

Optimisasi Desain Jaringan *IoT* untuk Pelacakan Produk di Rantai Pasok Pertanian: Tinjauan Literatur Sistematis

Hanif Zaidan Sinaga^{1,2}, Arya Adhyaksa Waskita²

Program Studi Teknik Informatika S-2, Universitas Pamulang, Tangerang Selatan¹

Program Studi Sarjana Bisnis Digital, Universitas Ibn Khaldun, Bogor²

Email : hanif.zaidan@gmail.com¹, aawaskita@gmail.com²

Abstrak— Rantai pasok pertanian adalah salah satu elemen penting dalam ketahanan pangan global, namun menghadapi tantangan besar seperti pemborosan pangan, perubahan iklim, dan permintaan akan transparansi. Internet of Things (*IoT*) muncul sebagai solusi inovatif untuk mengatasi tantangan tersebut dengan memungkinkan pelacakan produk secara real-time melalui sensor, gateway, dan platform berbasis cloud. Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk menganalisis beberapa artikel yang relevan, dengan tujuan mengeksplorasi elemen-elemen utama, tantangan, dan strategi dalam desain jaringan *IoT* untuk rantai pasok pertanian. Hasil penelitian mengidentifikasi lima elemen utama dalam desain jaringan *IoT*: teknologi komunikasi, arsitektur jaringan, keamanan data, efisiensi energi, dan interoperabilitas. Teknologi seperti Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN) menjadi solusi utama untuk wilayah pedesaan dengan keterbatasan infrastruktur. Tantangan utama yang dihadapi dalam implementasi jaringan *IoT* di sektor pertanian seperti keterbatasan infrastruktur komunikasi, keamanan dan privasi data, kompleksitas manajemen data, dan biaya implementasi yang tinggi. Strategi yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan jaringan *IoT* dalam rantai pasok pertanian seperti penerapan edge computing, integrasi blockchain, optimasi protokol jaringan, teknologi hemat energi, pendekatan hybrid networks. Implementasi *IoT* dalam rantai pasok pertanian memberikan dampak positif signifikan, termasuk pengurangan pemborosan, peningkatan transparansi, dan optimalisasi sumber daya. Studi ini menyimpulkan bahwa desain jaringan *IoT* yang optimal sangat penting untuk mendukung keberlanjutan dan efisiensi sistem rantai pasok pertanian, terutama di negara berkembang. Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya mencakup integrasi *IoT* dengan kecerdasan buatan dan pengembangan teknologi hemat energi untuk memperluas adopsi *IoT* secara global.

Kata Kunci— Internet of Things (*IoT*), Rantai Pasok Pertanian, Teknologi Komunikasi, Infrastruktur Komunikasi, Keamanan Data

I. PENDAHULUAN

Rantai pasok pertanian adalah salah satu elemen terpenting dalam memastikan keberlanjutan ketahanan pangan global. Sistem ini melibatkan berbagai proses mulai dari produksi, penyimpanan, distribusi, hingga konsumsi. Dalam konteks global yang semakin dinamis, rantai pasok pertanian menghadapi tantangan besar seperti peningkatan permintaan pangan, perubahan iklim, dan pemborosan hasil pertanian [1], [2], [3]. Teknologi *Internet of Things (IoT)* telah muncul sebagai solusi inovatif untuk mengatasi tantangan tersebut. Dengan mengintegrasikan perangkat cerdas seperti sensor, gateway, dan platform berbasis cloud, *IoT* dapat mengotomatiskan proses, meningkatkan efisiensi operasional, dan memastikan transparansi dalam rantai pasok pertanian [4], [5], [6].

Salah satu aplikasi *IoT* yang paling signifikan dalam sektor ini adalah pelacakan produk pertanian. *IoT* memungkinkan pemantauan kondisi produk, seperti suhu dan kelembapan, sepanjang rantai pasok. Data yang dikumpulkan secara real-time dapat digunakan untuk mencegah kerusakan produk dan meminimalkan pemborosan. Sebagai contoh, sensor *IoT* yang dipasang di kontainer pengangkut produk hortikultura dapat memonitor kondisi penyimpanan selama transportasi, memastikan kualitas produk tetap terjaga hingga mencapai konsumen akhir [7], [8], [9]. Selain itu, integrasi *IoT* dengan teknologi *blockchain* dapat menciptakan rekam jejak digital yang aman, memberikan kepercayaan kepada konsumen terhadap kualitas dan asal-usul produk [10], [11], [12], [13], [14].

Peningkatan efisiensi operasional dengan *IoT* juga berdampak signifikan terhadap keberlanjutan rantai pasok. Dengan pemantauan otomatis, pelaku rantai pasok dapat mengurangi penggunaan sumber daya seperti air, listrik, dan bahan bakar. Sistem *IoT* juga memungkinkan deteksi dini masalah pada tahap-tahap kritis, seperti transportasi dan penyimpanan, sehingga membantu mengurangi kehilangan produk pertanian [15], [16]. Lebih jauh, *IoT* memberikan visibilitas yang lebih baik terhadap seluruh ekosistem rantai pasok, memfasilitasi kolaborasi yang lebih baik di antara petani, distributor, dan pengecer [5], [17], [18].

Namun, meskipun memberikan banyak manfaat, penerapan *IoT* di sektor pertanian tidak terlepas dari tantangan. Infrastruktur komunikasi di wilayah pedesaan sering kali menjadi kendala utama, terutama di negara-negara berkembang. Banyak wilayah yang

belum memiliki akses ke jaringan berkecepatan tinggi, sehingga membatasi implementasi *IoT* secara luas [19], [20], [21], [22]. Teknologi *Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN)*, seperti *LoRaWAN* dan *NB-IoT*, telah diidentifikasi sebagai solusi potensial untuk memperluas cakupan jaringan dengan konsumsi daya rendah. Selain itu, perangkat *IoT* harus dirancang untuk hemat energi karena sebagian besar perangkat ini beroperasi di lokasi terpencil tanpa akses listrik yang andal [23].

