



Implementasi Teknologi Internet of Things (IoT) dalam Meningkatkan Efisiensi Sistem Pertanian Modern

Riska Rahayu

UIN Siber Syekh Nurjati, Indonesia

Corresponding Author: riskarahayuuu03@gmail.com

Manuscript accepted:

Revised:

Date of publication:

KEYWORD

Internet of Things,
agricultural efficiency,
smart farming, food
security

ABSTRACT

This research addresses the growing global challenge of limited agricultural resources amid climate change and increasing food demand. This study aims to analyze the implementation of Internet of Things (IoT) technology in improving the efficiency of modern agricultural systems with a focus on water and fertilizer use, environmental monitoring, and socio-economic impacts. The background of this research is based on global challenges such as limited resources, climate change, and increasing food needs due to population growth. The research method uses a qualitative descriptive approach through in-depth interviews, participant observation, and documentation of farmers who have implemented IoT devices on their farms. The results show that the IoT system is able to save an average of 30% of water use and 20% of fertilizer use per hectare per planting season, while increasing rice productivity by around 15%. The application of soil moisture sensors, nutrient monitoring, and climate control devices has been proven to provide real-time data that supports more precise decision-making. In addition to technical benefits, this study found positive socio-economic impacts, such as increased net profits for farmers, the attractiveness of the agricultural sector for the younger generation, and the creation of new business opportunities in the agritech sector. This study concludes that IoT is not only a technical solution, but also the foundation for the transformation of modern agriculture towards a more adaptive, sustainable, and globally competitive model, while supporting the achievement of sustainable development goals.

KATA KUNCI

Internet of Things,
efisiensi pertanian, smart
farming, ketahanan
pangan

ABSTRAK

Penelitian ini merespons tantangan global berupa keterbatasan sumber daya pertanian di tengah perubahan iklim dan peningkatan kebutuhan pangan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis implementasi teknologi Internet of Things (IoT) dalam meningkatkan efisiensi sistem pertanian modern dengan fokus pada penggunaan air, pupuk, monitoring lingkungan, serta dampak sosial-ekonomi. Latar belakang penelitian ini didasarkan pada tantangan global berupa keterbatasan sumber daya, perubahan iklim, dan kebutuhan pangan yang meningkat seiring pertumbuhan populasi. Metode penelitian menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif melalui wawancara mendalam, observasi partisipatif, dan dokumentasi terhadap petani yang telah menerapkan perangkat IoT pada lahan pertanian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem IoT mampu menghemat penggunaan air rata-rata 30% dan pupuk sebesar 20% per hektar per musim tanam, sekaligus meningkatkan produktivitas padi sekitar 15%. Penerapan sensor kelembaban tanah, monitoring nutrisi, dan perangkat pengendali iklim terbukti memberikan data real-time yang mendukung pengambilan keputusan lebih presisi. Selain manfaat teknis, penelitian ini menemukan adanya dampak sosial-ekonomi positif, seperti peningkatan keuntungan bersih petani, daya tarik sektor pertanian bagi generasi muda, serta terbentuknya peluang usaha baru di bidang agritech. Penelitian ini menyimpulkan bahwa IoT bukan hanya solusi teknis, tetapi juga fondasi transformasi pertanian modern menuju model yang lebih adaptif, berkelanjutan, dan berdaya saing global, sekaligus mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan.

PENDAHULUAN

Pertanian modern saat ini menghadapi tantangan global yang semakin kompleks, terutama akibat perubahan iklim, peningkatan populasi, dan keterbatasan sumber daya alam. Organisasi Pangan dan Pertanian Dunia (FAO) memprediksi bahwa produksi pangan harus meningkat sekitar 70% pada tahun 2050 untuk memenuhi kebutuhan populasi dunia yang diproyeksikan mencapai 9,7 miliar jiwa (FAO, 2020). Dalam konteks ini, penerapan teknologi digital, khususnya Internet of Things (IoT), menjadi salah satu solusi yang potensial untuk meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan (Rose et al., 2015; Wolfert et al., 2017).

Permasalahan di sektor pertanian muncul karena faktor-faktor seperti keterbatasan lahan subur, degradasi lingkungan, inefisiensi penggunaan air, dan ketergantungan pada metode tradisional (Gebbers & Adamchuk, 2010). Selain itu, keterbatasan tenaga kerja pertanian akibat urbanisasi juga mengurangi produktivitas lahan. Di sisi lain, variabilitas iklim meningkatkan risiko gagal panen dan ketidakpastian hasil (Ray et al., 2013; Wheeler & von Braun, 2013). Oleh karena itu, diperlukan sistem yang mampu memantau kondisi pertanian secara real-time dan memberikan rekomendasi berbasis data.

Faktor-faktor tersebut berdampak pada menurunnya efisiensi pertanian, meningkatnya biaya produksi, serta menurunnya daya saing produk pertanian di pasar global (Zhang et al., 2014). Kelemahan dalam pemantauan kondisi tanah, penggunaan pupuk, dan distribusi air menyebabkan pemborosan sumber daya. Akibatnya, petani mengalami kerugian ekonomi dan pada saat yang sama terjadi degradasi lingkungan, seperti pencemaran tanah dan air akibat penggunaan pestisida berlebih (Godfray et al., 2010; Tilman et al., 2011).

Internet of Things (IoT) didefinisikan sebagai jaringan perangkat cerdas yang saling terhubung untuk mengumpulkan, mengolah, dan bertukar data melalui internet (Ashton, 2009). Dalam sektor pertanian, IoT diaplikasikan melalui sensor kelembaban tanah, perangkat pemantauan iklim, drone untuk penginderaan jarak jauh, serta sistem irigasi otomatis berbasis data (Ayaz et al., 2019). Penerapan IoT memungkinkan proses pengambilan keputusan lebih cepat, presisi, dan berbasis informasi real-time (Kamilaris et al., 2016).

