

Transformasi Digital Pertanian Melalui Smart Agriculture: Perspektif Riset Informatika

Ahmad Hamdani ^{1)*} , Moh. Izzul Haq Ramadlani ²⁾ 

¹⁾ ²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ achmadhamdani789@gmail.com, ²⁾ mohizzulhaqramadlani@gmail.com

Abstrak

Transformasi digital di dalam sektor pertanian berkembang pesat melalui penerapan *smart agriculture* yang mengintegrasikan teknologi informatika seperti Internet of Things (IoT), big data, dan kecerdasan buatan untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas. Namun, adopsi teknologi ini masih harus menyesuaikan berbagai kendala, seperti dalam aspek infrastruktur dan literasi digital. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui peran teknologi informatika dalam mendukung transformasi digital pertanian serta merancang kerangka sistem smart agriculture yang terintegrasi. Penelitian menggunakan metode tinjauan pustaka dengan menggunakan pendekatan kualitatif-deskriptif, dengan cara pengumpulan dan analisis dari sumber ilmiah yang relevan, kemudian dilakukan analisis konseptual untuk menyusun model sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa smart agriculture terdiri dari lima lapisan utama, yaitu pengumpulan data, komunikasi, pemrosesan data, aplikasi, dan otomatisasi. Integrasi teknologi tersebut mampu menghasilkan informasi real-time seperti prediksi panen, rekomendasi irigasi, serta deteksi hama, yang meningkatkan akurasi pengambilan keputusan dan efisiensi penggunaan sumber daya. Selain itu, sistem memiliki mekanisme *feedback loop* yang memungkinkan peningkatan kinerja secara berkelanjutan. Penelitian ini menegaskan bahwa smart agriculture berpotensi besar dalam mendukung transformasi digital pertanian, meskipun implementasinya memerlukan dukungan infrastruktur dan peningkatan kapasitas pengguna. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan sistem yang lebih sederhana dan adaptif terhadap kondisi lokal.

Kata Kunci: Smart Agriculture, Internet of Things, Transformasi Digital, Kecerdasan Buatan, Sistem Informasi Pertanian

Article history: Received 5 April 2026, first decision 22 April 2026, accepted 22 August 2026, available online 28 October 2026

I. PENDAHULUAN

Transformasi digital sudah menjadi faktor utama dalam berbagai sektor kehidupan, termasuk sektor pertanian yang selama ini identik dengan praktik konvensional dan ketergantungan pada faktor alam [1]. Dalam beberapa dekade terakhir, perkembangan teknologi informatika telah membuka kesempatan baru untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutan pertanian melalui konsep smart agriculture [2]. Konsep ini mengintegrasikan berbagai teknologi seperti Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan (Artificial Intelligence), dan big data, serta sistem informasi untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data [3]. Dalam konteks pengantar riset informatika, smart agriculture menjadi salah satu bidang yang strategis untuk dikaji karena memadukan aspek teknologi dengan kebutuhan fundamental manusia, yaitu pangan [4].

Permasalahan utama dalam sektor pertanian saat ini tidak hanya berkaitan dengan keterbatasan lahan dan perubahan iklim, tetapi juga rendahnya adopsi teknologi oleh petani, terutama di negara berkembang. Praktik pertanian tradisional sering kali tidak mampu mengoptimalkan hasil produksi karena minimnya informasi terkait kondisi tanah, cuaca, maupun kebutuhan tanaman secara spesifik. Di sisi lain, pertumbuhan populasi global yang terus meningkat menuntut adanya peningkatan produksi pangan yang signifikan. Hal ini menciptakan urgensi untuk melakukan transformasi digital dalam sektor pertanian sebagai solusi yang tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga efisiensi penggunaan sumber daya.

Smart agriculture hadir sebagai pendekatan inovatif yang memanfaatkan teknologi informatika untuk menjawab tantangan tersebut. Melalui penggunaan sensor, sistem monitoring berbasis real-time, serta analisis data yang canggih, petani dapat memperoleh informasi yang lebih akurat mengenai kondisi lahan dan tanaman mereka [5]. Sebagai contoh, sensor kelembaban tanah dapat membantu menentukan waktu irigasi yang optimal, sementara analisis data cuaca dapat digunakan untuk memprediksi risiko gagal panen [6]. Dengan demikian, keputusan yang diambil tidak lagi berdasarkan intuisi semata, melainkan didukung oleh data yang valid dan terukur [7]. Dari perspektif riset informatika, smart agriculture menawarkan berbagai peluang penelitian yang luas dan multidisipliner [8]. Penelitian dapat difokuskan pada pengembangan algoritma prediksi hasil panen, optimasi penggunaan air dan pupuk, hingga

* Ahmad Hamdani

perancangan sistem informasi pertanian yang terintegrasi [9]. Selain itu, aspek keamanan data, interoperabilitas sistem, serta kemudahan penggunaan teknologi bagi petani juga menjadi tantangan tersendiri yang perlu diteliti lebih lanjut. Oleh sebab itu, pengantar riset informatika dalam konteks smart agriculture tidak hanya membahas penerapan teknologi, tetapi juga menekankan pada metodologi penelitian yang sistematis untuk menghasilkan solusi yang efektif dan berkelanjutan [10].

Lebih jauh lagi, transformasi digital dalam pertanian tidak dapat dilepaskan dari peran ekosistem teknologi yang melibatkan berbagai kepentingan, mulai dari pemerintah, akademisi, hingga sektor industri [11]. Kolaborasi antara pihak-pihak tersebut sangat diperlukan untuk memastikan bahwa inovasi yang dihasilkan dapat diterapkan secara nyata di lapangan. Dalam hal tersebut, riset informatika berperan sebagai jembatan yang menghubungkan kebutuhan praktis di sektor pertanian dengan perkembangan teknologi yang terus berkembang [12]. Dengan pendekatan yang tepat, hasil penelitian tidak hanya berhenti di sini saja, tapi juga bisa memberikan dampak nyata bagi Masyarakat [13]. Namun demikian, implementasi smart agriculture juga menghadapi berbagai kendala, seperti keterbatasan teknologi, dan juga rendahnya literasi digital di kalangan para petani, dan biaya investasi yang relatif tinggi [14]. Oleh karena itu, harus ada pendekatan yang adaptif dan kontekstual untuk mengembangkan solusi berbasis informatika agar dapat diterima dan dimanfaatkan secara optimal [15]. Penelitian dalam bidang ini juga perlu mempertimbangkan aspek sosial dan ekonomi, sehingga teknologi yang dikembangkan tidak hanya canggih secara teknis, tetapi juga relevan dengan kondisi pengguna [16].