Keamanan data juga menjadi perhatian utama dalam desain jaringan *IoT*. Perangkat *IoT* sering kali menjadi target serangan siber, seperti manipulasi data sensor, serangan *Distributed Denial of Service (DDoS)*, atau pencurian data. Serangan semacam ini dapat merusak keandalan sistem dan menyebabkan kerugian besar, baik secara finansial maupun operasional. Oleh karena itu, pendekatan keamanan berbasis enkripsi dan autentikasi perangkat menjadi elemen yang sangat penting dalam desain jaringan *IoT* untuk rantai pasok pertanian [5], [11], [13], [14], [24].

Selain itu, interoperabilitas perangkat menjadi tantangan lain yang harus diatasi. Rantai pasok pertanian sering kali melibatkan perangkat *IoT* dari berbagai vendor, yang tidak selalu kompatibel satu sama lain. Masalah ini dapat menghambat pengumpulan dan analisis data secara efisien. Untuk mengatasi tantangan ini, standar komunikasi seperti *MQTT* dan *CoAP* telah diperkenalkan untuk memastikan kompatibilitas antar perangkat dalam jaringan *IoT* [1], [7].

Teknologi pendukung seperti *edge computing* juga memainkan peran penting dalam desain jaringan *IoT*. Dengan memindahkan sebagian pemrosesan data ke perangkat lokal, *edge computing* dapat mengurangi latensi dan memastikan pengambilan keputusan lebih cepat, terutama dalam kondisi darurat seperti perubahan mendadak dalam suhu penyimpanan produk [4] (Elijah et al., 2018). Selain itu, integrasi *IoT* dengan kecerdasan buatan (AI) memberikan peluang baru untuk prediksi permintaan, optimasi logistik, dan pengelolaan rantai pasok yang lebih cerdas [7], [25].

Penerapan *IoT* dalam rantai pasok pertanian juga memiliki potensi untuk mendorong ketahanan pangan di tingkat nasional dan internasional. Dengan data yang lebih akurat dan real-time, pemerintah dan lembaga terkait dapat memantau kondisi rantai pasok secara keseluruhan, mengidentifikasi potensi masalah lebih awal, dan merancang kebijakan yang lebih responsif terhadap tantangan di sektor pangan. Sistem berbasis *IoT* juga mendukung pendekatan yang lebih inklusif dengan memberikan akses data kepada petani kecil, sehingga mereka dapat terlibat lebih aktif dalam ekosistem rantai pasok yang modern [7], [26].

Oleh karena itu, diperlukan desain jaringan *IoT* yang optimal untuk mendukung pelacakan produk pertanian dalam rantai pasok secara efisien dan aman. Desain ini harus mencakup elemen-elemen seperti teknologi komunikasi hemat daya, keamanan data, interoperabilitas perangkat, dan efisiensi energi. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan literatur sistematis (*Systematic Literature Review, SLR*) mengenai desain jaringan *IoT* untuk pelacakan produk pertanian. Studi ini akan mengeksplorasi elemen-elemen kunci dalam desain jaringan, tantangan implementasi, serta peluang untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan rantai pasok pertanian.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review (SLR)* untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan menyintesis literatur yang relevan terkait desain jaringan *IoT* untuk pelacakan produk pertanian dalam rantai pasok. Metode SLR dipilih karena memberikan kerangka kerja yang terstruktur untuk mengeksplorasi elemen kunci, tantangan, dan peluang yang berkaitan dengan topik ini. Proses ini dilakukan dengan mengikuti protokol penelitian yang ketat untuk memastikan transparansi, replikasi, dan validitas temuan.

2.2. Protokol SLR

Protokol SLR ini terdiri dari beberapa tahapan utama, yaitu:

2.2.1. Formulasi Pertanyaan Penelitian

Pertanyaan penelitian (*Research Questions, RQs*) dirumuskan untuk mengarahkan fokus kajian terhadap literatur yang relevan. Berikut adalah pertanyaan penelitian yang digunakan:

RQ1: Apa saja elemen utama dalam desain jaringan *IoT* untuk pelacakan produk pertanian dalam rantai pasok?

RQ2: Tantangan apa saja yang dihadapi dalam implementasi jaringan *IoT* di sektor pertanian?

RQ3: Strategi apa yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan jaringan *IoT* dalam rantai pasok pertanian?

2.2.2. Strategi Pencarian Literatur

Untuk mendapatkan literatur yang relevan, pencarian dilakukan pada basis data akademik terkemuka, seperti: *Scopus*, *IEEE Xplore*, *SpringerLink*, *ScienceDirect*, *Web of Science*. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian adalah: "*IoT network design*" AND "*agriculture supply chain*"; "*IoT challenges*" AND "*product tracking*"; "*Low-Power Wide-Area Networks*" AND "*agriculture IoT*"; "*Blockchain*" AND "*IoT*" AND "*supply chain*". Kombinasi operator Boolean (AND, OR) digunakan untuk memperluas cakupan pencarian.

2.2.3. Kriteria Pencarian Literatur

- Artikel jurnal yang dipublikasikan dalam rentang waktu 2014–2024.

- Artikel peer-reviewed yang membahas *IoT* dalam rantai pasok pertanian atau pelacakan produk.
- Artikel yang berfokus pada desain jaringan *IoT*, teknologi komunikasi, atau aplikasi rantai pasok.

