

Integrasi *Smart Irrigation* dan Sensor Tanah dalam Pertanian Presisi untuk Pengelolaan Air di Lahan Kering: Tinjauan Sistematis

Rismawati Sudarsih¹, Riswanda Sukma Hanifa^{1*}, Sri Hidayati Junaidi¹, Misbahuddin², Muhammad Husni Idris³

¹Magister Pertanian Lahan Kering, ²Program Studi Teknik Elektro, ³Program Studi Kehutanan, Universitas Mataram, Jl. Majapahit No. 62, Mataram, Indonesia 83125.

Email Korespondensi: riswanda.sukmahanifa@gmail.com

Abstrak

Keterbatasan sumber daya air dan meningkatnya variabilitas iklim menjadi tantangan utama dalam pengelolaan pertanian lahan kering. Penerapan *smart irrigation* dan sensor tanah berkembang sebagai bagian dari pertanian presisi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air melalui pengelolaan irigasi berbasis data real-time. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas *smart irrigation* dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air, mengevaluasi peran sensor tanah dalam mendukung pengambilan keputusan irigasi, serta mengidentifikasi berbagai tantangan implementasi teknologi pada pertanian lahan kering. Penelitian menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) berdasarkan prinsip PRISMA dengan menganalisis 32 artikel peer-reviewed yang diperoleh dari database Google Scholar, ScienceDirect, Springer, MDPI, dan ProQuest pada rentang tahun 2015-2026. Hasil kajian menunjukkan bahwa penerapan *smart irrigation* secara umum mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air sebesar 20-50% dibandingkan sistem irigasi konvensional. Sensor tanah berperan penting dalam menyediakan data kelembapan tanah secara real-time sehingga mendukung sistem pengambilan keputusan irigasi yang lebih akurat dan adaptif. Integrasi sensor tanah, Internet of Things (IoT), dan sistem kontrol otomatis juga menunjukkan potensi dalam meningkatkan efisiensi distribusi air dan menjaga stabilitas produktivitas tanaman pada kondisi lahan kering. Meskipun demikian, implementasi teknologi masih menghadapi berbagai kendala, terutama biaya investasi, keterbatasan infrastruktur digital, kebutuhan kalibrasi sensor, dan rendahnya literasi teknologi pada tingkat petani. Penelitian ini menunjukkan bahwa keberhasilan penerapan *smart irrigation* tidak hanya dipengaruhi oleh kualitas teknologi, tetapi juga oleh kesiapan infrastruktur, kapasitas pengguna, dan dukungan kebijakan. Oleh karena itu, pengembangan sistem irigasi cerdas yang lebih sederhana, adaptif, dan sesuai kondisi lokal menjadi penting dalam mendukung pengelolaan air pertanian yang lebih efisien dan berkelanjutan pada lahan kering.

Kata kunci: Smart Irrigation; Sensor Tanah; Pertanian Presisi; Efisiensi Air; Lahan Kering.

Integration of Smart Irrigation and Soil Sensors in Precision Agriculture for Water Management in Drylands: A Systematic Review

Abstract

Limited water resources and increasing climate variability have become major challenges in dryland agricultural management. The implementation of smart irrigation and soil sensors has developed as part of precision agriculture to improve water use efficiency through real-time data-based irrigation management. This study aimed to analyze the effectiveness of smart irrigation in improving water use efficiency, evaluate the role of soil sensors in supporting irrigation decision-making, and identify various challenges in technology implementation in dryland agriculture. The study employed a Systematic Literature Review (SLR) approach based on PRISMA principles by analyzing 32 peer-reviewed articles obtained from Google Scholar, ScienceDirect, Springer, MDPI, and ProQuest databases published between 2015 and 2026. The results indicated that smart irrigation implementation generally improved water use efficiency by 20–50% compared to conventional irrigation systems. Soil sensors played an important role in providing real-time soil moisture data, thereby supporting more accurate and adaptive irrigation decision-making systems. The integration of soil sensors, the Internet of Things (IoT), and automated control systems also demonstrated significant potential in improving water distribution efficiency and maintaining crop productivity stability under dryland conditions. However, technology implementation still faces several constraints, particularly high investment costs, limited digital infrastructure, sensor calibration requirements, and low technological literacy among farmers. This study demonstrates that the successful implementation of smart irrigation is influenced not only by technological quality but also by infrastructure readiness, user capacity, and policy support. Therefore, the development of simpler, adaptive, and locally appropriate smart irrigation systems is essential to support more efficient and sustainable agricultural water management in dryland farming systems.

