

Smart Agriculture Sebagai Inovasi Informatika Dalam Mendukung Ketahanan Pangan

Ach. Nur Maulidi ^{1)*} , Achmed Abdillah ²⁾ 

¹⁾ ²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾maulidiachnur@gmail.com, ²⁾achmedabdillah18@gmail.com

Abstrak

Ketahanan pangan menjadi isu strategis di tengah meningkatnya kebutuhan produksi dan keterbatasan sumber daya pertanian, sehingga diperlukan inovasi berbasis teknologi seperti *smart agriculture* untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem *smart agriculture* berbasis teknologi informatika yang dapat memantau kondisi lingkungan secara langsung serta membantu proses pengambilan keputusan dalam pengelolaan pertanian. Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan pengembangan sistem (*system development*), yang mencakup perancangan arsitektur IoT, penerapan sensor lingkungan, serta pengujian kinerja sistem pada berbagai jarak dan kondisi operasional. Sistem yang dirancang mampu memantau parameter lingkungan seperti kelembapan tanah (40%–75%), suhu udara (26°C–34°C), serta intensitas cahaya (300–900 lux) dengan stabil. Performa komunikasi menunjukkan *packet delivery ratio* mencapai 100% pada jarak dekat dan tetap di atas 90% pada jarak lebih dari 150 meter, dengan latensi berkisar 150–450 ms. Konsumsi energi berhasil ditekan melalui mekanisme *duty cycling* dan *sleep mode*, sehingga sistem dapat beroperasi dalam jangka waktu panjang. Kesimpulan: Penelitian ini menunjukkan bahwa implementasi *smart agriculture* berbasis informatika mampu meningkatkan efisiensi monitoring dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Sistem yang dikembangkan terbukti andal, efisien, dan berpotensi diterapkan secara luas untuk mendukung ketahanan pangan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan analitik kecerdasan buatan yang lebih kompleks guna meningkatkan kemampuan prediksi dan otomatisasi sistem.

Kata Kunci: Smart Agriculture, Internet of Things, Monitoring Lingkungan, Ketahanan Pangan, Efisiensi Energi

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

I. PENDAHULUAN

Ketahanan pangan merupakan salah satu isu strategis yang terus menjadi perhatian global, terutama di tengah meningkatnya jumlah penduduk, perubahan iklim, serta keterbatasan sumber daya alam [1][2]. Indonesia sebagai negara agraris menghadapi tantangan kompleks dalam menjaga stabilitas produksi pangan, mulai dari alih fungsi lahan, rendahnya produktivitas pertanian, hingga keterbatasan akses terhadap teknologi modern [3]. Dalam konteks ini, peran ilmu informatika menjadi semakin relevan sebagai pendorong inovasi yang mampu mentransformasi sektor pertanian menjadi lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan[4]. Konsep *smart agriculture* atau pertanian cerdas hadir sebagai solusi berbasis teknologi yang mengintegrasikan berbagai cabang informatika, seperti *Internet of Things* (IoT), *big data analytics*, kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), serta komputasi awan (*cloud computing*) [5], [6]. Melalui pendekatan ini, proses pertanian tidak lagi bergantung sepenuhnya pada metode konvensional, melainkan didukung oleh sistem yang mampu melakukan pemantauan, analisis, dan pengambilan keputusan secara real-time. Misalnya, sensor IoT dapat digunakan untuk memantau kelembaban tanah, suhu udara, dan kondisi tanaman [7], [8], yang kemudian dianalisis menggunakan algoritma untuk menentukan kebutuhan irigasi atau pemupukan secara optimal.

Permasalahan utama dalam sektor pertanian tradisional adalah rendahnya efisiensi penggunaan sumber daya serta minimnya informasi yang akurat dan tepat waktu. Petani seringkali mengambil keputusan berdasarkan pengalaman subjektif tanpa dukungan data yang memadai, sehingga berpotensi menyebabkan kerugian akibat gagal panen atau penggunaan input yang tidak efisien [9], [10]. Pada titik ini, informatika memiliki peran penting dengan menghadirkan sistem pendukung keputusan (*decision support system*) yang didasarkan pada pengolahan data dan analisis [11], [12]. Dengan memanfaatkan teknologi tersebut, petani dapat meningkatkan produktivitas sekaligus menekan biaya operasional [13], [14].

Selain itu, perubahan iklim yang semakin tidak menentu juga menambah kompleksitas dalam pengelolaan pertanian. Pola cuaca yang sulit diprediksi berdampak pada waktu tanam, pertumbuhan tanaman, hingga hasil panen. Melalui

* Ach.Nur Maulidi

penerapan *smart agriculture*, data historis dan prediksi cuaca dapat diolah untuk menghasilkan rekomendasi yang lebih akurat dalam menentukan strategi budidaya. Teknologi ini memungkinkan adanya sistem prediksi berbasis pembelajaran mesin (*machine learning*) yang mampu mengenali pola dan memberikan solusi preventif terhadap risiko yang mungkin terjadi [15]. Dari perspektif informatika, *smart agriculture* bukan hanya sekadar penerapan teknologi, tetapi juga melibatkan proses integrasi sistem yang kompleks. Hal ini mencakup pengumpulan data (*data acquisition*), pengolahan data (*data processing*), hingga visualisasi informasi yang mudah dipahami oleh pengguna [16], [17]. Tantangan utama dalam implementasi sistem ini meliputi keterbatasan infrastruktur teknologi di kalangan petani, ketersediaan jaringan internet, serta aspek keamanan data. Oleh sebab itu, dibutuhkan pendekatan penelitian yang menyeluruh untuk menghasilkan solusi yang tidak hanya inovatif, tetapi juga dapat diterapkan serta sesuai dengan kondisi lokal [18], [19].