2.2.4. Seleksi Literatur

Proses seleksi dilakukan dalam tiga tahap:

- Screening Judul dan Abstrak: Artikel dengan judul atau abstrak yang tidak relevan dihapus dari daftar.
- Evaluasi Teks Penuh: Artikel yang memenuhi kriteria dianalisis secara penuh untuk memastikan relevansi.
- Pengkodean dan Klasifikasi: Artikel yang lolos seleksi dikategorikan berdasarkan elemen desain, tantangan, dan strategi implementasi.

2.2.5. Analisis Data

Data dari artikel yang terpilih dianalisis menggunakan metode sintesis tematik untuk menjawab pertanyaan penelitian. Sintesis ini mencakup:

- Identifikasi Elemen Kunci: Elemen-elemen utama dalam desain jaringan *IoT*.
- Tantangan Implementasi: Hambatan teknis, ekonomi, dan operasional dalam penerapan *IoT*.
- Strategi Mitigasi: Solusi untuk meningkatkan efisiensi dan keamanan jaringan.

III. HASIL PENELITIAN

3.1. Elemen Utama dalam Desain Jaringan *IoT*

Dari analisis beberapa artikel yang dievaluasi, terdapat lima elemen utama dalam desain jaringan *IoT* untuk pelacakan produk pertanian dalam rantai pasok:

3.1.1. Teknologi Komunikasi:

- *Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN)* seperti *LoRaWAN* dan *NB-IoT* menjadi pilihan dominan karena cakupan luas dan konsumsi daya rendah, khususnya untuk wilayah pedesaan [19], [20], [21], [22].
- Teknologi berbasis Wi-Fi dan 5G digunakan pada wilayah dengan infrastruktur jaringan yang lebih baik untuk mendukung transfer data berkecepatan tinggi [4].
- Protokol komunikasi seperti *MQTT* dan *CoAP* memainkan peran penting dalam memastikan interoperabilitas antar perangkat *IoT* dari berbagai vendor [1], [7].

3.1.2. Arsitektur Jaringan:

Desain lima lapisan digunakan secara luas [27], [28]:

- Lapisan pertama adalah *Physical/Perception Layer*: sensor, aktuator, dan perangkat *IoT* lainnya di lapisan terbawah, yang berfungsi untuk mengumpulkan data dari lingkungan.
- Lapisan kedua adalah *Edge/Network Layer*: konektivitas dengan menggunakan teknologi seperti *LoRaWAN*, *Wi-Fi*, *Cellular*, *GPS*, dan protokol komunikasi lainnya untuk menghubungkan perangkat dengan sistem. Fokusnya adalah pada pengiriman data dengan efisiensi tinggi.
- Lapisan ketiga adalah *Fog Layer*: perantara antara edge dan cloud dengan menyediakan pemrosesan data lokal menggunakan protokol seperti *HTTP*, *MQTT*, *CoAP*, dan *DDS*. *Fog layer* membantu mengurangi latensi dan meningkatkan efisiensi.
- Lapisan keempat adalah *Application Layer*: Lapisan ini menyediakan layanan untuk pengguna akhir dengan memanfaatkan protokol komunikasi seperti *MQTT*, *HTTP*, *WebSocket*, *CoAP*, *AMQP*, *XMPP*, dan *DDS*. Contoh penggunaannya adalah aplikasi untuk pemantauan produk secara real-time.
- Lapisan kelima adalah *Cloud Layer*: Lapisan ini menyediakan kapasitas penyimpanan dan analitik data skala besar menggunakan teknologi seperti *HTTP* dan *REST API*. *Cloud* bertanggung jawab untuk pemrosesan data terpusat dan pengambilan keputusan berbasis analitik.

3.1.3. Keamanan dan Privasi Data:

Keamanan dan privasi data dalam jaringan *IoT* [11], [27], [29], [30], [31], [32]

- Sistem enkripsi seperti *AES-256 (Advanced Encryption Standard)* adalah enkripsi yang banyak digunakan untuk menjaga kerahasiaan data. *TLS/SSL (Transport Layer Security)* adalah enkripsi untuk protokol komunikasi seperti *MQTT* dan *HTTP*.
- Autentikasi dan otorisasi bertujuan untuk memastikan hanya perangkat dan pengguna sah yang dapat mengakses jaringan. Sertifikat Digital (*Public Key Infrastructure*): Memberikan autentikasi unik untuk perangkat. *Two-Factor Authentication (2FA)*: Lapisan keamanan tambahan untuk pengguna.

3.1.4. Efisiensi Energi:

Efisiensi energi dalam jaringan *IoT* [5], [23], [33]

- Modul hemat daya dan algoritma *duty cycling* digunakan untuk memperpanjang masa pakai baterai perangkat

IoT di wilayah terpencil.

- Penggunaan energi surya untuk mendukung operasional perangkat *IoT* di lokasi tanpa akses listrik.

3.1.5 Interoperabilitas:

- Standar komunikasi yang kompatibel, seperti *MQTT* dan *CoAP*, memungkinkan integrasi perangkat dari berbagai vendor dalam satu jaringan *IoT* [7], [27], [28].

3.2. Tantangan dalam Implementasi Jaringan *IoT*

Lima tantangan utama dalam implementasi jaringan *IoT* di sektor pertanian diidentifikasi:

3.2.1. Keterbatasan Infrastruktur Komunikasi:

- Banyak wilayah pedesaan memiliki keterbatasan dalam infrastruktur komunikasi, terutama di negara berkembang. Teknologi *LPWAN* membantu mengatasi tantangan ini meskipun memiliki keterbatasan dalam kapasitas data [34], [35], [36].