Keywords: Smart Irrigation, Soil Sensors, Precision Agriculture, Water Use Efficiency, Dryland Agriculture.

How to Cite: Sudarsih, R., Hanifa, R. S., Junaidi, S. H., Misbahuddin, M., & Idris, M. H. (2026). Integrasi Smart Irrigation dan Sensor Tanah dalam Pertanian Presisi untuk Pengelolaan Air di Lahan Kering: Tinjauan Sistematis. *Empiricism Journal*, 7(2), 1858-1870. <https://doi.org/10.36312/ej.v7i2.4876>



PENDAHULUAN

Sektor pertanian masih menjadi pengguna air tawar terbesar di dunia dengan proporsi penggunaan mencapai lebih dari 70% dari total konsumsi air global (FAO, 2021). Tingginya kebutuhan air tersebut menyebabkan sektor pertanian menjadi sangat rentan terhadap perubahan iklim, terutama pada wilayah lahan kering yang memiliki ketersediaan air terbatas dan pola curah hujan yang semakin tidak menentu. Pada kondisi demikian, efisiensi pengelolaan air tidak lagi hanya berkaitan dengan peningkatan produktivitas, tetapi juga menjadi bagian penting dari upaya menjaga keberlanjutan sistem pertanian. Kondisi tersebut menjadi semakin kompleks pada wilayah lahan kering yang memiliki karakteristik keterbatasan air, curah hujan rendah dan tidak menentu, serta kapasitas retensi air tanah yang relatif rendah. Dalam konteks ini, efisiensi penggunaan air menjadi faktor penting untuk menjaga produktivitas pertanian sekaligus mendukung keberlanjutan sumber daya lingkungan.

Lahan kering memiliki peranan strategis dalam mendukung produksi pangan, terutama di negara berkembang yang sebagian besar wilayah pertaniannya masih bergantung pada curah hujan. Di Indonesia, lahan kering tersebar luas pada berbagai wilayah dengan kondisi agroekosistem yang beragam dan menjadi basis pengembangan berbagai komoditas pangan maupun hortikultura. Namun, produktivitas pertanian pada lahan kering umumnya masih menghadapi berbagai kendala, terutama keterbatasan ketersediaan air dan tingginya risiko kekeringan akibat variabilitas iklim. Ketidakpastian pola curah hujan menyebabkan pengelolaan air menjadi semakin sulit, terutama pada musim kemarau yang berkepanjangan.

Di Indonesia, lahan kering diperkirakan mencapai lebih dari 144 juta hektare dengan sebagian wilayah dimanfaatkan untuk kegiatan pertanian tanaman pangan, hortikultura, dan perkebunan (Kementerian Pertanian, 2023). Namun, produktivitas pertanian pada lahan tersebut masih menghadapi berbagai kendala, terutama keterbatasan air, rendahnya efisiensi irigasi, serta tingginya risiko kekeringan pada musim kemarau. Kondisi ini menyebabkan pengembangan teknologi pengelolaan air yang lebih adaptif menjadi semakin penting, terutama pada wilayah yang bergantung pada curah hujan.

Pengelolaan irigasi secara konvensional yang masih banyak diterapkan umumnya dilakukan berdasarkan jadwal tetap tanpa mempertimbangkan kondisi aktual tanah dan kebutuhan tanaman secara spesifik. Pendekatan tersebut sering menyebabkan pemberian air yang tidak efisien, baik dalam bentuk kelebihan maupun kekurangan air. Pada beberapa kasus, penggunaan air yang berlebihan dapat meningkatkan kehilangan air melalui evaporasi, limpasan permukaan, dan infiltrasi di luar zona perakaran tanaman. Sebaliknya, kekurangan air pada fase pertumbuhan tertentu dapat menyebabkan stres fisiologis tanaman yang berdampak terhadap penurunan produktivitas. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengelolaan air berbasis pendekatan konvensional memiliki keterbatasan dalam menjawab tantangan pertanian modern yang menuntut efisiensi dan ketepatan penggunaan input.