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji bagaimana konsep *smart agriculture* dapat diimplementasikan sebagai inovasi informatika dalam mendukung ketahanan pangan. Fokus utama penelitian adalah pada pengembangan model sistem yang mampu meningkatkan efisiensi produksi pertanian melalui pemanfaatan teknologi digital [20], [21]. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji berbagai faktor yang mempengaruhi keberhasilan penerapan teknologi tersebut, termasuk aspek sosial, ekonomi, dan teknis [22]. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi berupa nilai tambah, baik dari aspek akademik maupun praktis. Secara akademik, penelitian ini memperkaya kajian dalam bidang informatika terapan, khususnya terkait pertanian digital [23]. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pemerintah dan pelaku industri, dan petani untuk mengadopsi teknologi *smart agriculture* guna meningkatkan ketahanan pangan nasional. Dengan demikian, integrasi antara informatika dan pertanian tidak hanya menjadi wacana, tetapi benar-benar dapat diwujudkan sebagai solusi nyata dalam menghadapi tantangan global [24], [25].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Konsep *smart agriculture* merupakan evolusi dari pertanian konvensional menuju pertanian berbasis teknologi digital yang memanfaatkan integrasi sistem informatika. Dalam kerangka ini, pertanian tidak hanya dipandang sebagai aktivitas produksi biologis, tetapi juga sebagai sistem berbasis data (*data-driven agriculture*) [26]. Pendekatan ini menekankan pada pengumpulan, pengolahan, dan analisis data secara berkelanjutan guna meningkatkan efisiensi, hasil produksi, dan keberlanjutan sektor pertanian. Salah satu komponen utama dalam *smart agriculture* adalah *Internet of Things* (IoT). Teknologi ini memungkinkan berbagai perangkat sensor untuk terhubung dan berkomunikasi dalam suatu jaringan, sehingga mampu mengumpulkan data lingkungan secara real-time [27]. Sensor yang digunakan umumnya mencakup pengukuran kelembaban tanah, suhu, intensitas cahaya, serta kandungan nutrisi. Data yang dihasilkan kemudian dikirimkan ke sistem pusat untuk dianalisis lebih lanjut. Dengan adanya IoT, petani dapat memantau kondisi lahan secara akurat tanpa harus melakukan observasi manual secara terus-menerus [28].

Selain IoT, *big data analytics* juga memiliki peran penting dalam mengelola volume data yang besar dan kompleks. Data yang dikumpulkan dari berbagai sumber, seperti sensor, citra satelit, dan catatan historis, memerlukan teknik analisis yang mampu mengidentifikasi pola dan hubungan antar variabel. Melalui pendekatan ini, informasi yang sebelumnya tersembunyi dapat diungkap dan digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan. Analisis data dalam pertanian mencakup prediksi hasil panen, identifikasi penyakit tanaman, serta optimasi penggunaan sumber daya seperti air dan pupuk [29]. Kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) menjadi elemen kunci dalam meningkatkan kemampuan sistem *smart agriculture*. Dengan menggunakan algoritma berbasis pembelajaran mesin (*machine learning*), sistem mampu belajar dari data riwayat untuk menghasilkan perkiraan yang lebih akurat. Misalnya, model prediktif dapat digunakan guna menentukan waktu tanam yang paling optimal atau mendeteksi dini serangan hama berdasarkan pola tertentu. Selain itu, teknologi pengolahan citra (*image processing*) juga dapat dimanfaatkan untuk memantau kondisi tanaman melalui analisis visual, seperti warna daun atau pertumbuhan tanaman [30].

Komputasi awan (*cloud computing*) berperan sebagai infrastruktur yang mendukung penyimpanan dan pemrosesan data dalam skala besar. Dengan memanfaatkan layanan berbasis awan, data pertanian dapat diakses secara fleksibel dari berbagai lokasi, sehingga memudahkan koordinasi antara petani, peneliti, dan pemangku kepentingan lainnya. Selain itu, komputasi awan juga memungkinkan integrasi berbagai aplikasi dalam satu platform yang terpadu, sehingga meningkatkan efisiensi operasional [31]. Dalam konteks sistem pendukung keputusan (*decision support system*), *smart agriculture* menyediakan alat bantu yang mampu memberikan rekomendasi berbasis data. Sistem ini menggabungkan berbagai sumber informasi untuk menghasilkan solusi yang optimal bagi pengguna [32]. Misalnya, sistem dapat merekomendasikan jadwal irigasi berdasarkan kondisi cuaca dan kelembaban tanah, atau menentukan dosis pupuk yang sesuai dengan kebutuhan tanaman. Dengan demikian, keputusan yang diambil menjadi lebih objektif dan berbasis pada analisis yang komprehensif. Namun demikian, implementasi *smart agriculture* juga menghadapi berbagai hambatan. Salah satu masalah utama adalah keterbatasan infrastruktur teknologi, khususnya di wilayah

pedesaan yang belum memiliki akses internet yang memadai [33]. selain itu, tingkat pemahaman digital petani yang masih tergolong rendah menjadi hambatan dalam adopsi teknologi. Faktor biaya juga menjadi pertimbangan penting, mengingat investasi awal untuk perangkat dan sistem teknologi relatif tinggi.