3.2.2. Keberlanjutan dan Dampak Lingkungan:

- Meskipun *IoT* dapat membantu meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dalam rantai pasokan pertanian, masih ada kekhawatiran tentang jejak lingkungan dari perangkat *IoT* itu sendiri, termasuk konsumsi energi dan limbah elektronik yang dihasilkan oleh perangkat yang sudah usang atau rusak [3], [37], [38], [39]

3.2.3. Kompleksitas Manajemen Data:

- Volume data yang besar membutuhkan infrastruktur penyimpanan dan analitik yang canggih. *Cloud computing* menjadi solusi utama, tetapi *edge computing* diperlukan untuk mengurangi latensi dan beban jaringan [40], [41], [42], [43], [44], [45].

3.2.4. Biaya Implementasi:

- Biaya untuk implementasi teknologi *IoT* dalam rantai pasokan pertanian bisa sangat tinggi, termasuk perangkat keras (sensor, gerbang), perangkat lunak, dan biaya operasional seperti perawatan dan pemeliharaan. Petani kecil sering kali tidak memiliki kapasitas finansial untuk mengadopsi teknologi *IoT* lintas batas [46], [47], [48], [49], [50], [51]

3.2.5. Literasi Teknologi dan Keterampilan Pengguna

- Implementasi *IoT* dalam rantai pasokan pertanian membutuhkan tingkat literasi digital dan keterampilan teknis yang memadai dari para pengguna, termasuk petani, manajer logistik, dan distributor. Banyak petani, terutama di negara berkembang, masih menghadapi kesulitan dalam memahami cara kerja teknologi ini dan bagaimana mengintegrasikannya ke dalam operasi pertanian mereka [46], [50], [52].

3.3. Strategi untuk Meningkatkan Efisiensi dan Keandalan Jaringan *IoT* dalam Rantai Pasok Pertanian

Strategi yang ditemukan dari literatur meliputi:

3.3.1. Penggunaan *Edge Computing*:

- *Edge computing* memproses data secara lokal di dekat sumber (perangkat *IoT*) sebelum mengirimkan ke *cloud*. Manfaat: *edge computing* mengurangi latensi dengan memproses data secara lokal, memungkinkan pengambilan keputusan lebih cepat dalam kondisi kritis seperti transportasi produk dan mengurangi beban pada jaringan utama dan penggunaan *bandwidth* [25], [53], [54]

3.3.2. *Blockchain* untuk Keamanan dan Transparansi:

- *Blockchain* menciptakan sistem rekam jejak yang aman dan transparan untuk meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap produk pertanian. Manfaat: memastikan keamanan dan keandalan data, karena catatan transaksi tidak dapat dimanipulasi dan meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap produk melalui transparansi asal-usul produk.[7], [10], [12], [13], [14], [32], [55], [56], [57]

3.3.3. Optimasi Protokol Jaringan:

- Penggunaan protokol komunikasi yang ringan dan efisien seperti *MQTT*, *CoAP*, dan *HTTP*. Manfaat: meningkatkan efisiensi komunikasi antar perangkat dengan meminimalkan konsumsi *bandwidth* dan memastikan interoperabilitas antar perangkat *IoT* dari berbagai vendor [27], [28], [58].

3.3.4. Teknologi Hemat Energi:

- Penerapan perangkat *IoT* dengan teknologi hemat daya dan sumber daya energi terbarukan seperti solar. Manfaat: memperpanjang masa pakai perangkat *IoT* di lokasi terpencil tanpa akses listrik dan mengurangi biaya operasional dalam jangka panjang [23], [33], [59].

3.3.5. Pemanfaatan *Artificial Intelligence (AI)* dan *Analitik Data*

- Mengintegrasikan kecerdasan buatan untuk prediksi dan optimasi proses rantai pasok. Manfaat: memungkinkan prediksi kebutuhan produk, deteksi dini masalah, dan optimasi logistik[12], [36], [42], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66].

IV. DISKUSI

4.1. Analisis Elemen Utama dalam Desain Jaringan *IoT*

Elemen utama seperti teknologi komunikasi, arsitektur jaringan, keamanan data, efisiensi energi, dan interoperabilitas menjadi fondasi utama dalam desain jaringan *IoT*. Teknologi seperti *Low-Power Wide-Area Networks/LPWAN* (LoRaWAN, NB-*IoT*) memberikan solusi yang ideal untuk wilayah pedesaan karena konsumsi daya rendah dan jangkauan luas [19], [20], [21], [22], sementara teknologi berbasis Wi-Fi dan 5G memberikan dukungan data berkecepatan tinggi di daerah dengan infrastruktur komunikasi yang lebih baik [4]. Protokol komunikasi seperti *MQTT* dan *CoAP* juga memainkan peran kunci dalam memastikan interoperabilitas perangkat *IoT* lintas vendor [1], [7].

Desain arsitektur jaringan, ada lima lapisan memberikan kerangka kerja yang holistik, mencakup pengumpulan data (*Physical Layer*), konektivitas jaringan (*Edge/Network Layer*), pemrosesan lokal (*Fog Layer*), layanan aplikasi (*Application Layer*), dan analitik skala besar (*Cloud Layer*) [27], [28]. Arsitektur ini memungkinkan efisiensi dalam pengumpulan, pengolahan, dan analisis data, yang kritis untuk pelacakan produk pertanian secara real-time.

Namun, keberhasilan desain ini sangat tergantung pada implementasi keamanan dan privasi data yang kuat [11], [27], [29], [30], [31], [32]. Penggunaan enkripsi seperti *AES-256* dan autentikasi berbasis sertifikat digital sangat penting untuk melindungi data dari ancaman siber. Selain itu, upaya efisiensi energi seperti algoritma hemat daya dan penggunaan energi terbarukan, seperti solar, mendukung keberlanjutan operasional perangkat *IoT* di lokasi terpencil [5], [23], [33].