Perkembangan teknologi digital mendorong munculnya pendekatan pertanian presisi (*precision agriculture*) sebagai solusi dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan sumber daya pertanian. Pertanian presisi memanfaatkan teknologi sensor, sistem informasi, Internet of Things (IoT), dan otomatisasi untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data secara lebih akurat dan spesifik lokasi (Kour & Arora, 2020). Salah satu implementasi penting dalam pertanian presisi adalah penerapan *smart irrigation* yang memungkinkan pengelolaan air dilakukan secara otomatis berdasarkan kondisi aktual lingkungan dan kebutuhan tanaman. Teknologi ini berkembang pesat seiring meningkatnya kebutuhan efisiensi penggunaan air pada sektor pertanian.

Smart irrigation bekerja dengan mengintegrasikan berbagai perangkat seperti sensor kelembapan tanah, sistem monitoring berbasis IoT, aktuator irigasi otomatis, dan platform pengolahan data. Sensor tanah memiliki peranan penting dalam menyediakan informasi kondisi kelembapan tanah secara real-time sehingga keputusan pemberian air dapat dilakukan secara lebih presisi. Integrasi sensor tanah dengan sistem irigasi otomatis memungkinkan distribusi air dilakukan sesuai kebutuhan tanaman pada waktu yang tepat dan

dalam jumlah yang lebih efisien. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa penerapan smart irrigation mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air, menekan kehilangan air, dan menjaga stabilitas produktivitas tanaman pada berbagai kondisi agroekosistem.

Di sisi lain, efektivitas penerapan smart irrigation dan sensor tanah tidak selalu menunjukkan hasil yang seragam pada setiap kondisi. Beberapa penelitian melaporkan peningkatan efisiensi penggunaan air yang signifikan, sementara penelitian lain menunjukkan bahwa keberhasilan teknologi sangat dipengaruhi oleh karakteristik tanah, jenis tanaman, tingkat integrasi sistem, kualitas sensor, serta kesiapan infrastruktur pendukung. Pada wilayah dengan keterbatasan akses teknologi dan infrastruktur digital, implementasi sistem berbasis IoT juga masih menghadapi berbagai kendala teknis maupun ekonomi. Lebih lanjut, tingginya biaya investasi awal dan rendahnya literasi teknologi petani menjadi tantangan dalam adopsi teknologi pertanian presisi, khususnya di negara berkembang.

Sejumlah penelitian sebelumnya umumnya membahas smart irrigation dan sensor tanah secara terpisah, terutama pada aspek otomasi irigasi atau monitoring kelembapan tanah berbasis IoT. Namun, kajian yang secara sistematis mengevaluasi hubungan antara integrasi kedua teknologi, efisiensi penggunaan air, produktivitas tanaman, serta tantangan implementasinya pada pertanian lahan kering masih relatif terbatas, khususnya dalam konteks negara berkembang. Kesenjangan tersebut menunjukkan perlunya sintesis ilmiah yang lebih komprehensif untuk memahami efektivitas dan keterbatasan penerapan teknologi secara lebih menyeluruh.

Beberapa studi review sebelumnya telah membahas smart irrigation, Internet of Things (IoT), maupun sensor kelembapan tanah secara terpisah. Namun, sebagian besar kajian masih berfokus pada aspek teknis otomatisasi irigasi atau monitoring kelembapan tanah tanpa mensintesis hubungan integratif antara smart irrigation, sensor tanah, efisiensi penggunaan air, produktivitas tanaman, dan tantangan implementasinya pada sistem pertanian lahan kering. Selain itu, kajian yang secara khusus menyoroti konteks negara berkembang, termasuk keterbatasan infrastruktur dan literasi teknologi petani, masih relatif terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas smart irrigation dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air, mengevaluasi peran sensor tanah dalam mendukung monitoring kondisi tanah secara real-time, serta mengidentifikasi berbagai tantangan implementasi teknologi pada sistem pertanian lahan kering. Penelitian ini difokuskan pada tiga pertanyaan utama, yaitu: (1) bagaimana pengaruh smart irrigation terhadap efisiensi penggunaan air pada lahan kering; (2) bagaimana peran sensor tanah dalam mendukung pengambilan keputusan irigasi; dan (3) faktor apa saja yang menjadi kendala implementasi integrasi smart irrigation dan sensor tanah pada pertanian lahan kering. Kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan pertanian presisi sekaligus menjadi referensi dalam pengelolaan air yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan pada wilayah lahan kering.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengkaji secara sistematis perkembangan penelitian mengenai integrasi *smart irrigation* dan sensor tanah dalam pengelolaan air pada pertanian lahan kering. Pendekatan SLR dipilih karena mampu memberikan sintesis ilmiah yang lebih terstruktur, transparan, dan sistematis dibandingkan tinjauan literatur naratif. Selain itu, metode ini memungkinkan identifikasi pola temuan, kesenjangan penelitian, serta kecenderungan perkembangan teknologi pada bidang pertanian presisi.