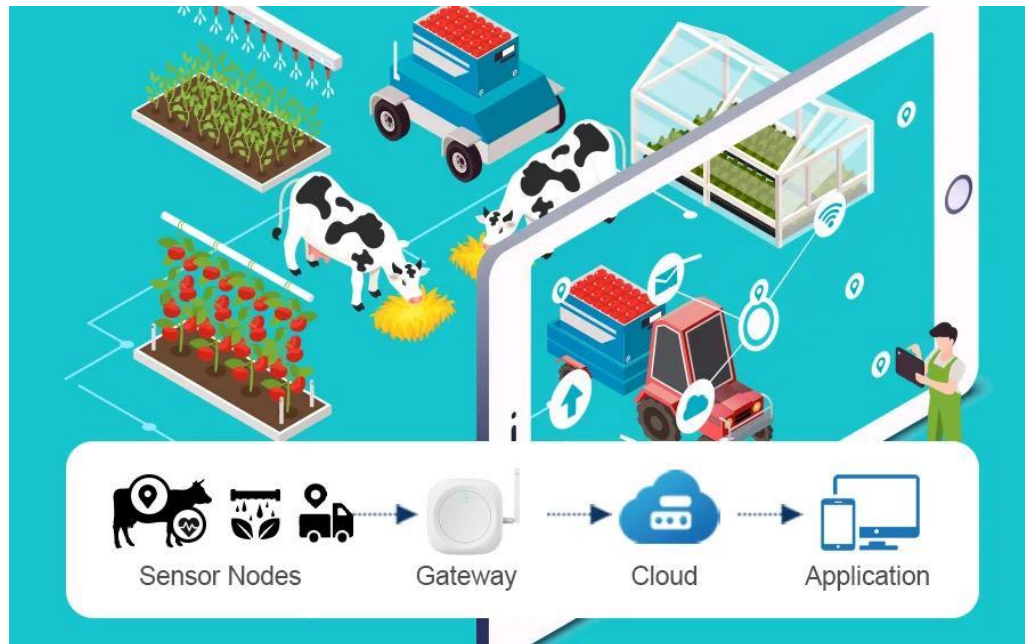
Aspek keamanan data (*data security*) juga menjadi perhatian dalam pengembangan sistem *smart agriculture*. Data yang dikumpulkan memiliki nilai strategis dan perlu dilindungi dari akses yang tidak sah [34]. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme keamanan yang mampu menjamin kerahasiaan, integritas, dan ketersediaan data. Selain itu, isu privasi juga perlu diperhatikan, terutama dalam pengelolaan data yang melibatkan banyak pihak. Dari sisi keberlanjutan, *smart agriculture* memiliki potensi untuk mendukung kegiatan pertanian yang lebih aman bagi lingkungan. Dengan pemanfaatan sumber daya yang lebih hemat, seperti air dan pupuk, dampak negatif terhadap lingkungan dapat diminimalkan [35]. di samping itu, teknologi ini juga mampu membantu dalam pengelolaan limbah pertanian serta pengurangan emisi gas rumah kaca.

Secara keseluruhan, menunjukkan bahwa *smart agriculture* merupakan pendekatan multidisiplin yang menggabungkan berbagai teknologi informatika untuk meningkatkan kinerja sektor pertanian. Integrasi antara IoT, *big data*, kecerdasan buatan, dan komputasi awan menciptakan sistem yang mampu memberikan solusi inovatif terhadap berbagai permasalahan pertanian [36]. Meskipun terdapat tantangan dalam implementasinya, potensi manfaat yang ditawarkan menjadikan *smart agriculture* sebagai satu di antara inovasi berperan penting dalam mendukung keamanan pangan di era digital [37].

III. METODE

A. Perancangan Arsitektur Sistem

Penelitian ini merancang sistem *smart agriculture* berbasis teknologi informatika dengan pendekatan arsitektur berlapis yang terdiri tersusun atas node sensor, gateway, dan server berbasis *cloud*. Sistem ini dirancang untuk mampu melakukan pemantauan kondisi lahan secara langsung serta memberikan rekomendasi berbasis data guna mendukung ketahanan pangan [38], [39]. Node sensor ditempatkan pada area pertanian untuk mengukur berbagai parameter lingkungan seperti tingkat kelembapan tanah, suhu udara serta tingkat intensitas cahaya. Data yang diperoleh kemudian dikirimkan melalui jaringan nirkabel menuju gateway sebagai penghubung ke server pusat. Selanjutnya, server melakukan proses penyimpanan, analisis, serta visualisasi data [40], [41].



Gambar 1. Arsitektur Sistem Smart Agriculture

Diagram tersebut menunjukkan alur komunikasi data dari node sensor menuju gateway menggunakan jaringan nirkabel, kemudian diteruskan ke server *cloud* untuk diproses dan ditampilkan dalam bentuk dashboard monitoring.

B. Perangkat Keras dan Sensor yang Digunakan

Sistem yang dikembangkan menggunakan beberapa perangkat keras utama yang dipilih berdasarkan efisiensi energi, kestabilan komunikasi, serta kemudahan implementasi di lapangan [42], [43]. Sensor digunakan untuk mengukur parameter lingkungan yang relevan terhadap kondisi pertanian [44].

Tabel 1. Menunjukkan Daftar Perangkat Keras Yang Digunakan Dalam Sistem.

Komponen	Spesifikasi Utama	Fungsi
Node Sensor	ESP32 / Arduino	Pemrosesan data dan kontrol sistem
Sensor Tanah	Soil Moisture Sensor	Mengukur kelembaban tanah
Sensor Suhu	DHT22 / SHT31	Mengukur suhu dan kelembapan udara
Sensor Cahaya	LDR Sensor	Mengukur intensitas cahaya
Modul Komunikasi	LoRa / WiFi	Transmisi data nirkabel
Gateway	Raspberry Pi / ESP32	Penghubung ke server
Power Supply	Baterai + Solar Panel	Sumber energi sistem

Penggunaan sensor dan perangkat ini memungkinkan sistem bekerja secara otomatis dalam melakukan pemantauan kondisi lahan secara kontinu.