4.2. Tantangan Implementasi dan Solusi yang Diusulkan

Meskipun manfaat *IoT* jelas, penelitian ini menyoroti tantangan utama yang harus diatasi. Keterbatasan infrastruktur komunikasi menjadi hambatan besar di wilayah pedesaan, di mana teknologi LPWAN sering menjadi satu-satunya pilihan meskipun memiliki keterbatasan kapasitas data [34], [35], [36]. Selain itu, kekhawatiran terkait jejak lingkungan perangkat *IoT*, termasuk konsumsi energi dan limbah elektronik, membutuhkan perhatian lebih untuk memastikan keberlanjutan sistem *IoT* [3], [37], [38], [39].

Kompleksitas manajemen data juga menjadi tantangan besar karena volume data yang besar memerlukan kapasitas penyimpanan dan analitik canggih. *Cloud computing* sering kali digunakan sebagai solusi utama, namun pendekatan ini dapat meningkatkan latensi dan ketergantungan pada koneksi internet. Untuk mengatasi hal ini, *edge computing* menjadi solusi alternatif yang menjanjikan dengan memindahkan sebagian pemrosesan data ke perangkat lokal [40], [41], [42], [43], [44], [45].

Tantangan lain yang signifikan adalah biaya implementasi, yang mencakup perangkat keras, perangkat lunak, dan biaya operasional, terutama bagi petani kecil yang sering kali memiliki keterbatasan sumber daya [46], [47], [48], [49], [50], [51]. Selain itu, literasi teknologi yang rendah di kalangan pengguna, terutama di negara berkembang, menambah hambatan dalam mengadopsi teknologi ini secara luas [46], [50], [52].

4.3. Strategi untuk Mengatasi Tantangan dan Meningkatkan Efisiensi

Penelitian ini mengidentifikasi beberapa strategi untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan jaringan *IoT* dalam rantai pasok pertanian. *Edge computing* menjadi salah satu pendekatan utama untuk mengurangi latensi dan meningkatkan efisiensi operasional dengan memproses data di dekat sumbernya. Strategi ini sangat relevan untuk aplikasi seperti transportasi produk pertanian, di mana keputusan real-time diperlukan untuk mencegah kerusakan produk [25], [53], [54].

Blockchain menawarkan solusi yang kuat untuk meningkatkan keamanan dan transparansi data dalam rantai pasok. Dengan menciptakan catatan data yang tidak dapat dimanipulasi, *blockchain* tidak hanya melindungi integritas data tetapi juga meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap asal-usul produk [7], [10], [12], [13], [14], [32], [55], [56], [57].

Optimasi protokol komunikasi seperti *MQTT* dan *CoAP* juga menjadi langkah kunci untuk memastikan interoperabilitas perangkat *IoT* dari berbagai vendor, mengurangi konsumsi *bandwidth*, dan meningkatkan efisiensi komunikasi [27], [28], [58]. Selain itu, teknologi hemat energi seperti modul surya dan algoritma penghematan daya memberikan solusi keberlanjutan untuk perangkat *IoT* di lokasi terpencil tanpa akses listrik [23], [33], [59].

Integrasi *Artificial Intelligence (AI)* dan analitik data juga dapat mendukung prediksi kebutuhan produk, deteksi dini masalah, dan optimasi logistik. Hal ini memberikan peluang baru untuk menciptakan rantai pasok yang lebih cerdas dan responsif terhadap perubahan kebutuhan pasar [12], [36], [42], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66].

4.4. Implikasi Praktis dan Teoretis

Secara praktis, temuan ini memberikan wawasan bagi pengembang dan pemangku kepentingan tentang elemen utama yang harus diprioritaskan dalam desain jaringan *IoT* untuk rantai pasok pertanian. Secara teoretis, penelitian ini memperkuat literatur yang ada dengan menyoroti pentingnya integrasi teknologi canggih seperti *edge computing*, *blockchain*, dan *AI* dalam

mengatasi tantangan *IoT*.

4.5. Rekomendasi untuk Penelitian Selanjutnya

Untuk keberhasilan implementasi *IoT* dalam rantai pasok pertanian, fokus harus diberikan pada:

- Investasi Infrastruktur: Meningkatkan jaringan komunikasi di wilayah pedesaan.
- Pendidikan dan Pelatihan: Meningkatkan literasi digital di kalangan petani dan pengguna *IoT*.
- Inovasi Teknologi Hemat Energi: Mengembangkan perangkat *IoT* yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menggarisbawahi pentingnya desain jaringan *IoT* yang efektif untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan rantai pasok pertanian. Elemen utama yang diidentifikasi, seperti teknologi komunikasi berbasis *LPWAN*, arsitektur jaringan lima lapisan, protokol interoperabilitas seperti *MQTT* dan *CoAP*, efisiensi energi, serta keamanan data, menjadi fondasi kritis dalam mendukung implementasi *IoT* yang optimal. Teknologi seperti *LPWAN* menawarkan solusi praktis untuk wilayah pedesaan, sementara penggunaan energi terbarukan dan algoritma hemat daya membantu memastikan keberlanjutan perangkat *IoT*.

Namun, tantangan signifikan, termasuk keterbatasan infrastruktur komunikasi, kompleksitas manajemen data, biaya implementasi yang tinggi, dan rendahnya literasi teknologi, memerlukan perhatian khusus. Solusi seperti *edge computing*, *blockchain*, dan integrasi *AI* menawarkan pendekatan inovatif untuk mengatasi tantangan ini, sekaligus meningkatkan keandalan, keamanan, dan efisiensi operasional jaringan *IoT* dalam rantai pasok pertanian.

Secara praktis, temuan penelitian ini memberikan pedoman bagi pengembang, praktisi, dan pemangku kepentingan dalam mendesain dan mengimplementasikan sistem *IoT* yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan. Secara teoretis, penelitian ini memperkuat literatur yang ada dengan menyoroti pentingnya strategi teknologi seperti *blockchain* dan *edge computing* dalam mendukung keberhasilan *IoT*.