Penelitian mengenai IoT di bidang pertanian sudah banyak dilakukan, namun kebanyakan masih berfokus pada aspek teknis implementasi atau efisiensi parsial pada satu variabel saja, seperti irigasi atau pemupukan. Kesenjangan penelitian (*research gap*) terletak pada minimnya studi yang mengintegrasikan secara komprehensif aspek efisiensi air, pupuk, monitoring lingkungan, dan dampak sosial-ekonomi dalam satu kerangka holistik. Novelty penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang menggabungkan pemantauan lingkungan, efisiensi penggunaan sumber daya, dan pengambilan keputusan cerdas untuk menciptakan sistem pertanian presisi yang lebih adaptif dan berkelanjutan (Boursianis et al., 2022).

Urgensi penelitian ini semakin meningkat karena ketahanan pangan global sangat bergantung pada kemampuan sistem pertanian beradaptasi terhadap perubahan iklim dan meningkatnya permintaan pangan. Implementasi IoT dipandang sebagai solusi strategis untuk menjawab kebutuhan tersebut, terutama di negara berkembang yang menghadapi keterbatasan sumber daya namun memiliki potensi pertanian besar (Patil & Kale, 2016; Liakos et al., 2018).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis implementasi teknologi IoT dalam sistem pertanian modern dengan fokus pada peningkatan efisiensi penggunaan air, pupuk, serta monitoring lingkungan. Selain itu, penelitian ini berusaha memberikan gambaran bagaimana IoT dapat diintegrasikan secara praktis dalam konteks pertanian Indonesia yang memiliki karakteristik geografis dan iklim tropis yang khas.

Manfaat penelitian ini diharapkan mencakup tiga aspek utama. Pertama, memberikan kontribusi akademis berupa kerangka konseptual penerapan IoT dalam pertanian modern. Kedua, memberikan manfaat praktis bagi petani dan pemangku kepentingan dalam meningkatkan produktivitas dan efisiensi sumber daya. Ketiga, memberikan manfaat sosial berupa peningkatan ketahanan pangan dan keberlanjutan lingkungan (Jayaram & Vidhya, 2020). Dengan demikian, penelitian ini diharapkan menjadi rujukan dalam pengembangan pertanian berbasis teknologi digital yang berdaya saing tinggi.

METODE

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain studi kasus eksploratif, yang bertujuan untuk menggali secara mendalam implementasi teknologi Internet of Things (IoT) dalam sistem pertanian modern. Pendekatan kualitatif dipilih karena fokus penelitian bukan hanya pada pengukuran kuantitatif, tetapi lebih pada pemahaman mendalam terkait proses, kendala, serta dampak penggunaan IoT pada praktik pertanian (Creswell & Poth, 2018). Penelitian dilaksanakan pada periode Januari hingga Juni 2024 di wilayah Jawa Barat dan Jawa Tengah yang telah menerapkan sistem pertanian berbasis IoT.

Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian kualitatif deskriptif. Penelitian ini bertujuan mendeskripsikan fenomena implementasi IoT di pertanian, baik dari aspek teknologi, efisiensi, maupun dampak sosial-ekonomi yang muncul.

Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini mencakup pelaku pertanian modern yang sudah menerapkan teknologi digital di sektor pertanian, termasuk petani, penyuluh, serta perusahaan agritech. Sampel penelitian ditentukan secara purposive sampling, yakni responden dipilih berdasarkan keterlibatan mereka dalam penggunaan IoT pertanian. Sampel utama terdiri dari 15 orang petani yang menggunakan sensor IoT pada sistem irigasi dan monitoring lahan, serta 5 ahli dari perusahaan teknologi pertanian yang terlibat dalam pengembangan perangkat IoT. Kriteria inklusi sampel meliputi: (1) telah menggunakan perangkat IoT minimal 6 bulan; (2) memiliki lahan minimal 0,5 hektar; dan (3) bersedia memberikan data secara terbuka.

Instrumen Penelitian

Instrumen utama dalam penelitian ini adalah peneliti sendiri sebagai human instrument (Sugiyono, 2019). Selain itu, instrumen pendukung meliputi panduan wawancara semi-terstruktur, lembar observasi penggunaan IoT, serta dokumentasi berupa foto, video, dan data perangkat IoT (misalnya data sensor kelembaban tanah dan data cuaca lokal). Validitas instrumen dijaga melalui expert judgment oleh dua ahli pertanian presisi, sedangkan reliabilitas data dijaga dengan triangulasi sumber dan metode.

Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui tiga cara. Pertama, wawancara mendalam dengan petani dan penyedia teknologi untuk menggali pengalaman, kendala, dan dampak implementasi IoT. Kedua, observasi partisipatif di lahan pertanian modern yang menggunakan sensor IoT untuk melihat langsung cara kerja perangkat dan dampaknya pada efisiensi. Ketiga, dokumentasi berupa data sekunder dari laporan perusahaan agritech, publikasi pemerintah, serta artikel ilmiah terkait IoT dan pertanian presisi. Penelitian ini telah memperoleh persetujuan etik dari responden melalui informed consent tertulis, menjamin kerahasiaan identitas, serta memberikan hak kepada responden untuk mengundurkan diri kapan saja tanpa sanksi.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan. Tahap pertama adalah perencanaan, meliputi identifikasi lokasi penelitian dan penentuan responden. Tahap kedua adalah pengumpulan data, dengan wawancara, observasi, dan dokumentasi. Tahap ketiga adalah reduksi data, yaitu memilah data relevan terkait efisiensi penggunaan IoT. Tahap keempat adalah penyajian data dalam bentuk deskripsi naratif, tabel, dan visualisasi. Tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan untuk menjawab tujuan penelitian.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan model interaktif Miles & Huberman (1994) yang mencakup reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan. Data wawancara ditranskrip dan dikodekan untuk menemukan pola-pola yang relevan. Data observasi dan dokumentasi digunakan untuk triangulasi guna meningkatkan validitas hasil. Software NVivo 12 digunakan untuk membantu proses koding dan kategorisasi data kualitatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Efisiensi Penggunaan Air dengan IoT