C. Pengembangan Sistem dan Protokol Komunikasi

Node sensor diprogram untuk melakukan pembacaan data secara periodik menggunakan interval tertentu [45]. Data yang diperoleh kemudian melalui proses *preprocessing* seperti normalisasi dan filtering untuk mengurangi noise. Selanjutnya, data dikirimkan ke gateway menggunakan protokol komunikasi nirkabel. Gateway berfungsi sebagai *data aggregator* yang meneruskan data ke server menggunakan protokol MQTT berbasis internet [46]. Pada server, data disimpan di dalam basis data dan ditampilkan dalam bentuk dashboard monitoring [47].

Untuk meningkatkan efisiensi sistem, diterapkan beberapa mekanisme, yaitu:

1. Duty cycling → node aktif hanya saat pengambilan data
2. Sleep mode → mengurangi konsumsi daya saat idle
3. Adaptive transmission → pengiriman data hanya saat terjadi perubahan signifikan

Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan algoritma *machine learning* sederhana untuk menghasilkan rekomendasi, seperti kebutuhan irigasi berdasarkan kondisi tanah [48], [49], [50].

D. Pengujian dan Evaluasi Sistem

Pengujian dilakukan untuk menilai kinerja sistem secara keseluruhan dalam kondisi nyata di lapangan. Parameter yang diukur meliputi:

1. Akurasi sensor terhadap kondisi lingkungan
2. Stabilitas komunikasi jaringan
3. Konsumsi energi perangkat
4. Latensi pengiriman data

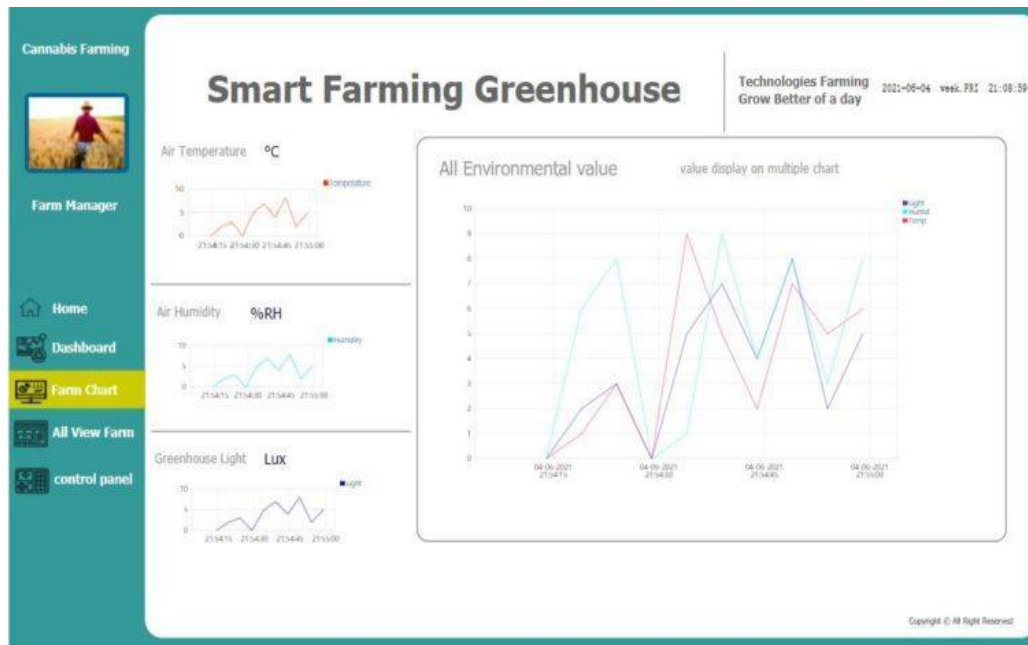
Pengujian dilakukan dalam beberapa skenario:

1. Skenario 1: Jarak dekat (< 50 meter)
2. Skenario 2: Jarak menengah (50–150 meter)
3. Skenario 3: Jarak jauh (>150 meter dengan hambatan)

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan metode statistik sederhana seperti rata-rata dan perbandingan terhadap metode konvensional. Evaluasi juga dilakukan untuk melihat peningkatan efisiensi penggunaan air dan sumber daya setelah sistem diterapkan [51], [52], [53], [54].

IV. HASIL

A. Hasil Pengukuran Parameter Lingkungan



Gambar1. Hasil Monitoring Parameter Lingkungan

Sistem *smart agriculture* yang dikembangkan berhasil melakukan monitoring parameter kondisi lingkungan secara real-time yang meliputi kelembapan tanah, suhu udara, serta tingkat intensitas cahaya. Pengambilan data dilakukan secara periodik dengan interval waktu tertentu sehingga menghasilkan data yang kontinu dan dapat dianalisis lebih lanjut.

Dari hasil pengujian diketahui bahwa sensor mampu beroperasi dengan stabil pada berbagai keadaan lingkungan. Data yang diperoleh menunjukkan pola yang konsisten, di mana kelembapan tanah menurun saat kondisi cuaca panas dan meningkat setelah dilakukan irigasi. Suhu udara juga menunjukkan fluktuasi harian yang normal sesuai dengan siklus siang dan malam.

Tabel 2. Menunjukkan Hasil Pengukuran Parameter Lingkungan

Parameter	Rentang Nilai	Rata-rata	Keterangan
Kelembaban Tanah	40% – 75%	58%	Stabil, responsif irigasi
Suhu Udara	26°C – 34°C	30°C	Fluktuasi normal
Intensitas Cahaya	300 – 900 lux	650 lux	Sesuai kondisi siang

Berdasarkan tabel tersebut, dapat diketahui bahwa sistem dapat menghasilkan data yang valid dan representatif terhadap kondisi lingkungan aktual.