Untuk mendukung keberlanjutan implementasi *IoT* di sektor pertanian, rekomendasi untuk penelitian selanjutnya mencakup investasi pada infrastruktur komunikasi di wilayah pedesaan, peningkatan literasi digital di kalangan petani, serta pengembangan perangkat *IoT* yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan. Dengan pendekatan yang terencana dan inovatif, *IoT* dapat memainkan peran sentral dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan rantai pasok pertanian di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Villa-Henriksen, G. T. C. Edwards, L. A. Pesonen, O. Green, and C. A. G. Sørensen, "Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential," *Biosyst Eng*, vol. 191, pp. 60–84, 2020, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013.
- [2] R. Sharma, V. Mishra, and S. Srivastava, "Enhancing Crop Yields through *IoT*-Enabled Precision Agriculture," in *2023 International Conference on Disruptive Technologies, ICDT 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 279–283. doi: 10.1109/ICDT57929.2023.10151422.
- [3] H. Shahab, M. Iqbal, A. Sohaib, F. Ullah Khan, and M. Waqas, "*IoT*-based agriculture management techniques for sustainable farming: A comprehensive review," May 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.compag.2024.108851.
- [4] O. Elijah, T. A. Rahman, I. Orikumhi, C. Y. Leow, and M. N. Hindia, "An Overview of Internet of Things (*IoT*) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges," *IEEE Internet Things J*, vol. 5, no. 5, pp. 3758–3773, Oct. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2844296.
- [5] A. Tzounis, N. Katsoulas, T. Bartzanas, and C. Kittas, "Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges," Dec. 01, 2017, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007.
- [6] A. Y. A. B. Ahmad, N. Verma, N. M. Sarhan, E. M. Awwad, A. Arora, and V. O. Nyangaresi, "An *IoT* and Blockchain-Based Secure and Transparent Supply Chain Management Framework in Smart Cities Using Optimal Queue Model," *IEEE Access*, vol. 12, no. March, pp. 51752–51771, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3376605.
- [7] S. A. Bhat, N. F. Huang, I. B. Sofi, and M. Sultan, "Agriculture-Food Supply Chain Management Based on Blockchain and *IoT*: A Narrative on Enterprise Blockchain Interoperability," Jan. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/agriculture12010040.
- [8] J. Khoo, S. Haw, N. Su, and S. Mulafer, "Kiwi Fruit *IoT* Shelf Life Estimation during Transportation with Cloud Computing," in *3rd IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology, IICAIET 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2021. doi: 10.1109/IICAIET51634.2021.9573602.
- [9] J. Gillespie *et al.*, "Real-Time Anomaly Detection in Cold Chain Transportation Using *IoT* Technology," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/su15032255.

- [10] N. M. Chacko, V. G. Narendra, M. Balachandra, and S. Rathinam, "Exploring *IoT*-Blockchain Integration in Agriculture: An Experimental Study," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 130439–130450, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3334726.
- [11] A. Vangala, A. K. Das, N. Kumar, and M. Alazab, "Smart Secure Sensing for *IoT*-Based Agriculture: Blockchain Perspective," *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 16, pp. 17591–17607, Aug. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3012294.
- [12] A. N. Jasim and L. C. Fourati, "Agriculture 4.0 from *IoT*, Artificial Intelligence, Drone, & Blockchain Perspectives," in *Proceedings - International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 262–267. doi: 10.1109/DeSE58274.2023.10099927.
- [13] F. Marzougui, M. Elleuch, and M. Kherallah, "Literature Review of *IoT* and Blockchain Technology in Agriculture," in *2023 24th International Arab Conference on Information Technology, ACIT 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/ACIT58888.2023.10453873.
- [14] M. R. M. Kassim, "Applications of *IoT* and Blockchain in Smart Agriculture: Architectures and Challenges," in *2022 IEEE International Conference on Computing, ICOCO 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 253–258. doi: 10.1109/ICOCO56118.2022.10031697.
- [15] G. Funchal, V. Melo, and P. Leitao, "Cloud-enabled Integration of *IoT* Applications within the Farm to Fork to Reduce the Food Waste," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 824–829. doi: 10.1109/ISIE51582.2022.9831694.
- [16] T. P. da Costa *et al.*, "A Systematic Review of Real-Time Monitoring Technologies and Its Potential Application to Reduce Food Loss and Waste: Key Elements of Food Supply Chains and *IoT* Technologies," Jan. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/su15010614.
- [17] M. Lianguang, "Study on supply-chain of modern agricultural products based on *IOT* in order to guarantee the quality and safety," *Advance Journal of Food Science and Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 520–526, 2014, doi: 10.19026/ajfst.6.65.
- [18] S. Piramuthu, "*IoT*, Environmental Sustainability, Agricultural Supply Chains," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2022, pp. 811–816. doi: 10.1016/j.procs.2022.08.098.
- [19] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, Apr. 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [20] B. Citoni, F. Fioranelli, M. A. Imran, and Q. H. Abbasi, "Internet of Things and LoRaWAN-Enabled Future Smart Farming," *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 2, no. 4, pp. 14–19, Feb. 2020, doi: 10.1109/IoTm.0001.1900043.
- [21] V. V. Das, A. Sathyan, and D. S. Divya, "Establishing LoRa based Local Agri-Sensor Network through Sensor plugin modules and LoRaWAN Data concentrator for extensive Agriculture Automation," in *INDICON 2022 - 2022 IEEE 19th India Council International Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/INDICON56171.2022.10040050.
- [22] A. Arnaud *et al.*, "A Model for a Dense LoRaWAN Farm-Area Network in the Agribusiness," *IEEE Transactions on AgriFood Electronics*, pp. 1–9, Jul. 2024, doi: 10.1109/tafe.2024.3422843.
- [23] C. Rodriguez-Pabon, G. Riva, C. Zerbini, J. Ruiz-Rosero, G. Ramirez-Gonzalez, and J. C. Corrales, "An Adaptive Sampling Period Approach for Management of *IoT* Energy Consumption: Case Study Approach," *Sensors*, vol. 22, no. 4, pp. 1–22, 2022, doi: 10.3390/s22041472.
- [24] S. A. Bhat, N. F. Huang, I. B. Sofi, and M. Sultan, "Agriculture-Food Supply Chain Management Based on Blockchain and *IoT*: A Narrative on Enterprise Blockchain Interoperability," Jan. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/agriculture12010040.
- [25] L. Liu *et al.*, "Smart Agricultural Technology An Edge-computing flow meter reading recognition algorithm optimized for agricultural *IoT* network," *Smart Agricultural Technology*, vol. 5, no. April, p. 100236, 2023, doi: 10.1016/j.atech.2023.100236.
- [26] J. Han, L. Li, Z. Sun, X. Feng, N. Lin, and J. Ruan, "An integrative decision-making model for the Internet of Things-enabled supply chains of fresh agri-product," *Int J Prod Res*, vol. 61, no. 13, pp. 4358–4373, 2023, doi: 10.1080/00207543.2022.2131927.
- [27] S. Rudrakar and P. Rughani, "*IoT* based Agriculture (Ag-*IoT*): A detailed study on Architecture, Security and Forensics," 2023, *China Agricultural University*. doi: 10.1016/j.inpa.2023.09.002.
- [28] R. K. Singh, R. Berkvens, and M. Weyn, "AgriFusion: An Architecture for *IoT* and Emerging Technologies Based on a Precision Agriculture Survey," 2021, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116814.
- [29] M. Hazrati, R. Dara, and J. Kaur, "On-Farm Data Security: Practical Recommendations for Securing Farm Data," *Front Sustain Food Syst*, vol. 6, Jun. 2022, doi: 10.3389/fsufs.2022.884187.
- [30] 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.
- [31] K. Demestichas, N. Peppas, and T. Alexakis, "Survey on security threats in agricultural *IoT* and smart farming," Nov. 02, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/s20226458.