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa transformasi digital pertanian melalui smart agriculture merupakan topik yang sangat relevan dalam pengantar riset informatika [17]. Penelitian di bidang ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, tetapi juga memiliki potensi besar untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat, khususnya petani [18]. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang mendalam dan sistematis untuk memahami berbagai aspek yang terlibat dalam smart agriculture, mulai dari teknologi yang digunakan hingga dampaknya terhadap sektor pertanian secara keseluruhan. Dengan demikian, diharapkan penelitian ini dapat memberi kontribusi yang signifikan untuk mendorong transformasi digital di dalam sektor pertanian menjadi sistem yang lebih maju, modern, efisien, dan berkelanjutan [19].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Konsep *smart agriculture* berkembang sebagai respon terhadap kebutuhan modernisasi sektor pertanian melalui integrasi teknologi informatika [20]. Smart agriculture dipahami sebagai pendekatan pertanian yang memanfaatkan teknologi digital untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutan [21]. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada penggunaan alat, tetapi juga dengan memanfaatkan data sebagai dasar utama dalam pengambilan Keputusan [22]. Dalam konteks ini, sistem pertanian tidak lagi berjalan secara konvensional, melainkan berbasis informasi yang terukur dan real-time [23]. Salah satu komponen utama dalam smart agriculture adalah Internet of Things (IoT) [24]. IoT memungkinkan berbagai perangkat seperti sensor dan aktuator untuk saling terhubung dan bertukar data secara otomatis [25]. Sensor yang ditempatkan di lahan pertanian dapat mengukur berbagai parameter seperti kelembaban tanah, suhu udara, intensitas cahaya, dan kadar nutrisi. Data yang dihasilkan kemudian dikirim ke sistem pusat untuk dianalisis [26]. Dengan adanya IoT, proses monitoring yang sebelumnya dikerjakan secara manual dapat dilakukan secara otomatis dan berkelanjutan, sehingga meningkatkan akurasi dan efisiensi [27].

Selain IoT, pemanfaatan big data menjadi elemen penting dalam smart agriculture [28]. Data yang dikumpulkan dari berbagai sumber, seperti sensor lapangan, data cuaca, dan riwayat produksi, dapat diolah untuk menghasilkan informasi yang bernilai [29]. Analisis big data memungkinkan identifikasi pola, prediksi hasil panen, serta deteksi dini terhadap potensi risiko seperti hama atau penyakit tanaman. Dengan demikian, petani dapat mengambil keputusan yang lebih tepat dan berbasis data, sehingga meminimalkan kerugian dan meningkatkan hasil produksi [30]. Kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) juga memainkan peran signifikan dalam pengembangan smart agriculture. Teknologi ini digunakan untuk mengolah data dalam jumlah besar dan kompleks menjadi informasi yang mudah dipahami [31]. Algoritma pembelajaran mesin dapat digunakan untuk memprediksi kondisi tanaman, menentukan kebutuhan irigasi, hingga mengidentifikasi penyakit tanaman melalui citra digital [32]. Integrasi AI dengan sistem pertanian memungkinkan terciptanya sistem yang adaptif dan mampu belajar dari data yang terus diperbarui.

Selain itu, sistem informasi pertanian menjadi komponen pendukung yang mengintegrasikan berbagai teknologi tersebut dalam satu platform [33]. Sistem ini berfungsi sebagai pusat pengelolaan data dan informasi yang dapat diakses oleh pengguna, termasuk petani, peneliti, dan pemangku kepentingan lainnya. Melalui sistem informasi, pengguna dapat memantau kondisi lahan, mengelola sumber daya, serta merencanakan kegiatan pertanian secara lebih terstruktur [34]. Kemudahan akses informasi menjadi faktor penting dalam meningkatkan adopsi teknologi di kalangan petani. Dalam perspektif informatika, smart agriculture juga berkaitan erat dengan konsep sistem cerdas dan pengambilan keputusan berbasis data [35]. Sistem cerdas dirancang untuk memberikan rekomendasi atau tindakan

otomatis berdasarkan analisis data yang tersedia. Misalnya, sistem dapat secara otomatis mengaktifkan irigasi ketika kelembaban tanah berada di bawah ambang tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi bukan hanya berfungsi sebagai alat bantu, tetapi juga sebagai bagian dari sistem yang bisa mengambil keputusan secara mandiri[36].