Implementasi IoT pada sistem irigasi presisi terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan air secara signifikan. Berdasarkan hasil wawancara dan observasi pada 15 petani yang menggunakan sensor kelembaban tanah, diperoleh data bahwa penggunaan air dapat ditekan rata-rata 30% dibandingkan metode konvensional. Hal ini karena sensor IoT mengatur penyiraman hanya saat tanah benar-benar membutuhkan air.

Tabel 1. Efisiensi Penggunaan Air antara Metode Konvensional dan IoT

Kelompok Petani	Rata-rata Penggunaan Air (liter/ha/musim)	Penghematan (%)
Konvensional	12.000	-
IoT-based	8.400	30%

Tabel 1 menunjukkan perbandingan penggunaan air pada sistem pertanian konvensional dan sistem berbasis IoT. Data yang diperoleh dari wawancara dan observasi lapangan menunjukkan bahwa petani yang menggunakan metode konvensional membutuhkan rata-rata 12.000 liter air per hektar per musim tanam. Sebaliknya, petani yang menggunakan sistem IoT hanya membutuhkan sekitar 8.400 liter per hektar per musim tanam. Artinya, terdapat penghematan sebesar 30% dalam penggunaan air. Efisiensi ini dapat dicapai karena sensor kelembaban tanah yang terintegrasi dengan sistem IoT mampu mendeteksi kondisi aktual kadar air di dalam tanah secara real-time. Dengan demikian, penyiraman hanya dilakukan ketika tanah benar-benar membutuhkan air, bukan berdasarkan perkiraan semata seperti pada metode konvensional. Selain itu, sistem irigasi otomatis berbasis IoT mampu mendistribusikan air secara lebih merata, sehingga mengurangi potensi pemborosan. Penghematan air ini tidak hanya menekan biaya produksi, tetapi juga berkontribusi pada upaya konservasi sumber daya air di tengah ancaman perubahan iklim dan keterbatasan air bersih. Oleh karena itu, penerapan IoT dalam pengelolaan air di sektor pertanian menjadi salah satu solusi penting untuk mewujudkan praktik pertanian presisi yang lebih berkelanjutan dan efisien.

Efisiensi Pemakaian Pupuk melalui Pemantauan IoT

Selain air, penggunaan pupuk juga lebih efisien melalui integrasi sensor IoT. Data sensor tanah memberikan rekomendasi dosis pupuk yang tepat sehingga petani tidak lagi menggunakan pupuk berlebihan.

Tabel 2. Efisiensi Penggunaan Pupuk antara Metode Konvensional dan IoT

Kelompok Petani	Rata-rata Penggunaan Pupuk (kg/ha/musim)	Penghematan (%)
Konvensional	450	-
IoT-based	360	20%

Tabel 2 memperlihatkan hasil penelitian mengenai perbandingan penggunaan pupuk antara sistem pertanian konvensional dan sistem berbasis IoT. Hasilnya menunjukkan bahwa pada metode konvensional, rata-rata penggunaan pupuk mencapai 450 kg per hektar per musim tanam. Sementara itu, penerapan sistem IoT hanya membutuhkan sekitar 360 kg pupuk per hektar per musim tanam. Hal ini berarti terjadi penghematan penggunaan pupuk sebesar 20%, atau sekitar 90 kg per hektar per musim. Efisiensi ini dicapai karena teknologi sensor tanah yang digunakan pada sistem IoT mampu memberikan informasi akurat terkait kadar nutrisi tanah secara real-time. Dengan demikian, petani dapat menentukan dosis pupuk yang lebih tepat sesuai kebutuhan tanaman, bukan berdasarkan kebiasaan atau perkiraan semata. Selain menekan biaya operasional, penggunaan pupuk yang lebih efisien juga berdampak positif pada aspek lingkungan, yaitu menurunkan risiko pencemaran tanah dan air akibat residu pupuk kimia. Lebih jauh lagi, efisiensi penggunaan pupuk ini turut mendukung tercapainya prinsip pertanian berkelanjutan yang ramah lingkungan. Penelitian ini memperkuat bahwa implementasi IoT mampu memberikan dampak nyata dalam meningkatkan produktivitas pertanian sekaligus menjaga kualitas ekosistem pertanian.

Monitoring Lingkungan dan Produktivitas

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan teknologi Internet of Things (IoT) pada sektor pertanian tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya seperti air dan pupuk, tetapi juga memberikan dampak positif terhadap kemampuan monitoring lingkungan secara real-time. Sistem IoT memungkinkan petani untuk memantau parameter penting seperti suhu udara, kelembaban tanah, intensitas cahaya, dan curah hujan secara terus-menerus. Data yang dikumpulkan dari sensor kemudian diolah dan ditampilkan dalam platform digital yang mudah diakses melalui perangkat seluler. Dengan informasi tersebut, petani dapat mengambil keputusan yang lebih cepat dan tepat terkait waktu tanam, penyiraman, serta penanganan hama dan penyakit.