- [32] A. A. Aliyu and J. Liu, "Blockchain-Based Smart Farm Security Framework for the Internet of Things," *Sensors*, vol. 23, no. 18, Sep. 2023, doi: 10.3390/s23187992.
- [33] G. Nota, F. D. Nota, D. Peluso, and A. T. Lazo, "Energy efficiency in Industry 4.0: The case of batch production processes," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 16, Aug. 2020, doi: 10.3390/su12166631.
- [34] D. Dahiya and S. K. Mathew, "IT infrastructure capability and eGovernment system performance: an empirical study," *Transforming Government: People, Process and Policy*, vol. 12, no. 1, pp. 16–38, Jun. 2018, doi: 10.1108/TG-07-2017-0038.
- [35] S. Danshyna, A. Nechausov, S. Andrieiev, and V. Cheranovskiy, "INFORMATION TECHNOLOGY FOR ANALYSIS OF WASTE MANAGEMENT OBJECTS INFRASTRUCTURE," *Radioelectronic and Computer Systems*, vol. 2022, no. 2, pp. 97–107, 2022, doi: 10.32620/reks.2022.2.08.
- [36] R. Rajora, A. Rajora, R. Singh, and R. Gupta, "IoT Integration in Agricultural Infrastructure: From Fields to Clouds," in *2023 IEEE International Conference on Research Methodologies in Knowledge Management, Artificial Intelligence and Telecommunication Engineering, RMKMATE 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/RMKMATE59243.2023.10369026.
- [37] A. Maroli, V. S. Narwane, and B. B. Gardas, "Applications of IoT for achieving sustainability in agricultural sector: A comprehensive review," Nov. 15, 2021, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113488.
- [38] S. Piramuthu, "IoT, Environmental Sustainability, Agricultural Supply Chains," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2022, pp. 811–816. doi: 10.1016/j.procs.2022.08.098.
- [39] W. Purcell, T. Neubauer, and K. Mallinger, "Digital Twins in agriculture: challenges and opportunities for environmental sustainability," Apr. 01, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.cosust.2022.101252.
- [40] T. Alahmad, M. Neményi, and A. Nyéki, "Applying IoT Sensors and Big Data to Improve Precision Crop Production: A Review," Oct. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/agronomy13102603.
- [41] S. A. Bhat and N. F. Huang, "Big Data and AI Revolution in Precision Agriculture: Survey and Challenges," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 110209–110222, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3102227.
- [42] N. N. Misra, Y. Dixit, A. Al-Mallahi, M. S. Bhullar, R. Upadhyay, and A. Martynenko, "IoT, Big Data, and Artificial Intelligence in Agriculture and Food Industry," *IEEE Internet Things J*, vol. 9, no. 9, pp. 6305–6324, May 2022, doi: 10.1109/JIOT.2020.2998584.
- [43] V. Pachouri, S. Pandey, A. Gehlot, P. Negi, G. Chhabra, and K. Joshi, "Agriculture 4.0: Inculcation of Big Data and Internet of Things in Sustainable Farming," in *Proceedings of IEEE InC4 2023 - 2023 IEEE International Conference on Contemporary Computing and Communications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/InC457730.2023.10263261.
- [44] S. Pandey, A. Gehlot, V. Pandey, N. Kathuria, G. Chhabra, and P. K. Malik, "Subsuming AI, IoT and Big Data in Smart Farm Practices," in *Proceedings of 5th International Conference on 2023 Devices for Integrated Circuit, DevIC 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 229–232. doi: 10.1109/DevIC57758.2023.10134816.
- [45] Q. Wang and Z. Mu, "Risk monitoring model of intelligent agriculture Internet of Things based on big data," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102654.
- [46] A. M. Aamer and M. A. Al-awlaqi, "The internet of things in the food supply chain : adoption challenges," vol. 28, no. 8, pp. 2521–2541, 2021, doi: 10.1108/BIJ-07-2020-0371.
- [47] A. (Addis) Benyam, T. Soma, and E. Fraser, "Digital agricultural technologies for food loss and waste prevention and reduction: Global trends, adoption opportunities and barriers," Nov. 10, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129099.
- [48] P. Jayashankar, S. Nilakanta, W. J. Johnston, P. Gill, and R. Burres, "IoT adoption in agriculture: the role of trust, perceived value and risk," *Journal of Business and Industrial Marketing*, vol. 33, no. 6, pp. 804–821, Oct. 2018, doi: 10.1108/JBIM-01-2018-0023.
- [49] S. S. Kamble, A. Gunasekaran, H. Parekh, and S. Joshi, "Modeling the internet of things adoption barriers in food retail supply chains," *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 48, pp. 154–168, May 2019, doi: 10.1016/j.jretconser.2019.02.020.
- [50] P. Opasvitayarux, S. O. Setamanit, N. Assarut, and K. Visamitanan, "Antecedents of IoT adoption in food supply chain quality management: an integrative model," *Journal of International Logistics and Trade*, vol. 20, no. 3, pp. 135–170, 2022, doi: 10.1108/JILT-05-2022-0002.
- [51] M. Rajabzadeh and H. Fatorachian, "Modelling Factors Influencing IoT Adoption: With a Focus on Agricultural Logistics Operations," Dec. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/smartcities6060145.
- [52] S. Taj, A. S. Imran, Z. Kastrati, S. M. Daudpota, R. A. Memon, and J. Ahmed, "IoT-based supply chain management: A systematic literature review," Dec. 01, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.IoT.2023.100982.
- [53] F. S. Alamri, K. Haseeb, T. Saba, J. Lloret, and J. M. Jimenez, "Multimedia IoT-surveillance optimization model using mobile-edge authentic computing," *Mathematical Biosciences and Engineering*, vol. 20, no. 11, pp. 19174–19190, 2023, doi: 10.3934/mbe.2023847.