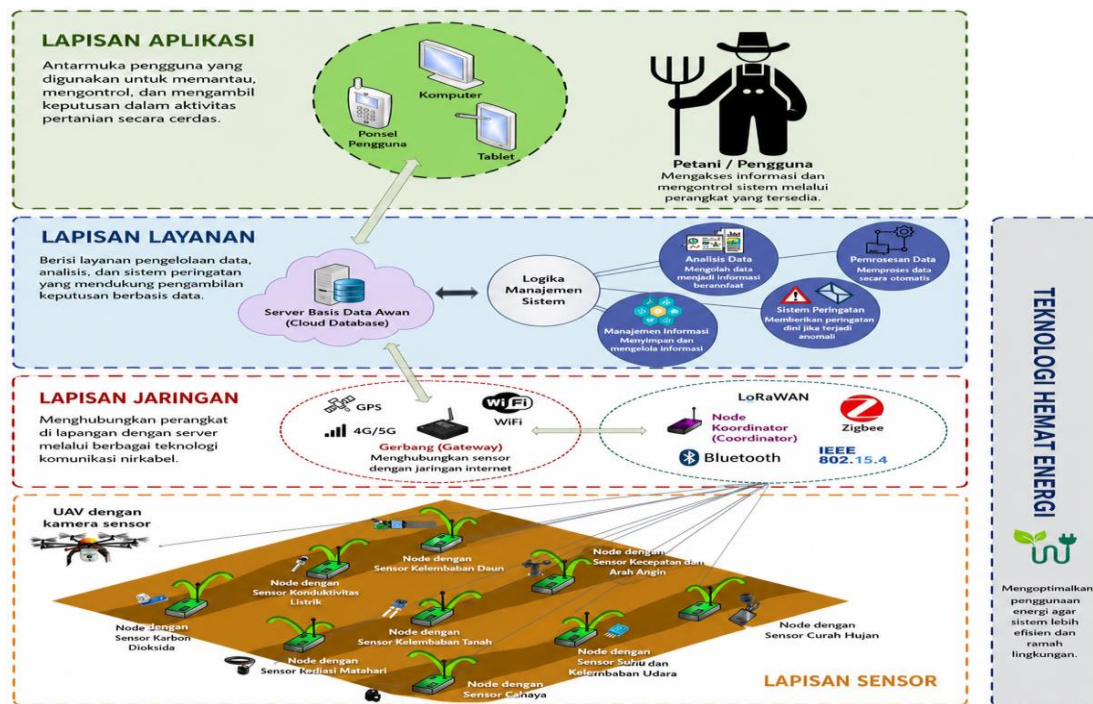
Meskipun memiliki berbagai keunggulan, implementasi smart agriculture tidak terlepas dari tantangan. Salah satu tantangan adalah keterbatasan teknologi, terutama di daerah pedesaan. Koneksi internet yang tidak stabil dapat menghambat proses pengiriman dan pengolahan data[37]. Selain itu, tingkat literasi digital yang rendah di kalangan para petani menjadi salah satu hambatan untuk penggunaan teknologi yang relatif kompleks. Oleh karena itu, pengembangan sistem smart agriculture perlu mempertimbangkan aspek kemudahan penggunaan dan aksesibilitas[38]. Selanjutnya, aspek keamanan data juga harus diperhatikan dalam penerapan smart agriculture. Data yang dikumpulkan dan diolah memiliki nilai strategis, sehingga perlu dilindungi dari potensi penyalahgunaan. Sistem keamanan yang baik diperlukan untuk menjaga integritas dan kerahasiaan data, serta memastikan bahwa informasi yang dihasilkan dapat dipercaya. Dalam hal ini, penelitian di bidang informatika memiliki peran penting dalam mengembangkan metode keamanan yang efektif[39], [40].

III. METODE

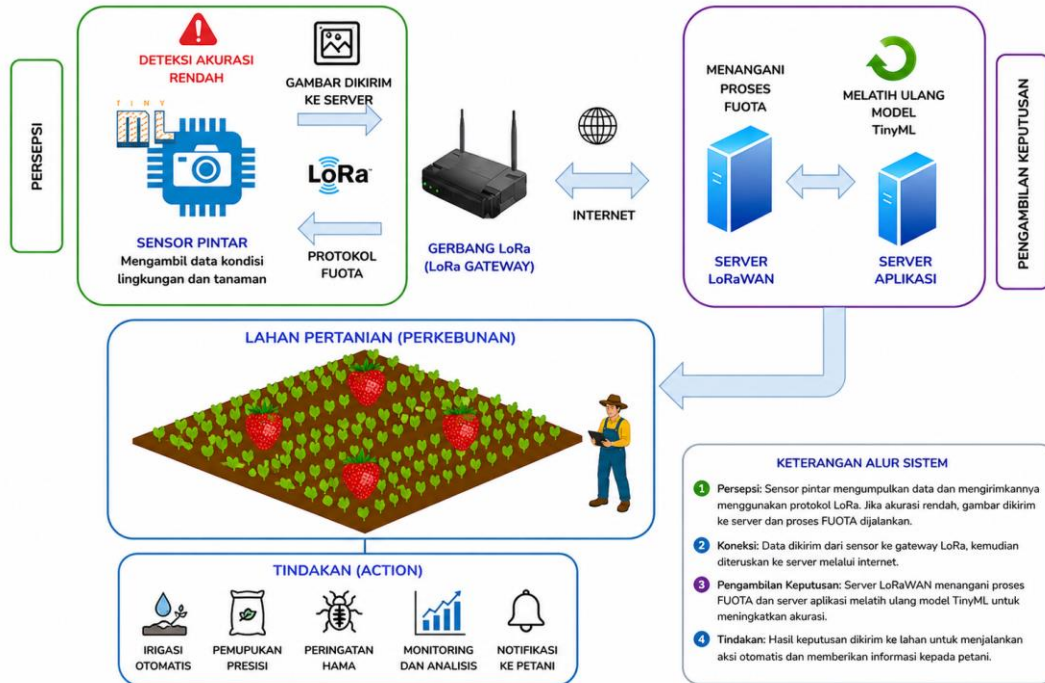
Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif-deskriptif yang bertujuan untuk memberikan gambaran sistematis mengenai transformasi digital pertanian melalui smart agriculture dalam perspektif riset informatika. Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada pemahaman konsep, integrasi teknologi, serta analisis peran berbagai komponen informatika dalam mendukung sistem pertanian modern [41]. Metode ini juga memungkinkan peneliti untuk memahami fenomena secara mendalam tanpa melakukan eksperimen langsung di lapangan [42].