Peningkatan monitoring lingkungan ini berdampak langsung pada produktivitas lahan. Dari hasil observasi, lahan pertanian yang menggunakan IoT mengalami peningkatan produktivitas padi rata-rata sebesar 15% dibandingkan dengan lahan yang masih mengandalkan metode konvensional. Peningkatan tersebut terjadi karena kondisi pertumbuhan tanaman lebih terkontrol dan kebutuhan nutrisi dapat dipenuhi dengan tepat. Selain itu, adanya sistem peringatan dini dari sensor IoT juga membantu petani dalam mengantisipasi risiko gagal panen akibat perubahan iklim ekstrem, misalnya saat terjadi kekeringan mendadak atau curah hujan berlebih.

Dampak positif lainnya adalah meningkatnya rasa percaya diri petani dalam mengelola lahan. Dengan akses terhadap data yang akurat, petani tidak lagi bergantung sepenuhnya pada intuisi atau pengalaman subjektif, tetapi dapat mengambil keputusan berbasis sains dan teknologi. Hal ini juga membuka peluang untuk membangun sistem pertanian presisi yang lebih adaptif dan berkelanjutan. Dengan demikian, penerapan IoT dalam monitoring lingkungan tidak hanya meningkatkan produktivitas hasil panen, tetapi juga memperkuat daya tahan sektor pertanian terhadap tantangan global, khususnya perubahan iklim dan keterbatasan sumber daya alam.

Integrasi IoT dan Dampak Sosial-Ekonomi

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa integrasi teknologi Internet of Things (IoT) dalam sistem pertanian tidak hanya menghasilkan efisiensi teknis, tetapi juga memberikan dampak sosial-ekonomi yang signifikan. Dari sisi ekonomi, mayoritas petani yang diwawancara menyatakan bahwa penerapan IoT membantu menurunkan biaya operasional melalui efisiensi penggunaan air dan pupuk, sekaligus meningkatkan hasil panen rata-rata 10–15%. Kondisi ini berimplikasi pada peningkatan keuntungan bersih yang diterima petani setiap musim tanam. Penurunan biaya produksi juga membuat produk pertanian lebih kompetitif di pasar, sehingga memperluas peluang bagi petani untuk masuk ke rantai pasok modern.

Dari sisi sosial, penggunaan IoT terbukti menarik minat generasi muda untuk terjun kembali ke sektor pertanian. Selama ini pertanian sering dipandang kurang menarik karena identik dengan pekerjaan fisik yang berat dan hasil yang tidak pasti. Namun, dengan adanya integrasi IoT, pertanian dipersepsikan sebagai sektor modern yang berbasis teknologi digital, sehingga mampu meningkatkan citra positif di kalangan milenial dan Gen Z. Hal ini berpotensi mendorong regenerasi tenaga kerja pertanian yang semakin menurun akibat urbanisasi.

Lebih jauh lagi, implementasi IoT juga mendorong terbentuknya kolaborasi antara petani, perusahaan teknologi, dan pemerintah daerah. Kolaborasi ini menciptakan ekosistem pertanian cerdas yang mampu mengintegrasikan produksi, distribusi, dan pemasaran. Dengan adanya data yang lebih transparan, rantai pasok menjadi lebih efisien dan risiko kehilangan hasil panen dapat diminimalkan. Dari perspektif pembangunan berkelanjutan, IoT juga berkontribusi pada pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya terkait ketahanan pangan (SDG 2) dan inovasi industri (SDG 9). Dengan demikian, integrasi IoT bukan hanya solusi teknis,

melainkan transformasi sosial-ekonomi yang mampu memperkuat daya saing pertanian Indonesia dalam menghadapi tantangan global.

PEMBAHASAN

Efisiensi Penggunaan Air melalui Implementasi IoT

Air merupakan salah satu faktor produksi yang paling krusial dalam pertanian modern. Namun, ketersediaan air semakin terbatas akibat perubahan iklim, pertumbuhan penduduk, dan persaingan penggunaan dengan sektor industri maupun domestik. Pertanian sendiri menyumbang sekitar 70% dari total penggunaan air tawar global, sehingga efisiensi pemanfaatan air menjadi agenda penting dalam menjaga ketahanan pangan dunia (FAO, 2020). Dalam konteks ini, penerapan teknologi Internet of Things (IoT) telah diidentifikasi sebagai solusi strategis untuk meningkatkan efisiensi irigasi. IoT memungkinkan pemantauan dan pengendalian sistem irigasi secara real-time melalui sensor kelembaban tanah, perangkat pemantau iklim, serta sistem distribusi air otomatis. Dengan memanfaatkan data akurat yang dikumpulkan sensor, petani dapat mengatur irigasi secara presisi, sehingga hanya memberikan air sesuai kebutuhan aktual tanaman (Ayaz et al., 2019).

Sejumlah penelitian terdahulu mendukung temuan ini. Kim et al. (2018) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa sistem irigasi berbasis sensor nirkabel mampu menurunkan konsumsi air hingga 25% tanpa mengurangi produktivitas tanaman. Demikian pula, García et al. (2020) menemukan bahwa penerapan IoT dalam irigasi presisi di kebun anggur Spanyol berhasil mengurangi penggunaan air sebesar 30%, sekaligus meningkatkan kualitas hasil panen. Penelitian serupa oleh Evett dan Colaizzi (2019) menegaskan bahwa otomatisasi irigasi berbasis sensor memberikan efisiensi lebih tinggi dibandingkan metode manual atau semi-manual, terutama di daerah dengan kondisi iklim kering. Dengan demikian, IoT terbukti dapat menjadi katalis untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya air dalam sistem pertanian.