B. Performa Sistem dan Komunikasi Data

Pengujian performa sistem dilakukan untuk mengetahui keandalan komunikasi antara node sensor, gateway, dan server. Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan data secara real-time dengan tingkat keberhasilan pengiriman yang tinggi. Pada kondisi jarak dekat, sistem menunjukkan performa optimal dengan hampir tidak ada kehilangan data. Pada jarak menengah hingga jauh, terjadi sedikit penurunan kualitas sinyal, namun sistem masih mampu mempertahankan kestabilan komunikasi

Tabel 3. Menunjukkan Performa Komunikasi Sistem

Skenario Jarak	Packet Delivery Ratio	Latensi (ms)	Keterangan
< 50 meter	100%	150–200	Sangat stabil
50–150 meter	95–98%	200–300	Stabil
> 150 meter	90–94%	300–450	Cukup stabil

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem masih dapat digunakan pada area pertanian yang luas dengan tingkat keandalan yang baik.

C. Konsumsi Energi Node Sensor

Efisiensi energi menjadi salah satu indikator utama dalam sistem yang berbasis sensor. Berdasarkan hasil pengujian, penggunaan mekanisme *duty cycling* dan *sleep mode* mampu mengurangi konsumsi daya secara signifikan.

Node sensor hanya aktif pada saat proses pengambilan dan pengiriman data, sedangkan pada waktu lainnya berada dalam kondisi hemat energi. Kondisi ini memungkinkan sistem untuk beroperasi dalam durasi waktu yang lebih panjang.

Tabel 4. Menunjukkan Konsumsi Energi Sistem

Mode Operasi	Konsumsi Arus	Durasi Aktif	Keterangan
Aktif	70–90 mA	3–5 detik	Pengambilan data
Sleep Mode	< 10 mA	Mayoritas waktu	Hemat energi
Rata-rata	20–30 mA	Per siklus	Efisien

Dengan konfigurasi tersebut, sistem dapat bertahan hingga beberapa minggu, terutama jika didukung dengan sumber energi tambahan seperti panel surya..

D. Analisis dan Pembahasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan *smart agriculture* berbasis informatika dapat meningkatkan efisiensi dalam pemantauan kondisi pertanian. Sistem tidak hanya mampu mengumpulkan data secara real-time, tetapi juga menyajikan informasi yang dapat dijadikan dasar dalam pengambilan keputusan. Dari sisi teknis, integrasi antara sensor, komunikasi nirkabel, dan *cloud computing* berjalan dengan baik tanpa kendala berarti. Sistem juga menunjukkan kemampuan adaptasi terhadap berbagai kondisi lingkungan, yang menjadi indikator bahwa teknologi ini layak diterapkan pada skala lebih luas.

Selain itu, efisiensi penggunaan sumber daya seperti air dapat ditingkatkan melalui rekomendasi berbasis data yang dihasilkan oleh sistem. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan *smart agriculture* tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga mendukung praktik pertanian yang berkelanjutan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperkuat bahwa teknologi informatika memiliki peran strategis dalam mentransformasi sektor pertanian menjadi lebih modern dan efisien. Implementasi sistem ini menjadi langkah konkret dalam mendukung ketahanan pangan melalui pemanfaatan teknologi digital.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan *smart agriculture* berbasis informatika mampu memberikan peningkatan yang signifikan dalam proses pemantauan dan pengelolaan pertanian. Sistem yang dirancang tidak hanya berhasil mengumpulkan data lingkungan secara real-time, tetapi juga mampu menjaga kestabilan performa dalam berbagai kondisi operasional. Integrasi antara sensor, jaringan komunikasi, dan platform *cloud* menghasilkan alur sistem yang efisien serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Hal ini menjadi indikator bahwa pendekatan teknologi digital dalam pertanian memiliki potensi besar dalam meningkatkan produktivitas sekaligus efisiensi sumber daya. Dari sisi kualitas data, sensor yang digunakan mampu menghasilkan informasi yang stabil dan representatif terhadap kondisi lingkungan aktual. Data yang diperoleh menunjukkan pola yang logis, seperti hubungan antara kelembaban tanah dan kebutuhan irigasi. Konsistensi data ini sangat penting karena menjadi dasar dalam analisis lanjutan, termasuk penerapan algoritma cerdas untuk prediksi dan rekomendasi. Dengan demikian, sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring, tetapi juga sebagai bagian dari sistem pendukung keputusan (*decision support system*).

Selain itu, performa komunikasi sistem menunjukkan tingkat keandalan yang baik. Meskipun terjadi penurunan kualitas sinyal pada jarak tertentu atau adanya hambatan fisik, sistem tetap mampu mengirimkan data tanpa kehilangan informasi yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan teknologi komunikasi yang digunakan sudah sesuai dengan kebutuhan implementasi di lingkungan pertanian yang cenderung luas dan terbuka. Keandalan komunikasi menjadi aspek krusial karena berpengaruh langsung terhadap kontinuitas data yang diterima oleh pengguna.

Efisiensi energi juga menjadi salah satu keunggulan utama dalam sistem ini. Penerapan mekanisme seperti *duty cycling* dan *sleep mode* terbukti mampu mengurangi konsumsi daya secara signifikan, sehingga sistem dapat beroperasi dalam jangka waktu yang lebih lama tanpa memerlukan penggantian sumber daya secara rutin. Hal ini sangat penting terutama pada implementasi di lapangan yang memiliki keterbatasan akses terhadap sumber energi. Secara lebih rinci, hasil penelitian ini dapat dirangkum ke dalam beberapa poin utama sebagai berikut:

1. Peningkatan Efisiensi Monitoring
Sistem mampu menggantikan metode konvensional yang bersifat manual dengan monitoring otomatis berbasis sensor. Hal ini mengurangi ketergantungan pada observasi langsung serta meningkatkan akurasi data yang diperoleh.
2. Keandalan Sistem dan Komunikasi
Sistem menunjukkan performa komunikasi yang stabil dalam berbagai kondisi, sehingga mendukung pengiriman data secara real-time tanpa gangguan signifikan.
3. Efisiensi Energi dan Keberlanjutan
Penggunaan teknik hemat energi memungkinkan sistem beroperasi dalam jangka panjang, sehingga cocok untuk implementasi di area pertanian yang luas dan minim infrastruktur.

Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat bahwa penerapan *smart agriculture* sebagai inovasi informatika tidak hanya memberikan solusi teknis, tetapi juga memberikan dampak nyata dalam mendukung ketahanan pangan melalui peningkatan efisiensi, akurasi, dan keberlanjutan sistem pertanian.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan sistem *Wireless Sensor Network* (WSN) untuk memantau lingkungan pertanian sehingga mendukung proses monitoring dan pengelolaan yang lebih efisien dan terintegrasi. Sistem yang dirancang dapat mengumpulkan data lingkungan secara langsung dengan tingkat ketelitian yang baik dan stabilitas yang baik, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan berbasis data. Integrasi antara sensor, komunikasi nirkabel, dan platform *cloud* menunjukkan performa yang andal dalam berbagai kondisi operasional. Hasil uji juga menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat keandalan komunikasi yang tinggi serta mampu beroperasi pada berbagai skenario jarak dengan performa yang masih stabil. Selain itu, penerapan mekanisme efisiensi energi seperti *duty cycling* dan *sleep mode* terbukti efektif dalam menekan konsumsi daya, sehingga sistem dapat digunakan untuk pemantauan jangka panjang dengan kebutuhan perawatan yang minimal. Secara keseluruhan, penerapan *smart agriculture* sebagai inovasi informatika memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya serta mendukung praktik pertanian yang lebih modern dan berkelanjutan. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan memiliki peluang besar untuk diterapkan secara luas sebagai solusi guna mendukung ketahanan pangan, khususnya di era digital yang menuntut pemanfaatan teknologi secara optimal.

Kontribusi Penulis: Ach. Nur Maulidi: Konseptualisasi, Metodologi, Perancangan Sistem Smart Agriculture, Analisis Data, Penulisan – Draf Awal, Penulisan – Tinjauan & Penyuntingan, Supervisi.

Achmed Abdillah: Implementasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak, Integrasi Sensor dan IoT, Pengujian Sistem, Akuisisi Data Lingkungan, Analisis Kinerja Sistem, Penulisan – 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: -

Penulis Kedua: https: -

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] S. K. Susee, M. S. Kumar, and B. Chidambaranarajan, "A novel homomorphic encryption-based optimization framework for wireless sensor networks," *Microsyst. Technol.*, vol. 31, no. 10, pp. 2961–2981, 2025, doi: 10.1007/s00542-025-05921-1.
- [2] 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.
- [3] G. Asaamoning, P. Mendes, and N. Magaia, "A Dynamic Clustering Mechanism with Load-Balancing for Flying Ad Hoc Networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158574–158586, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3130417.
- [4] K. Saminathan, L. Perumal, F. H. Shajin, and R. K. Shakya, "Multicast On-Route cluster propagation to detect network intrusion detection systems on MANET using Deep Operator Neural networks," *Expert Syst. Appl.*, vol. 271, 2025, doi: 10.1016/j.eswa.2024.125864.
- [5] G. T. Al-Mamari, F. Bouabdallah, and A. Cherif, "Extending WSN Lifetime via Optimized Mobile Sink Trajectories: Linear Programming and Cuckoo Search Approaches with Overhearing-Aware Energy Models," *Internet of Things*, vol. 6, no. 3, 2025, doi: 10.3390/iot6030054.
- [6] F. P. E. Putra, S. R. Sutarsih, P. Permana, and M. U. Mansyur, "Optimalisasi Perancangan Aplikasi Manajemen Data Koloman, Di Desa Pulau Mandangin Sampang – Madura Berbasis Website," *RABIT J. Teknol. dan Sist. Inf. Univrab*, vol. 9, no. 2, pp. 285–294, 2024, doi: 10.36341/rabit.v9i2.4840.
- [7] K. Qu, J. Ye, X. Li, and S. Guo, "Privacy and Security in Ubiquitous Integrated Sensing and Communication: Threats, Challenges and Future Directions," *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 52–58, 2024, doi: 10.1109/IOTM.001.2300180.
- [8] F. Prasetyo, E. Putra, R. N. Saputra, F. M. Haris, and S. Nur, "Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 356–361, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4231.
- [9] E. Suciana, M. H. Nasrullah, D. A. Christanto, D. Cahyadi, and L. T. Giantri, "Pemanfaatan IoT untuk Efisiensi Energi pada Pabrik Pintar: Tantangan, Solusi dan Tren Teknologi," *J. Teknol. Terpadu*, vol. 11, no. 1, pp. 70–77, 2025, doi: 10.54914/jtt.v11i1.1897.
- [10] 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*, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3457.
- [11] K. V Reddy *et al.*, "Edge AI in Sustainable Farming: Deep Learning-Driven IoT Framework to Safeguard Crops From Wildlife Threats," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 77707–77723, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3406585.
- [12] F. Fauzan Prasetyo Eka Putra¹, Syirofi, Moh.Mursidi, D. Wahid, and A. Nuraini, "Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik," *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 931–937, 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [13] F. P. E. Putra, D. E. Arissandi, A. Rofiqi, and M. F. Hidayat, "Pemanfaatan Mikrotik Dalam Manajemen Bandwidth Pada Jaringan Sekolah," 2025, *researchgate.net*, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5938.
- [14] F. P. E. Putra, F. Fauzan, S. Syirofi, M. Mursidi, D. Wahid, and ..., "Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik," 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.