Penelitian diawali dengan studi literatur yang bertujuan untuk mengumpulkan berbagai referensi yang relevan terkait smart agriculture, c (IoT), big data, kecerdasan buatan, serta sistem informasi pertanian [43]. Sumber literatur diperoleh dari jurnal ilmiah, prosiding konferensi, buku akademik, serta publikasi ilmiah bereputasi. Data yang dikumpulkan kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi konsep utama, teknologi yang digunakan, serta tren penelitian terkini dalam bidang smart agriculture [44]. Selanjutnya, dilakukan proses analisis konseptual untuk merancang model integrasi teknologi dalam smart agriculture [45].

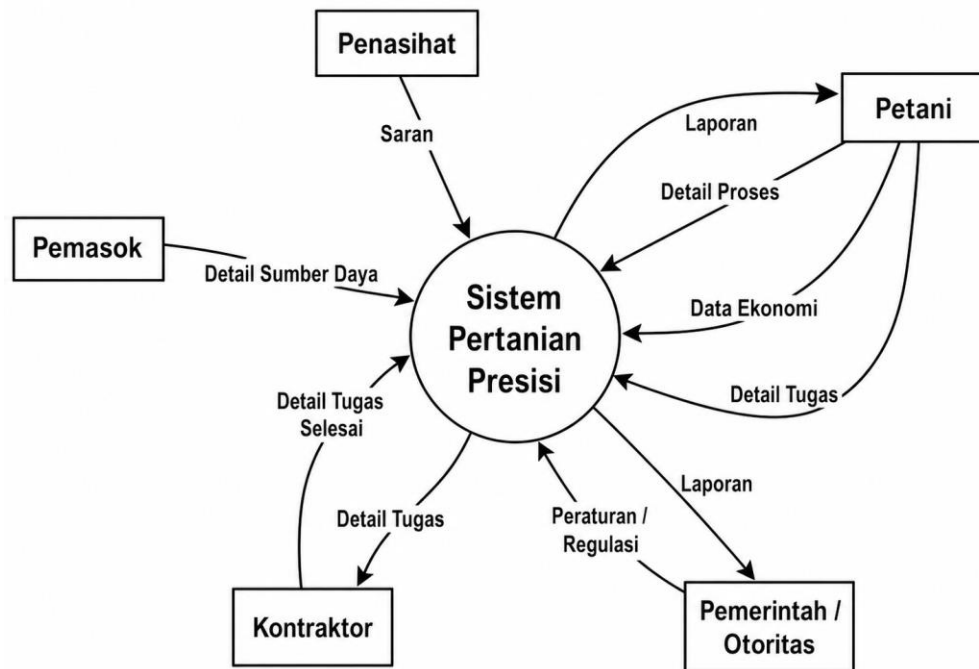
Model ini menggambarkan hubungan antara komponen utama seperti sensor IoT, sistem pengolahan data, serta antarmuka pengguna [46]. Analisis dilakukan dengan pendekatan sistem, di mana setiap komponen dipahami sebagai bagian dari suatu ekosistem yang saling terhubung. Hasil dari analisis ini berupa kerangka kerja (framework) yang bisa digunakan sebagai dasar untuk pengembangan sistem pertanian berbasis informatika [47].



Gambar 1. Arsitektur Smart Farming berbasis IoT



Gambar 2. Alur sistem Smart Farming berbasis IoT



Gambar 3. Diagram konteks Sistem Pertanian Presisi.

Gambar di atas mengilustrasikan arsitektur umum smart agriculture, yang terdiri dari lapisan pengumpulan data (sensor), lapisan komunikasi (jaringan), lapisan pemrosesan data (cloud/AI), serta lapisan aplikasi (dashboard pengguna) [48]. Setiap lapisan memiliki peran penting dalam memastikan data yang dapat menjadi informasi yang berguna untuk mengambil Keputusan [49].

Tahapan berikutnya adalah klasifikasi dan sintesis data. Pada tahap ini, berbagai temuan dari literatur dikelompokkan berdasarkan kategori teknologi, fungsi, serta kontribusinya dalam smart agriculture. Proses sintesis dilakukan untuk menyusun hubungan antar konsep sehingga menghasilkan pemahaman yang komprehensif. Teknik analisis yang digunakan adalah analisis tematik, yaitu mengidentifikasi tema-tema utama yang muncul dari berbagai sumber literatur [50].

Selain itu, penelitian ini juga menggunakan pendekatan komparatif sederhana untuk membandingkan beberapa teknologi yang umum digunakan dalam smart agriculture. Perbandingan dilakukan berdasarkan fungsi, kelebihan, serta keterbatasan masing-masing teknologi. Hasil perbandingan ini disajikan dalam bentuk tabel untuk memudahkan pemahaman [51].

Tabel 1. Perbandingan Teknologi dalam Smart Agriculture

Teknologi	Fungsi Utama	Kelebihan	Keterbatasan
IoT	Monitoring kondisi lahan secara real-time	Data akurat dan otomatis	Bergantung pada koneksi jaringan
Big Data	Analisis data dalam jumlah besar	Prediksi dan analisis mendalam	Membutuhkan kapasitas komputasi tinggi
Artificial Intelligence	Pengambilan keputusan dan prediksi cerdas	Sistem adaptif dan otomatis	Kompleksitas algoritma
Sistem Informasi	Integrasi dan visualisasi data	Mudah diakses pengguna	Bergantung pada desain sistem

Tahap akhir dari penelitian ini adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang sudah dilakukan. Kesimpulan disusun secara sistematis untuk menjawab tujuan penelitian, yaitu memahami peran teknologi informatika dalam transformasi digital pertanian melalui smart agriculture. Selain itu, penelitian ini juga mengidentifikasi peluang pengembangan serta tantangan yang perlu diperhatikan dalam implementasi teknologi tersebut.

Dengan metode yang digunakan, penelitian ini diharapkan bisa memberikan gambaran yang komprehensif mengenai smart agriculture dari perspektif informatika. Pendekatan ini tidak hanya menekankan pada aspek teknologi, tetapi juga pada integrasi sistem serta relevansinya terhadap kebutuhan sektor pertanian modern. Oleh karena itu, metode penelitian ini menjadi dasar penting dalam menghasilkan kajian yang sistematis, terstruktur, dan dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya.