Selain efisiensi teknis, penerapan IoT juga berdampak pada aspek ekonomi dan lingkungan. Dari sisi ekonomi, pengurangan konsumsi air secara langsung menurunkan biaya operasional petani, khususnya pada wilayah yang masih menggunakan sistem pompa air berbasis listrik atau bahan bakar. Studi Aqeel-ur-Rehman et al. (2023) menunjukkan bahwa efisiensi air melalui teknologi sensor mampu menekan biaya energi irigasi hingga 22% dengan sistem otomatis berbasis solar. Dari sisi lingkungan, IoT berkontribusi dalam konservasi sumber daya air, mengurangi risiko over-irrigation, serta mencegah degradasi tanah akibat genangan air berlebih (Zhang et al., 2014). Efisiensi ini juga selaras dengan tujuan pembangunan berkelanjutan (SDG 6: Clean Water and Sanitation), yang menekankan pengelolaan sumber daya air secara berkelanjutan.

Lebih jauh lagi, IoT dalam manajemen air pertanian juga membuka peluang integrasi dengan teknologi lain seperti big data dan kecerdasan buatan. Dengan menggabungkan data kelembaban tanah, prakiraan cuaca, dan pola evapotranspirasi tanaman, sistem irigasi dapat diarahkan menuju model prediktif yang lebih adaptif. Wolfert et al. (2017) menegaskan bahwa integrasi IoT dan big data dalam pertanian presisi akan menghasilkan sistem yang lebih responsif terhadap dinamika iklim dan kondisi lokal. Hal ini menjadi sangat relevan di era perubahan iklim, di mana pola curah hujan semakin sulit diprediksi. Oleh karena itu, IoT tidak hanya berperan sebagai alat penghematan air, tetapi juga sebagai instrumen mitigasi risiko dalam produksi pangan.

Secara keseluruhan, efisiensi penggunaan air melalui implementasi IoT merupakan langkah strategis untuk menjawab tantangan pertanian modern. Temuan penelitian ini memperkuat argumen bahwa IoT mampu memberikan manfaat multidimensi: teknis, ekonomi, dan ekologis. Dengan semakin berkembangnya teknologi sensor yang lebih murah dan mudah diakses, peluang

adopsi IoT di negara berkembang semakin besar. Namun, tantangan seperti keterbatasan infrastruktur digital, literasi teknologi petani, serta biaya investasi awal masih perlu diatasi melalui kebijakan pemerintah dan kolaborasi dengan sektor swasta. Apabila hambatan ini dapat diatasi, maka IoT berpotensi menjadi fondasi utama dalam pembangunan sistem pertanian berkelanjutan yang adaptif terhadap keterbatasan sumber daya air dan tuntutan pangan global di masa depan.

Efisiensi Pemakaian Pupuk dengan Sistem IoT

Pupuk merupakan salah satu input penting dalam sistem pertanian modern yang berperan dalam menjaga kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman. Namun, penggunaan pupuk yang berlebihan seringkali menjadi masalah serius, baik dari segi ekonomi maupun lingkungan. Secara global, petani cenderung menggunakan pupuk melebihi dosis rekomendasi dengan harapan meningkatkan hasil panen, padahal praktik tersebut justru menurunkan efisiensi biaya dan menimbulkan degradasi lingkungan, termasuk pencemaran tanah dan air (Tilman et al., 2011). Dalam konteks ini, Internet of Things (IoT) hadir sebagai solusi inovatif yang memungkinkan pengelolaan pemupukan secara presisi berbasis data. Teknologi IoT melalui sensor nutrisi tanah dan perangkat pemantauan real-time mampu mengidentifikasi kebutuhan aktual tanaman terhadap unsur hara, sehingga petani dapat memberikan dosis pupuk yang tepat, baik jenis maupun jumlahnya (Jha et al., 2019).

Hasil penelitian ini menemukan bahwa implementasi IoT mampu menurunkan penggunaan pupuk rata-rata sebesar 20% per hektar per musim tanam. Temuan ini sejalan dengan penelitian Liakos et al. (2018) yang mengungkapkan bahwa teknologi pertanian presisi dapat mengurangi pemborosan input pupuk sekaligus meningkatkan hasil panen. Penelitian serupa oleh Gebbers dan Adamchuk (2010) juga menegaskan bahwa pertanian berbasis sensor berkontribusi besar terhadap efisiensi pemupukan melalui pemantauan nutrisi tanah yang akurat. Lebih lanjut, studi Munir et al. (2022) menunjukkan bahwa sistem pemupukan berbasis IoT dapat meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen hingga 28% melalui variable rate application yang terkontrol otomatis.

Dari aspek ekonomi, efisiensi penggunaan pupuk melalui IoT berdampak langsung pada penurunan biaya produksi. Pupuk merupakan salah satu komponen biaya terbesar dalam pertanian intensif, sehingga penghematan 20% dapat meningkatkan margin keuntungan petani secara signifikan. Penelitian oleh Patil dan Kale (2016) membuktikan bahwa petani yang menggunakan sistem monitoring IoT mengalami penurunan biaya input rata-rata 15–25% dibandingkan dengan metode konvensional. Di sisi lain, IoT juga membantu meningkatkan kualitas hasil panen karena nutrisi yang diberikan sesuai dengan kebutuhan fisiologis tanaman pada fase pertumbuhan tertentu (Kamilaris et al., 2016).

Dari sisi lingkungan, pengurangan dosis pupuk berlebih berdampak positif dalam menjaga kualitas ekosistem pertanian. Residu pupuk kimia yang biasanya mencemari air tanah dapat diminimalisir melalui pemupukan berbasis data. Hal ini selaras dengan penelitian Zhang et al. (2014), yang menunjukkan bahwa penggunaan IoT dalam manajemen lahan pertanian dapat mengurangi dampak negatif pupuk berlebih terhadap kesehatan tanah dan lingkungan sekitar. Efisiensi ini juga berkontribusi pada tercapainya tujuan pembangunan berkelanjutan (SDG 12: Responsible Consumption and Production) yang menekankan efisiensi sumber daya serta pengurangan pencemaran lingkungan.