- [54] O. Debauche, S. Mahmoudi, and A. Guttadauria, "Article A New Edge Computing Architecture for *IoT* and Multimedia Data Management," *Information (Switzerland)*, vol. 13, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.3390/info13020089.
- [55] A. Vangala, A. K. Das, N. Kumar, and M. Alazab, "Smart Secure Sensing for *IoT*-Based Agriculture: Blockchain Perspective," *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 16, pp. 17591–17607, Aug. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3012294.
- [56] F. J. Ferrández-Pastor, J. Mora-Pascual, and D. Díaz-Lajara, "Agricultural traceability model based on *IoT* and Blockchain: Application in industrial hemp production," *J Ind Inf Integr*, vol. 29, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jii.2022.100381.
- [57] T. Alam, "Blockchain-Based Internet of Things: Review, Current Trends, Applications, and Future Challenges," Jan. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/computers12010006.
- [58] A. Yudidharma, N. Nathaniel, T. N. Gimli, S. Achmad, and A. Kurniawan, "A systematic literature review: Messaging protocols and electronic platforms used in the internet of things for the purpose of building smart homes," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2023, pp. 194–203. doi: 10.1016/j.procs.2022.12.127.
- [59] Z. Zhang, X. Y. Liu, and X. R. Zhang, "The role of artificial intelligence in energy aspects of super cold chain of agricultural products," Dec. 01, 2022, *John Wiley and Sons Ltd*. doi: 10.1002/er.8031.
- [60] T. Hashni, T. Amudha, and S. Ramakrishnan, "*IoT* & AI in Smart Farming: Implications and Challenges," in *7th International Conference on Communication and Electronics Systems, ICCES 2022 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 501–505. doi: 10.1109/ICCES54183.2022.9835812.
- [61] S. Anwarul, T. Misra, and D. Srivastava, "An *IoT* & AI-assisted Framework for Agriculture Automation," in *2022 10th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions), ICRITO 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ICRITO56286.2022.9964567.
- [62] O. El Ghati, O. Alaoui-Fdili, N. Alioua, O. Chahbouni, and W. Bouarifi, "An overview of the applications of AI-powered Visual *IoT* systems in agriculture," in *Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Advances in Data-Driven Analytics and Intelligent Systems, ADACIS 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/ADACIS59737.2023.10424223.
- [63] A. Subeesh and C. R. Mehta, "Automation and digitization of agriculture using artificial intelligence and internet of things," Jan. 01, 2021, *KeAi Communications Co*. doi: 10.1016/j.aiaa.2021.11.004.
- [64] R. Das, S. S. Bhatt, S. Kathuria, R. Singh, G. Chhabra, and P. K. Malik, "Artificial Intelligence and Internet of Things Based Technological Advancement in Domain of Horticulture 4.0," in *Proceedings of 5th International Conference on 2023 Devices for Integrated Circuit, DevIC 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 207–211. doi: 10.1109/DevIC57758.2023.10135061.
- [65] R. Singh, C. Prabha, and N. Sharma, "Artificial Internet of Things (*AIoT*) and its Momentous Impact and Challenges in Modern Agriculture," in *2023 International Conference on Integration of Computational Intelligent System, ICICIS 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/ICICIS56802.2023.10430232.
- [66] K. Sharma and S. K. Shivandu, "Integrating artificial intelligence and Internet of Things (*IoT*) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture," Jan. 01, 2024, *KeAi Communications Co*. doi: 10.1016/j.sintl.2024.100292.