IV. HASIL

Berdasarkan analisis literatur dan perancangan konseptual yang telah dilakukan, penelitian ini menghasilkan suatu kerangka sistem (*framework*) smart agriculture yang terintegrasi dan dapat dijadikan acuan dalam pengembangan sistem pertanian berbasis informatika. Hasil menunjukkan bahwa transformasi digital pada sektor pertanian mampu meningkatkan efisiensi pengelolaan lahan melalui pemanfaatan data real-time serta sistem pengambilan keputusan berbasis analisis. Salah satu temuan utama adalah terbentuknya arsitektur smart agriculture yang terdiri dari lima lapisan utama, yaitu pengumpulan data, komunikasi, pemrosesan data, aplikasi, dan otomatisasi. Setiap lapisan

memiliki fungsi spesifik namun saling terhubung dalam satu sistem terpadu. Sensor IoT pada lapisan pertama berperan penting dalam menyediakan data kondisi lingkungan secara akurat, seperti kelembaban tanah dan suhu udara.



Gambar 4. Penerapan IoT dalam digitalisasi pertanian.



Gambar 5. Komponen utama dalam sistem Pertanian Cerdas.

Gambar di atas memperlihatkan bagaimana alur data bekerja dalam sistem smart agriculture, dimulai dari pengumpulan data oleh sensor hingga tindakan otomatis oleh aktuator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi antar lapisan ini memungkinkan sistem bekerja secara efisien dan berkelanjutan.

Pada lapisan komunikasi, penggunaan teknologi jaringan seperti WiFi, LoRa, dan jaringan seluler memungkinkan data dikirim secara cepat ke pusat pengolahan. Keandalan komunikasi menjadi faktor penting dalam menjaga

kontinuitas data. Selanjutnya, pada lapisan pemrosesan data, teknologi cloud computing, big data, dan kecerdasan buatan digunakan untuk mengolah data menjadi informasi yang bernilai.

Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan beberapa output penting, seperti prediksi waktu panen, rekomendasi irigasi, serta deteksi dini terhadap hama dan penyakit tanaman. Hal ini membuktikan bahwa teknologi informatika mampu meningkatkan akurasi dan kualitas pengambilan keputusan dalam pertanian.

Pada lapisan aplikasi, informasi ditampilkan melalui dashboard atau aplikasi mobile yang mudah dipahami oleh pengguna. Hal ini mempermudah petani dalam memantau kondisi lahan secara real-time. Selain itu, sistem otomatisasi melalui aktuator memungkinkan tindakan dilakukan secara langsung tanpa intervensi manual, seperti penyiraman otomatis dan pengaturan suhu.

Untuk memperjelas hasil analisis, berikut disajikan tabel ringkasan fungsi dan output dari setiap lapisan dalam sistem smart agriculture:

Tabel 2. Hasil Analisis Setiap Lapisan Smart Agriculture

Lapisan Sistem	Fungsi Utama	Output yang Dihasilkan
Pengumpulan Data	Mengambil data dari lingkungan	Data suhu, kelembaban, nutrisi tanah
Komunikasi	Mengirim data ke sistem pusat	Data terkirim secara real-time
Pemrosesan Data	Mengolah dan menganalisis data	Informasi prediksi dan rekomendasi
Aplikasi	Menampilkan informasi ke pengguna	Dashboard monitoring dan notifikasi
Otomatisasi	Menjalankan tindakan berdasarkan data	Irigasi otomatis, kontrol lingkungan

Selain itu, penelitian ini juga menemukan bahwa sistem memiliki mekanisme *feedback loop*, di mana data yang terus diperbarui akan meningkatkan akurasi sistem dari waktu ke waktu. Hal ini menjadikan smart agriculture sebagai sistem yang adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Namun, terdapat beberapa kendala yang teridentifikasi, seperti keterbatasan jaringan di wilayah pedesaan serta tingkat literasi digital yang masih rendah. Meskipun demikian, secara keseluruhan hasil penelitian menunjukkan bahwa smart agriculture memiliki potensi dalam mendukung transformasi digital pertanian. Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa integrasi teknologi informatika dalam pertanian tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga membuka peluang inovasi yang lebih luas dalam pengelolaan sumber daya pertanian secara berkelanjutan.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa transformasi digital melalui smart agriculture bukan sekadar adopsi teknologi, melainkan perubahan paradigma dalam pengelolaan pertanian dari berbasis pengalaman menuju berbasis data. Integrasi antara sensor IoT, sistem komunikasi, pemrosesan berbasis kecerdasan buatan, hingga sistem otomatisasi menciptakan ekosistem yang saling terhubung dan mampu bekerja secara adaptif. Dalam konteks riset informatika, hal ini sudah menegaskan bahwa peran teknologi bukan hanya sebagai alat bantu, tetapi sebagai inti dari sistem pengambilan keputusan yang cerdas dan berkelanjutan. Dari sisi efisiensi, penggunaan teknologi dalam smart agriculture terbukti mampu mengurangi pemborosan sumber daya seperti air, pupuk, dan tenaga kerja. Sistem yang mampu memberikan rekomendasi berbasis data memungkinkan petani untuk melakukan tindakan yang lebih tepat sasaran. Selain itu, kemampuan sistem dalam melakukan monitoring secara real-time memberikan keuntungan dalam mengantisipasi risiko, seperti perubahan cuaca ekstrem atau serangan hama. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi informatika memiliki kontribusi signifikan dalam meningkatkan ketahanan sektor pertanian.

Namun, implementasi smart agriculture juga tidak terlepas dari tantangan yang bersifat teknis maupun non-teknis. Keterbatasan infrastruktur jaringan menjadi hambatan utama dalam pengiriman data secara real-time, terutama di wilayah pedesaan. Selain itu, kompleksitas sistem yang melibatkan berbagai teknologi juga menuntut adanya peningkatan kapasitas sumber daya manusia, khususnya dalam hal literasi digital. Oleh karena itu, pendekatan yang lebih sederhana, adaptif, dan berbasis kebutuhan lokal menjadi penting dalam pengembangan sistem smart agriculture.