Lebih jauh lagi, penerapan IoT dalam pemupukan membuka peluang integrasi dengan kecerdasan buatan (AI) untuk membangun sistem prediksi kebutuhan pupuk berbasis pola pertumbuhan tanaman dan kondisi cuaca. Wolfert et al. (2017) menegaskan bahwa integrasi IoT dengan big data dan AI akan memperkuat konsep pertanian presisi menuju sistem yang lebih

adaptif, prediktif, dan ramah lingkungan. Dengan demikian, efisiensi pemakaian pupuk melalui IoT tidak hanya memberikan manfaat jangka pendek berupa penghematan biaya dan peningkatan produktivitas, tetapi juga manfaat jangka panjang berupa keberlanjutan ekosistem pertanian dan penguatan ketahanan pangan global.

Monitoring Lingkungan dan Peningkatan Produktivitas

Monitoring lingkungan merupakan salah satu aspek fundamental dalam sistem pertanian modern, terutama dalam menghadapi tantangan perubahan iklim, degradasi lahan, dan keterbatasan sumber daya alam. Faktor-faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban tanah, intensitas cahaya, dan curah hujan sangat menentukan produktivitas pertanian. Namun, metode konvensional yang masih mengandalkan pengamatan manual terbukti tidak efisien, seringkali menghasilkan data yang tidak akurat, serta tidak mampu memberikan informasi real-time yang dibutuhkan untuk pengambilan keputusan cepat. Kehadiran teknologi Internet of Things (IoT) dalam pertanian menawarkan solusi yang lebih akurat dan berkelanjutan melalui penggunaan sensor pintar yang dapat merekam data lingkungan secara terus-menerus, menganalisisnya, dan menyajikan rekomendasi tindakan kepada petani (Wolfert et al., 2017).

Hasil penelitian ini menemukan bahwa implementasi IoT mampu meningkatkan produktivitas rata-rata sebesar 15% pada lahan yang dimonitor menggunakan sensor lingkungan dibandingkan dengan lahan konvensional. Peningkatan ini terjadi karena sistem IoT memungkinkan manajemen lahan yang lebih presisi, misalnya dalam menentukan waktu tanam, dosis penyiraman, serta kebutuhan pupuk berdasarkan kondisi nyata lahan. Studi Liakos et al. (2018) mendukung temuan ini dengan menunjukkan bahwa penggunaan IoT dan machine learning dalam pertanian presisi dapat meningkatkan hasil panen sekaligus mengurangi risiko gagal panen. Selain itu, penelitian Zhang et al. (2014) juga menegaskan bahwa monitoring berbasis IoT mampu memperkuat adaptasi terhadap variabilitas iklim melalui pengelolaan berbasis data.

IoT juga memberikan kontribusi besar terhadap sistem peringatan dini dalam pertanian. Sensor yang dipasang di lahan dapat mendeteksi perubahan iklim ekstrem, seperti kekeringan atau hujan berlebih, sehingga petani dapat mengambil tindakan preventif sebelum kondisi tersebut merusak tanaman. Penelitian Wheeler dan von Braun (2013) menunjukkan bahwa perubahan iklim merupakan salah satu faktor terbesar penyebab ketidakpastian hasil pertanian global. Dengan adanya data real-time, petani memiliki kapasitas adaptasi yang lebih baik. Hal ini diperkuat oleh studi Jayaraman et al. (2016), yang menyebutkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT membantu meningkatkan resiliensi pertanian dalam menghadapi guncangan iklim.

Dampak monitoring IoT tidak hanya terbatas pada produktivitas, tetapi juga pada peningkatan efisiensi rantai pasok. Data lingkungan yang dikumpulkan dapat digunakan untuk memprediksi waktu panen dengan lebih tepat, sehingga distribusi hasil pertanian dapat direncanakan lebih efisien. Hal ini sejalan dengan penelitian Kamilaris et al. (2016) yang menyebutkan bahwa big data dalam pertanian presisi berperan penting dalam perencanaan logistik dan pemasaran hasil panen. Selain itu, monitoring berbasis IoT dapat membantu meningkatkan kualitas hasil pertanian, misalnya menjaga kadar kelembaban optimal yang berdampak pada ukuran, rasa, dan kandungan nutrisi produk pertanian.

Secara keseluruhan, monitoring lingkungan berbasis IoT tidak hanya meningkatkan produktivitas lahan, tetapi juga memperkuat daya tahan sektor pertanian terhadap tantangan global. Dengan informasi yang akurat dan real-time, petani dapat beralih dari pendekatan tradisional berbasis intuisi ke pendekatan berbasis sains dan teknologi. Hal ini mendukung tercapainya sistem pertanian berkelanjutan yang lebih efisien, adaptif, dan ramah lingkungan. Oleh karena itu, IoT

harus dipandang bukan sekadar teknologi tambahan, melainkan fondasi utama dalam transformasi pertanian modern menuju era digital yang lebih resilien dan produktif.

Integrasi IoT dan Dampak Sosial-Ekonomi

Integrasi teknologi Internet of Things (IoT) dalam sektor pertanian tidak hanya menghadirkan manfaat teknis berupa efisiensi sumber daya, tetapi juga memunculkan dampak sosial-ekonomi yang signifikan. Dari perspektif ekonomi, penerapan IoT terbukti menurunkan biaya operasional melalui penghematan penggunaan air, pupuk, dan energi. Penelitian Boursianis et al. (2022) menunjukkan bahwa petani yang mengadopsi sistem pertanian berbasis IoT mengalami peningkatan keuntungan bersih karena input produksi dapat ditekan tanpa menurunkan hasil panen. Hal ini selaras dengan studi Rose et al. (2015), yang menegaskan bahwa IoT dapat menciptakan efisiensi pada rantai nilai pertanian dengan menghubungkan produsen, distributor, dan konsumen dalam ekosistem digital yang lebih transparan. Penurunan biaya produksi ini meningkatkan daya saing produk pertanian di pasar domestik maupun global.

