–14997, Aug. 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3077937.
- [37] S. Gupta, S. Gupta, and D. Goyal, “Wireless Sensor Network in IoT and Performance Optimization,” *Recent Advances in Computer Science and Communications*, vol. 15, no. 1, pp. 14–22, Sep. 2020, doi: 10.2174/2666255813999200831123235.
- [38] M. N. Mowla, N. Mowla, A. F. M. S. Shah, K. M. Rabie, and T. Shongwe, “Internet of Things and Wireless Sensor Networks for Smart Agriculture Applications: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 145813–145852, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3346299.
- [39] Y. Mekonnen, S. Namuduri, L. Burton, A. Sarwat, and S. Bhansali, “Review—Machine Learning Techniques in Wireless Sensor Network Based Precision Agriculture,” *J Electrochem Soc*, vol. 167, no. 3, p. 037522, Jan. 2020, doi: 10.1149/2.0222003JES/XML.