Untuk memperjelas pembahasan, terdapat beberapa poin utama yang dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Integrasi Teknologi sebagai Kunci Utama

Smart agriculture bergantung pada integrasi berbagai teknologi informatika seperti IoT, big data, dan kecerdasan buatan. Tanpa integrasi yang baik, sistem tidak dapat berjalan secara optimal dan berpotensi menghasilkan data yang tidak akurat.

2. Perubahan Pola Pengambilan Keputusan

Transformasi digital mendorong perubahan dari pengambilan keputusan berbasis intuisi menjadi berbasis data. Hal ini meningkatkan akurasi dan efektivitas dalam pengelolaan pertanian, serta mengurangi risiko kesalahan.

3. Tantangan Implementasi dan Adaptasi Pengguna

Keberhasilan smart agriculture sangat dipengaruhi oleh kesiapan infrastruktur dan kemampuan pengguna dalam mengadopsi teknologi. Oleh karena itu, diperlukan solusi yang tidak hanya canggih secara teknis, tetapi juga mudah digunakan dan sesuai dengan kondisi lapangan.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menegaskan bahwa smart agriculture memiliki potensi yang besar dalam mendukung transformasi digital pertanian. Namun, keberhasilannya sangat bergantung pada keseimbangan antara inovasi teknologi, kesiapan infrastruktur, serta kemampuan adaptasi pengguna. Dengan pendekatan yang tepat, smart agriculture dapat menjadi solusi strategis dalam meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan sektor pertanian di masa depan.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang sudah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa transformasi digital pertanian melalui smart agriculture merupakan langkah strategis dalam meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutan sektor pertanian. Integrasi teknologi informatika seperti Internet of Things (IoT), big data, kecerdasan buatan, serta sistem informasi bisa menciptakan pertanian yang lebih adaptif dan berbasis data. Melalui pemanfaatan teknologi tersebut, proses mengambil keputusan tidak lagi bergantung pada intuisi, melainkan didukung oleh data yang akurat dan real-time. Penelitian ini menunjukkan bahwa arsitektur smart agriculture yang terdiri dari beberapa lapisan utama dapat bekerja secara terintegrasi untuk menghasilkan informasi yang relevan serta tindakan otomatis yang efisien. Selain itu, sistem yang dibangun memiliki kemampuan untuk terus berkembang melalui mekanisme *feedback loop*, sehingga mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Meskipun demikian, terdapat beberapa tantangan yang perlu diperhatikan, seperti halnya keterbatasan infrastruktur, minimnya literasi digital, serta kompleksitas teknologi. Oleh sebab itu, dilakukan pendekatan yang lebih sederhana, adaptif, dan kontekstual dalam pengembangan sistem. Dengan demikian, smart agriculture memiliki potensi besar sebagai solusi inovatif dalam mendukung transformasi digital pertanian menuju sistem yang lebih modern dan berkelanjutan.

Kontribusi Penulis: Ahmad Hamdani: Konseptualisasi, Metodologi, Analisis, dan Penulisan, berperan dalam penyusunan konsep, metodologi, analisis, serta penyempurnaan naskah. **Moh. Izzul Haq Ramadlani:** Pengumpulan Data, Visualisasi, dan Penulisan, berperan dalam pengumpulan data, pembuatan diagram, dan penyusunan draf awal.

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://orcid.org/0000-0001-9088-1111>

Penulis Kedua: <https://orcid.org/0000-0002-1234-5678>

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] S. Alam, J. Kundu, S. Ghosh, and A. Dey, "Trusted Fuzzy Routing Scheme in Flying Ad-hoc Network," *J. Fuzzy Ext. Appl.*, vol. 5, no. 1, pp. 48–59, 2024, doi: 10.22105/jfea.2024.436052.1370.
- [2] E. Effah, O. Thiare, and A. M. Wyglinski, "Hardware Evaluation of Cluster-Based Agricultural IoT Network," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 33628–33651, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3370230.
- [3] I. Ruiz-García *et al.*, "Sustainable Occupancy Sensing Platform via Triboelectric and Piezoresistive Pressure Sensors," *IEEE Sensors Lett.*, vol. 9, no. 8, 2025, doi: 10.1109/LSENS.2025.3589020.
- [4] N. Boufares, Y. Ben Saïed, and L. Saïdane, "A Lightweight Three Dimensional Redeployment Algorithm for Distributed Mobile Wireless Sensor Networks," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 135, no. 2, pp. 835–873, 2024, doi: 10.1007/s11277-024-11078-3.
- [5] D. Loukatos, A. Fragkos, G. Kargas, and K. G. Arvanitis, "Implementation and Evaluation of a Low-Cost Measurement Platform over LoRa and Applicability for Soil Monitoring," *Futur. Internet*, vol. 16, no. 12,