Dari sisi sosial, penerapan IoT dalam pertanian turut memengaruhi dinamika tenaga kerja. Sektor pertanian yang selama ini dipersepsikan sebagai bidang tradisional mulai berubah citranya menjadi lebih modern dan berbasis teknologi. Hal ini menarik minat generasi muda untuk kembali menekuni bidang pertanian, sehingga dapat mengatasi masalah kurangnya tenaga kerja akibat urbanisasi (Lioutas & Charatsari, 2020). Penelitian Jayaraman et al. (2016) juga menegaskan bahwa platform IoT mampu meningkatkan partisipasi petani muda dengan menyediakan data yang dapat diakses melalui smartphone, sehingga teknologi menjadi lebih inklusif. Dengan demikian, integrasi IoT berpotensi menjadi katalis regenerasi tenaga kerja pertanian.

Lebih jauh lagi, IoT juga berkontribusi terhadap pembangunan pedesaan melalui penciptaan ekosistem kolaboratif antara petani, perusahaan teknologi, dan pemerintah. Data yang dihasilkan dari sensor IoT dapat dimanfaatkan tidak hanya untuk produksi, tetapi juga untuk perencanaan kebijakan pertanian, mitigasi risiko bencana, serta peningkatan ketahanan pangan nasional (Wolfert et al., 2017). Dengan sistem data terbuka, pemerintah daerah dapat menyusun kebijakan subsidi atau distribusi input pertanian yang lebih tepat sasaran. Hal ini memperkuat peran IoT sebagai instrumen pemberdayaan masyarakat pedesaan dan mempercepat digitalisasi sektor pertanian.

Dampak sosial-ekonomi lain yang patut diperhatikan adalah terciptanya peluang usaha baru. IoT mendorong tumbuhnya industri jasa berbasis teknologi, seperti layanan monitoring lahan, penyewaan perangkat sensor, hingga analisis data pertanian berbasis cloud. Menurut Liakos et al. (2018), pertanian presisi berbasis IoT membuka pasar baru di bidang agritech yang berpotensi menciptakan lapangan kerja di luar sektor budidaya konvensional. Hal ini menandakan bahwa IoT tidak hanya memperkuat sektor pertanian, tetapi juga mendorong diversifikasi ekonomi pedesaan.

Dengan demikian, integrasi IoT membawa dampak multidimensi: meningkatkan keuntungan ekonomi, memperkuat ketahanan pangan, memperbaiki citra sosial pertanian, serta mendorong pembangunan pedesaan yang lebih inklusif. Namun, tantangan tetap ada, seperti keterbatasan literasi digital, infrastruktur jaringan, dan biaya investasi awal. Untuk itu, diperlukan dukungan kebijakan pemerintah dan kolaborasi lintas sektor agar implementasi IoT benar-benar inklusif. Jika tantangan tersebut dapat diatasi, maka IoT akan menjadi fondasi penting dalam transformasi sosial-ekonomi pertanian menuju model yang lebih adaptif, berkelanjutan, dan berdaya saing global.

Implikasi Penelitian

Hasil penelitian mengenai implementasi Internet of Things (IoT) dalam meningkatkan efisiensi sistem pertanian modern memberikan sejumlah implikasi penting, baik pada level akademik, praktis, maupun kebijakan. Dari sisi akademik, penelitian ini memperkuat literatur mengenai pertanian presisi dengan menambahkan bukti empiris terkait efektivitas IoT dalam efisiensi penggunaan air, pupuk, serta monitoring lingkungan. Hal ini menunjukkan bahwa IoT tidak hanya berfungsi sebagai teknologi pendukung, tetapi juga sebagai instrumen utama dalam transformasi pertanian modern. Dari sisi praktis, temuan penelitian ini memberikan panduan bagi petani untuk mengadopsi teknologi IoT guna menekan biaya produksi sekaligus meningkatkan produktivitas. Penerapan sensor kelembaban tanah, sistem monitoring nutrisi, serta perangkat pemantau iklim terbukti mampu memberikan rekomendasi berbasis data yang akurat, sehingga membantu pengambilan keputusan yang lebih tepat. Selain itu, adanya dampak sosial berupa meningkatnya minat generasi muda terhadap pertanian juga menunjukkan potensi regenerasi tenaga kerja di sektor ini. Dari sisi kebijakan, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar bagi pemerintah dalam menyusun strategi digitalisasi pertanian. Dukungan berupa subsidi perangkat IoT, pelatihan literasi digital, serta pengembangan infrastruktur jaringan di pedesaan sangat dibutuhkan untuk mempercepat adopsi teknologi ini. Dengan demikian, implementasi IoT tidak hanya berimplikasi pada peningkatan efisiensi pertanian, tetapi juga pada penguatan ketahanan pangan nasional dan pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa implementasi teknologi Internet of Things (IoT) dalam sistem pertanian modern mampu memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutan. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa penggunaan sensor IoT pada irigasi presisi dapat menghemat air hingga 30%, sementara pemantauan nutrisi tanah mampu menurunkan penggunaan pupuk sebesar 20% per hektar per musim tanam. Efisiensi ini berdampak langsung pada penurunan biaya produksi sekaligus mengurangi risiko pencemaran lingkungan akibat penggunaan sumber daya berlebih. Selain itu, monitoring lingkungan berbasis IoT terbukti meningkatkan produktivitas lahan rata-rata 15% melalui pengelolaan data real-time yang lebih akurat dan responsif terhadap perubahan iklim. Integrasi IoT juga memberikan dampak sosial-ekonomi, seperti peningkatan keuntungan bersih petani, menarik minat generasi muda untuk kembali ke sektor pertanian, serta menciptakan peluang usaha baru di bidang agritech. Dengan demikian, IoT bukan sekadar teknologi tambahan, melainkan fondasi utama dalam transformasi pertanian menuju model yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa IoT memiliki peran strategis dalam memperkuat ketahanan pangan nasional dan mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan. Namun, adopsi IoT masih memerlukan dukungan kebijakan, literasi digital petani, dan infrastruktur jaringan agar dapat diterapkan secara inklusif di berbagai wilayah, khususnya pedesaan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi model bisnis berkelanjutan bagi petani kecil dalam adopsi IoT, menganalisis dampak jangka panjang terhadap kualitas tanah dan ekosistem, serta mengembangkan sistem IoT yang lebih terjangkau dan mudah dioperasikan untuk konteks pertanian tropis Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M. H., Hoque, M. R., Hassan, A. A., & Khair, A. (2017). Pengaruh irigasi defisit terhadap hasil panen, produktivitas air, dan keuntungan ekonomi gandum. *Agricultural Water Management*, 92(3), 151–161. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.01.005>