- [15] M. A. Akram, A. N. Mian, A. K. Biswas, S. Kumari, and C.-M. Chen, "Privacy-Preserving Lightweight LoRaWAN Authentication Protocol for IoT Applications," *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 20, pp. 42790–42802, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2025.3593886.
- [16] R. Mishra, D. Ramesh, P. Bellavista, and D. R. Edla, "Redactable Blockchain-Assisted Secure Data Aggregation Scheme for Fog-Enabled Internet-of-Farming-Things," *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.*, vol. 20, no. 4, pp. 4652–4667, 2023, doi: 10.1109/TNSM.2023.3322442.
- [17] M. N. Fauzan, R. Munadi, S. Sumaryo, and H. H. Nuha, "Enhanced Grey Wolf Optimization for Efficient Transmission Power Optimization in Wireless Sensor Network," *Appl. Syst. Innov.*, vol. 8, no. 2, 2025, doi: 10.3390/asi8020036.
- [18] X. Xia *et al.*, "Dynamic-environment-adaptive triboelectric nanogenerator utilizing wind-water energy synergy," *Chem. Eng. J.*, vol. 520, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.165688.
- [19] F. P. E. Putra, N. Ramadhani, F. Fauzan, and ..., "Service Quality Analysis of RFID-Based Smart Door Lock in Front One Azana Style Hotel Area," ... *Res. Artif. ...*, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4292.
- [20] A. E. Setyono, B. Fajar, and T. Kiono, "Dari Energi Fosil Menuju Energi Terbarukan : Potret Kondisi Minyak dan Gas Bumi Indonesia Tahun 2020 – 2050," vol. 2, no. 3, pp. 154–162, 2025, doi: 10.14710/jebt.2021.11157.
- [21] M. Ahmed, R. Othman, M. F. Noordin, A. A. Ibrahim, and A. I. S. Al-Hussaini, "Factors influencing open science participation through research data sharing and reuse among researchers: a systematic literature review," *Knowl. Inf. Syst.*, vol. 67, no. 3, pp. 2801–2853, 2025, doi: 10.1007/s10115-024-02284-3.
- [22] F. P. E. Putra, A. Baidawi, and A. A. Mubarak, "Merancang Jaringan Sensor Nirkabel dan IoT untuk Kota Pintar Pamekasan," *J. Inf. dan Teknol.*, vol. 5, no. 2, pp. 138–145, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i1.331.
- [23] A. Saha and M. A. Alam, "Practical and Thermodynamic Limits of Dual-Use, Potentiometric Energy Harvesters for Self-Powered Sensors," *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 8, no. 1, pp. 238–244, 2025, doi: 10.1021/acsaem.4c02320.
- [24] H. Singh, P. Yadav, V. Rishiwal, M. Yadav, S. Tanwar, and O. Singh, "Localization in WSN-Assisted IoT Networks Using Machine Learning Techniques for Smart Agriculture," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 38, no. 5, 2025, doi: 10.1002/dac.6004.
- [25] W. Liu, "Smart sensors, sensing mechanisms and platforms of sustainable smart agriculture realized through the big data analysis," *Cluster Comput.*, vol. 26, no. 5, pp. 2503–2517, 2023, doi: 10.1007/s10586-021-03295-3.
- [26] S. Sathian, J. Zhuang, Y. Tang, Y. He, C. Hou, and S. Luo, "Wireless sensor deployment scheme for cost-effective smart farming using the ABC-TEEM algorithm," *Evol. Syst.*, vol. 14, no. 4, pp. 567–579, 2023, doi: 10.1007/s12530-021-09412-2.
- [27] S. Kaiser, M. S. Haq, A. S. Tosun, and T. Korkmaz, "Container Technologies for ARM Architecture: A Comprehensive Survey of the State-of-the-Art," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 84853–84881, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3197151.
- [28] E. Ozkan, İ. Kök, and S. Özdemir, "System Development Life-Cycle Assisted Digital Twin Development Model for Smart Micro-grids," *Internet Things (The Netherlands)*, vol. 31, 2025, doi: 10.1016/j.iot.2025.101580.
- [29] S. Solera-Cotanilla, M. Álvarez-Campana, C. Sánchez-Zas, and M. Vega-Barbas, "Proposal for a security and privacy enhancement system for private smart environments," *Internet Things (The Netherlands)*, vol. 31,

2025, doi: 10.1016/j.iot.2025.101585.