- 2024, doi: 10.3390/fi16120443.
- [6] M. Tabassum *et al.*, “Enhance data availability and network consistency using artificial neural network for IoT,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 83, no. 1, pp. 3111–3131, 2024, doi: 10.1007/s11042-022-13337-6.
- [7] M. Al-Ambusaidi, Z. Zhang, Y. Muhammad, and A. Yahya, “ML-IDS: an efficient ML-enabled intrusion detection system for securing IoT networks and applications,” *Soft Comput.*, vol. 28, no. 2, pp. 1765–1784, 2024, doi: 10.1007/s00500-023-09452-7.
- [8] Z. Hu, Y. Qi, S. Jia, Y. Sun, Q. Li, and G. Shi, “A Soil Moisture Sensing System Powered by Self-Harvesting Soil Energy,” *IEEE Sens. J.*, vol. 25, no. 9, pp. 15356–15366, 2025, doi: 10.1109/JSEN.2025.3551324.
- [9] M. Ma, Z. Wang, S. Guo, and H. Lu, “Cloud-Edge Framework for AoI-Efficient Data Processing in Multi-UAV-Assisted Sensor Networks,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 14, pp. 25251–25267, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3392244.
- [10] P. Gangwani, A. Perez-Pons, and H. Upadhyay, “Evaluating Trust Management Frameworks for Wireless Sensor Networks,” *Sensors*, vol. 24, no. 9, 2024, doi: 10.3390/s24092852.
- [11] S. Singh, A. S. Nandan, G. Sikka, A. Malik, and P. K. Singh, “RETRACTED ARTICLE: Genetic algorithm-based data controlling method using IoT-enabled WSN in power grid,” *Soft Comput.*, vol. 27, no. 15, p. 11055, 2023, doi: 10.1007/s00500-022-07186-6.
- [12] X. Zang, T. Wang, X. Zhang, J. Gong, P. Gao, and G. Zhang, “Encrypted malicious traffic detection based on natural language processing and deep learning,” *Comput. Networks*, vol. 250, 2024, doi: 10.1016/j.comnet.2024.110598.
- [13] R. I. Mukhamediev *et al.*, “Coverage Path Planning Optimization of Heterogeneous UAVs Group for Precision Agriculture,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 5789–5803, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3235207.
- [14] 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.
- [15] A. K. Rao, K. K. Nagwanshi, and M. K. Shukla, “An optimized secure cluster-based routing protocol for IoT-based WSN structures in smart agriculture with blockchain-based integrity checking,” *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 17, no. 5, pp. 3159–3181, 2024, doi: 10.1007/s12083-024-01748-1.
- [16] J. Liu, Z. Xu, and Z. Wen, “Joint Data Transmission and Trajectory Optimization in UAV-Enabled Wireless Powered Mobile Edge Learning Systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 9, pp. 11617–11630, 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3265479.
- [17] Z. Lin, “Communication optimisation of smart agriculture wireless sensor network based on improved ant colony algorithm,” *Int. J. Grid Util. Comput.*, vol. 15, no. 3–4, pp. 211–219, 2024, doi: 10.1504/IJGUC.2024.140106.
- [18] S. Itoo, A. A. Khan, M. Ahmad, and M. J. Idrisi, “A Secure and Privacy-Preserving Lightweight Authentication and Key Exchange Algorithm for Smart Agriculture Monitoring System,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 56875–56890, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3280542.
- [19] B. Balamurugan *et al.*, “Real time multi view image based FPC plant management with SS data security and low rate attack detection for efficient smart agriculture in WSN,” *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 91–100, 2023, doi: 10.3233/JIFS-220594.
- [20] S. Rahmadika, W. Agustiarimi, R. Fikri, and B. J. Kweka, “Synergistic Disruption: Harnessing AI and Blockchain for Enhanced Privacy and Security in Federated Learning,” *J. Online Inform.*, vol. 10, no. 1, pp. 22–31, 2025, doi: 10.15575/join.v10i1.1392.
- [21] S. Craven *et al.*, “Smart Bluetooth Stakes: Deployment of Soil Moisture Sensors with Rotating High-Gain Antenna Receiver on Center Pivot Irrigation Boom in a Commercial Wheat Field,” *Sensors*, vol. 25, no. 17, 2025, doi: 10.3390/s25175537.
- [22] P. M. Maniraj Kumar, P. Nagarajan, A. Kaleel Rahuman, and T. Gobinath, “A Fuzzy Congestion Control in Wireless Sensor Networks based on Spider Monkey Optimization Algorithm,” *IETE J. Res.*, vol. 70, no. 8, pp. 6893–6900, 2024, doi: 10.1080/03772063.2024.2310123.
- [23] K. Bouarroudj, F. Babaa, and A. Touil, “IoT-based monitoring and control for optimized plant growth in smart greenhouses using soil and hydroponic systems,” *Internet Things (The Netherlands)*, vol. 33, 2025, doi: 10.1016/j.iot.2025.101710.
- [24] Z. Pan *et al.*, “Wind-Wave Synergistic Triboelectric Nanogenerator: Performance Evaluation Test and Potential Applications in Offshore Areas,” *Micromachines*, vol. 15, no. 3, 2024, doi: 10.3390/mi15030314.
- [25] G. Zhou, M. Peng, Y. Li, J. Wang, and C. Lian, “Secure transmission of wireless energy-carrying communication systems for the Internet of Things,” *Appl. Math. Nonlinear Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 3135–3148, 2023, doi: 10.2478/amns.2023.1.00026.