- Ashton, K. (2009). "Internet of Things". *RFID Journal*, 22(7), 97–114.
- Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E. H. (2019). Pertanian cerdas berbasis Internet of Things (IoT): Menuju ladang yang berbicara. *IEEE Access*, 7, 129551–129583. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609>
- Boursianis, A. D., Papadopoulou, M. S., Diamantoulakis, P., Liopa-Tsakalidi, A., Barouchas, P. E., Salahas, G., ... & Goudos, S. K. (2022). Internet of Things (IoT) dan kendaraan udara nirawak (UAV) pertanian dalam pertanian pintar: Tinjauan komprehensif. *Internet of Things*, 18, 100187. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100187>
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Investigasi kualitatif dan desain penelitian: Memilih di antara lima pendekatan* (edisi ke-4). SAGE Publications.
- Evett, S. R., & Colaizzi, P. D. (2019). Irigasi presisi dengan sensor air tanah: Sebuah tinjauan. *Agricultural Water Management*, 226, 105832. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105832>
- F.A.O. (2020). *The State of Food and Agriculture 2020*. Organisasi Pangan dan Pertanian Perserikatan Bangsa-Bangsa.
- García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2020). Sistem irigasi pintar berbasis IoT: Tinjauan umum dan pengalaman. *Sensors*, 20(4), 1042. <https://doi.org/10.3390/s20041042>
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Pertanian presisi dan ketahanan pangan. *Sains*, 327(5967), 828–831. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- Godfray, HCJ, Beddington, JR, Crute, IR, Haddad, L., Lawrence, D., Muir, JF, ... & Toulmin, C. (2010). Ketahanan pangan: Tantangan dalam memberi makan 9 miliar orang. *Sains*, 327(5967), 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- Jayaraman, PP, Yavari, A., Georgakopoulos, D., Morshed, A., & Zaslavsky, A. (2016). Platform Internet of Things untuk pertanian cerdas: Pengalaman dan pembelajaran. *Sensors*, 16(11), 1884. <https://doi.org/10.3390/s16111884>
- Jayaram, S., & Vidhya, S. (2020). Pertanian Cerdas: Solusi Potensial untuk Pertanian Berkelanjutan. *Journal of Critical Reviews*, 7(19), 5425–5431.
- Jha, K., Doshi, A., Patel, P., & Shah, M. (2019). Tinjauan Komprehensif tentang Otomasi di Bidang Pertanian Menggunakan Kecerdasan Buatan. *Kecerdasan Buatan dalam Pertanian*, 2, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.004>
- Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. Tinjauan tentang Praktik Analisis Data Besar dalam Pertanian. *Komputer dan Elektronika dalam Pertanian*, 143, 23–37. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.12.016>
- Kim, Y., Evans, R. G., & Iversen, W. M. (2018). Penginderaan jauh dan kendali sistem irigasi menggunakan jaringan sensor nirkabel terdistribusi. *Transaksi IEEE tentang Instrumentasi dan Pengukuran*, 57(7), 1379–1387. <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.917198>
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Pembelajaran mesin dalam pertanian: Sebuah tinjauan. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>

- Lioutas, E. D., & Charatsari, C. (2020). Pertanian cerdas dan rantai pasok pangan pendek: Apakah keduanya kompatibel? *Technology in Society*, 60, 101223. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2019.101223>
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2014). Analisis data kualitatif: Buku sumber metode (edisi ke-3). SAGE Publications.
- Patil, V. C., & Kale, S. R. (2016). Pertanian cerdas berbasis IoT: Peluang & tantangan. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 7(6), 234–236.
- Ray, D. K., Mueller, N. D., West, P. C., & Foley, J. A. (2013). Tren hasil panen tidak cukup untuk menggandakan produksi tanaman pangan global pada tahun 2050. *PLOS ONE*, 8(6), e66428. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066428>
- Rose, K., Eldridge, S., & Chapin, L. (2015). Internet of Things: Sebuah Tinjauan. *Masyarakat Internet*.
- Sugiyono. (2019). Metode penelitian kualitatif, kuantitatif, dan R&D. Alfabet.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Permintaan pangan global dan intensifikasi pertanian berkelanjutan. *Prosiding National Academy of Sciences*, 108(50), 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Wheeler, T., & von Braun, J. (2013). Climate change impacts on global food security. *Science*, 341(6145), 508–513. <https://doi.org/10.1126/science.1239402>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big data in smart farming—A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Zhang, Y., Wang, L., & Duan, Y. (2014). Agricultural information system and Internet of Things in precision agriculture. *Applied Mechanics and Materials*, 651–653, 1287–1292. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.651-653.1287>