- [30] V. V Shakhov, D. A. Migov, H. Chen, P. V Mishchenko, and I. Koo, "Toward Reliability of Long Wireless Sensor Networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 124506–124516, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3454367.
- [31] R. C. M. Teixeira *et al.*, "FloatingBlue: A Delay Tolerant Networks-Enabled Internet of Things Architecture for Remote Areas Combining Data Mules and Low Power Communications," *Sensors*, vol. 24, no. 19, 2024, doi: 10.3390/s24196218.
- [32] C. Trigona, G. A. Salerno, N. Salerno, S. Baglio, and A. R. Bulsara, "Analytical modeling of tribo/piezoelectric transducers for energy harvesting from slow plant movements," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 256, 2025, doi: 10.1016/j.measurement.2025.118109.
- [33] 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.
- [34] T. Mahjoub, A. Ben Mnaouer, M. B. Ben Said, and H. Boujemâa, "LoRa signal propagation and path loss prediction in Tunisian date palm oases," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 222, 2024, doi: 10.1016/j.compag.2024.109027.
- [35] M. A. Tawfeek, N. Yanes, L. Menzli, G. Aldehim, and M. A. Mahmood, "Adaptive Deep Learning Model to Enhance Smart Greenhouse Agriculture," *Comput. Mater. Contin.*, vol. 77, no. 2, pp. 2545–2564, 2023, doi: 10.32604/cmc.2023.042179.
- [36] S. Kumar and A. Shankar, "Cluster-based energy-efficient routing protocol in next generation sensor networks," *Int. J. Grid Util. Comput.*, vol. 15, no. 2, pp. 181–197, 2024, doi: 10.1504/IJGUC.2024.137908.
- [37] A. Pourghasem, R. Kirner, A. Tsokanos, I. Mporas, and A. Mylonas, "Machine Learning and Deep Learning-Based Multi-Attribute Physical-Layer Authentication for Spoofing Detection in LoRaWAN," *Futur. Internet*, vol. 17, no. 2, 2025, doi: 10.3390/fi17020068.
- [38] S. Ahmad, N. Akhtar, A. Ahmed, S. Iftikhar, S. Bawazeer, and S. Abdullah, "An Ensemble Formal Approach to Improve Energy Efficiency and Data Aggregation in Smart Agriculture," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 65316–65333, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3558551.
- [39] Y. Purwaningsih, S. Hartono, and J. H. Mulyo, "Pola pengeluaran pangan rumah tangga menurut tingkat ketahanan pangan di provinsi jawa tengah," vol. 11, 2010, doi: 10.23917/jep.v11i2.327.
- [40] S. Rai, R. Paul, S. Banerjee, and P. Meher, "An efficient hybrid multifactor mutual authentication and session key agreement scheme for patient monitoring system using IoMT," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 83, no. 36, pp. 83805–83835, 2024, doi: 10.1007/s11042-024-18625-x.
- [41] S. Pathak, J. Singh, A. Patnaik, A. K. Gautam, and T. Goel, "Wideband hybrid AEH system: Exploring transparent and opaque materials for sustainable power solutions in small gadgets," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 201, 2025, doi: 10.1016/j.aeue.2025.155973.
- [42] L. Wu, Z. Ren, Y. Wang, Y. Tang, Z. L. Wang, and R. Yang, "Miniaturized and High Volumetric Energy Density Power Supply Device Based on a Broad-Frequency Vibration Driven Triboelectric Nanogenerator," *Micromachines*, vol. 15, no. 5, 2024, doi: 10.3390/mi15050645.
- [43] A. S. Rajasekaran, A. Azees, R. Maheswar, and J. Lorincz, "Blockchain Enabled Anonymous Privacy-Preserving Authentication Scheme for Internet of Health Things," *Sensors*, vol. 23, no. 1, 2023, doi: 10.3390/s23010240.
- [44] M. Cardamis, C. T. Chou, and W. Hu, "MotionLeaf: Fine-grained Multi-leaf Damped Vibration Monitoring

- for Plant Water Stress Using Cost-effective mmWave Sensors,” *Proc. ACM Interactive, Mobile, Wearable Ubiquitous Technol.*, vol. 9, no. 3, 2025, doi: 10.1145/3749547.
- [45] S. Singh, A. S. Nandan, G. Sikka, A. Malik, and P. K. Singh, “Genetic algorithm based data controlling method using IoT enabled WSNs,” *Soft Comput.*, vol. 29, no. 5, pp. 2465–2482, 2025, doi: 10.1007/s00500-024-10396-9.
- [46] R. K. Jain, A. Mukherjee, P. Karmakar, A. Banerjee, H. Akbarov, and S. Hasanov, “Experimental performance of soil monitoring system using IoT technique for automatic drip irrigation,” *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 36, no. 18, 2023, doi: 10.1002/dac.5617.
- [47] A. Oztoprak, R. Hassanpour, A. Ozkan, and K. Öztoprak, “Security Challenges, Mitigation Strategies, and Future Trends in Wireless Sensor Networks: A Review,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 57, no. 4, 2024, doi: 10.1145/3706583.
- [48] K.-K. Kee, R. Rashidi, O. K.-H. Kee, A. B. Han, I. Z. Patrick, and L. M. Bawen, “Context-aware self-powered intelligent soil monitoring system for precise agriculture,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 1123–1131, 2025, doi: 10.11591/ijece.v15i1.pp1123-1131.
- [49] V. Kumar, K. V Sharma, N. Kedam, A. Patel, T. R. Kate, and U. Rathnayake, “A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies,” *Smart Agric. Technol.*, vol. 8, 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100487.
- [50] J. Sistim, “Interaktif dan Personalisasi : Peningkatan Pembelajaran IoT di Sekolah,” vol. 5, no. 2, pp. 6–7, 2023, doi: 10.37034/jsisfotek.v5i1.236, doi: 10.55334/sostek.v3i1.200.
- [51] J. Sistim, F. Prasetyo, E. Putra, S. M. Dewi, and A. Hamzah, “Privasi dan Keamanan Penerapan IoT Dalam Kehidupan Sehari-Hari : Tantangan dan Implikasi,” vol. 5, no. 2, pp. 26–32, 2023, doi: 10.37034/jsisfotek.v5i1.232.
- [52] I. J. Informatika and M. Teknologi, “TREN DAN PRAKTIK TERBAIK DALAM PENGEMBANGAN WEB BERBASIS API : KAJIAN LITERATUR TERHADAP FRAMEWORK,” vol. 27, pp. 165–178, 2025, doi: 10.23969/infomatek.v27i1.25122.
- [53] J. Informasi, F. Prasetyo, E. Putra, M. Riski, Y. R. Febriani, and M. U. Mansyur, “Optimization of Web Based Academic Information System Design to Increase Efficiency in Junior High Schools,” vol. 6, pp. 150–158, 2024, doi: 10.60083/jidt.v6i2.545.
- [54] 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.