- [26] V. Choudhary and S. Tanwar, "Generation & evaluation of datasets for anomaly-based intrusion detection systems in IoT environments," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 83, no. 36, pp. 84331–84355, 2024, doi: 10.1007/s11042-024-19066-2.
- [27] B. Kumara and S. A. Padmanabhan, "A condition-based distributed approach for secured privacy preservation of nodes in wireless sensor networks IoT," *Int. J. Reconfigurable Embed. Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 441–449, 2024, doi: 10.11591/ijres.v13.i2.pp441-449.
- [28] S. Li, Y. Ji, W. Peng, H. Dai, and J. Jiang, "A social relationship-aware collaborative D2D secure caching strategy," *IET Commun.*, vol. 19, no. 1, 2025, doi: 10.1049/cmu2.70009.
- [29] Y. W. Kim, S. H. Choi, and T. H. Han, "Rapid Topology Generation and Core Mapping of Optical Network-on-Chip for Heterogeneous Computing Platform," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 110359–110370, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3102270.
- [30] K. C. Kalpavi and S. B. Sujatha, "Dual step hybrid routing protocol for network lifetime enhancement in WSN-IoT environment," *Int. J. Reconfigurable Embed. Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 323–331, 2024, doi: 10.11591/ijres.v13.i2.pp323-331.
- [31] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, and I. S. Maqom, "Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of Things (IoT) di Kampus," 2023, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/379445633_Pengembangan_Sistem_Pemantauan_Lingkungan_Berbasis_Internet_of_Things_IoT_di_Kampus/links/6609aa9010ca86798731de49/Pengembangan-Sistem-Pemantauan-Lingkungan-Berbasis-Internet-of
- [32] F. P. E. Putra, A. Muzayyin, and M. U. Mansyur, "ANALISIS KUALITAS LAYANAN ABSENSI BERBASIS FINGER BERDASARKAN Quality of Service," *J. Inform.*, 2024, doi: <https://doi.org/10.30873/ji.v24i1.3949>.
- [33] F. Prasetyo, E. Putra, F. Muslim, and R. Paradina, "Technical Performance Comparison of Modern Frontend Frameworks Study on Svelte , React , and Vue," vol. 5, no. 1, pp. 355–364, 2025.
- [34] J. Informatika, F. Prasetyo, E. Putra, A. Vidyan, and M. Ali, "Evaluasi Kualitas Layanan (QoS) pada Jaringan Wi-Fi 6 Dibandingkan dengan Wi-Fi 5".
- [35] F. Prasetyo, E. Putra, A. Zulfikri, A. Rohman, and R. Alim, "Analysis Comparative of Performance Optimization Techniques for PHP Framework Testing : Laravel , CodeIgniter , Symfony," vol. 5, no. 1, pp. 242–248, 2025.
- [36] F. Prasetyo, E. Putra, M. Mursidi, and D. Wahid, "Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik," vol. 3, no. 2, pp. 931–937, 2024.
- [37] J. Informatika, F. P. E. Putra, L. Romadona, and S. F. Rohmah, "Implementasi dan Evaluasi Protokol QUIC untuk Optimalisasi Kinerja Streaming Video Real-Time pada Jaringan 5G," pp. 0–7.
- [38] F. Prasetyo, E. Putra, M. Dafid, and I. Syafi, "Firewall Implementation as a Computer Network Security Strategy for Data Protection," vol. 5, no. 1, pp. 291–297, 2025.
- [39] F. Prasetyo, E. Putra, M. Nazir, and Y. Zain, "OPTIMASI PENILAIAN PADA E - LEARNING UNIVERSITAS MADURA DENGAN MENGGUNAKAN," vol. 20, no. 2, pp. 118–126, 2020.
- [40] F. Prasetyo, E. Putra, N. Ramadhani, and M. Mursidi, "Service Quality Analysis of RFID - Based Smart Door Lock in Front One Azana Style Hotel Area," vol. 4, no. 1, pp. 372–381, 2024.
- [41] N. Duy Tan, D.-N. Nguyen, H.-N. Hoang, and T.-T.-H. Le, "EEGT: Energy Efficient Grid-Based Routing Protocol in Wireless Sensor Networks for IoT Applications," *Computers*, vol. 12, no. 5, 2023, doi: 10.3390/computers12050103.
- [42] J. Xu *et al.*, "Chemically Driven Sintering of Colloidal Cu Nanocrystals for Multiscale Electronic and Optical Devices," *ACS Nano*, vol. 18, no. 27, pp. 17611–17621, 2024, doi: 10.1021/acsnano.4c02007.
- [43] N. Suresh Kumar and G. Santhosh Kumar, "Abstracting IoT protocols using timed process algebra and SPIN model checker," *Cluster Comput.*, vol. 26, no. 2, pp. 1611–1629, 2023, doi: 10.1007/s10586-022-03963-y.
- [44] S. Khan, T. Mazhar, T. Shahzad, Y. Y. Yasin, and H. Hamam, "Integrating IoT and WSN: Enhancing quality of service through energy efficiency, scalability, and secure communication in smart systems," *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 18, no. 5, 2025, doi: 10.1007/s12083-025-02070-0.
- [45] R. Mishra *et al.*, "nodeWSNsec: A Hybrid Metaheuristic Approach for Reliable Security and Node Deployment in Wireless Sensor Networks," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 16, no. 8, pp. 132–142, 2025, doi: 10.14569/IJACSA.2025.0160814.
- [46] E. Geo Francis and S. Sheeja, "Enhanced intrusion detection in wireless sensor networks using deep reinforcement learning with improved feature extraction and selection," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 84, no. 13, pp. 11943–11982, 2025, doi: 10.1007/s11042-024-19305-6.

- [47] K. R. Raghava Rao, B. N. K. Reddy, and A. S. Sai Kumar, "Using advanced distributed energy efficient clustering increasing the network lifetime in wireless sensor networks," *Soft Comput.*, vol. 27, no. 20, pp. 15269–15280, 2023, doi: 10.1007/s00500-023-07940-4.
- [48] Z. Wang, N. Dong, J. Sun, W. Knottenbelt, and Y. Guo, "ZkFL :Zero-Knowledge Proof-Based Gradient Aggregation for Federated Learning," *IEEE Trans. Big Data*, vol. 11, no. 2, pp. 447–460, 2025, doi: 10.1109/TBDATA.2024.3403370.
- [49] Y. Cheng, Y. Hu, W. Liu, and M. Bilal, "Federated learning with adaptive local aggregation for privacy-aware recommender systems in Internet of Vehicles," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 710, 2025, doi: 10.1016/j.ins.2025.122100.
- [50] J. Stocchero, A. Dexheimer Carneiro, I. Zacarias, and E. Pignaton De Freitas, "Combining information centric and software defined networking to support command and control agility in military mobile networks," *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 16, no. 2, pp. 765–784, 2023, doi: 10.1007/s12083-022-01443-z.
- [51] F. Prasetyo, E. Putra, I. N. S. Degeng, S. Ulfa, and W. Kamdi, "The Evolution of Quality Education : Impacts and Challenges of Using Open Educational Resources (OER) and Open Educational Practices (OEP) in the Conceive - Design - Implement - Operate (CDIO) Framework," vol. 13, no. 1, pp. 386–395, 2024, doi: 10.18421/TEM131.

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