Proses penelusuran literatur dilakukan pada bulan Januari hingga Februari 2026 menggunakan beberapa database ilmiah, yaitu Google Scholar, ScienceDirect, Springer, MDPI, dan ProQuest. Pemilihan database tersebut didasarkan pada cakupan publikasi yang luas dan relevan dengan bidang pertanian presisi, teknologi irigasi, sensor tanah, serta sistem pertanian berbasis Internet of Things (IoT). Artikel yang digunakan dibatasi pada rentang publikasi tahun 2015-2026 untuk memperoleh informasi yang lebih mutakhir terkait perkembangan teknologi *smart irrigation* dan sensor tanah.

Strategi pencarian literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci dan operator Boolean untuk meningkatkan relevansi hasil pencarian. Kata kunci yang digunakan meliputi:

("smart irrigation" OR "precision irrigation") AND ("soil moisture sensor" OR "soil sensor") AND ("dryland farming" OR "water management" OR "water efficiency"). Selain pencarian utama, dilakukan pula penelusuran tambahan melalui daftar pustaka dari artikel yang relevan guna memperoleh sumber pendukung yang memiliki keterkaitan dengan topik penelitian.

Kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi: (1) artikel jurnal ilmiah *peer-reviewed*; (2) artikel berbahasa Indonesia maupun Inggris; (3) artikel yang membahas penerapan *smart irrigation*, sensor tanah, atau integrasi keduanya dalam pengelolaan air pertanian; (4) penelitian yang berkaitan dengan efisiensi penggunaan air atau pertanian lahan kering; serta (5) artikel yang memiliki penjelasan metodologi dan hasil penelitian yang jelas. Sementara itu, kriteria eksklusi meliputi: (1) artikel yang tidak relevan dengan fokus penelitian; (2) publikasi non-ilmiah seperti opini, prosiding non-review, dan artikel populer; (3) artikel dengan data atau metode yang tidak dijelaskan secara memadai; serta (4) artikel duplikat dari database yang berbeda.

Tahapan seleksi artikel dilakukan berdasarkan prinsip PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) yang terdiri atas tahap identifikasi, screening, eligibility, dan inclusion. Pada tahap identifikasi diperoleh sebanyak 186 artikel dari seluruh database. Setelah proses penghapusan artikel duplikat, tersisa 172 artikel untuk dilakukan screening berdasarkan judul dan abstrak. Hasil screening menunjukkan sebanyak 97 artikel dinilai relevan dengan fokus penelitian. Selanjutnya dilakukan evaluasi full-text sehingga diperoleh 54 artikel yang memenuhi syarat kelayakan. Setelah dilakukan seleksi akhir berdasarkan kesesuaian substansi dan kualitas metodologi, sebanyak 32 artikel digunakan dalam proses sintesis akhir.

Tabel 1. Tahapan Seleksi Artikel Berdasarkan PRISMA

Tahapan Seleksi Artikel	Jumlah Artikel
Artikel teridentifikasi dari database	186
Artikel setelah penghapusan duplikasi	172
Artikel lolos screening judul dan abstrak	97
Artikel yang dievaluasi full-text	54
Artikel final yang dianalisis	32

Tabel 2. Quality Assessment

Kriteria Penilaian Artikel	Indikator
Relevansi topik	Kesesuaian dengan smart irrigation dan sensor tanah
Kejelasan metodologi	Metode penelitian dijelaskan secara rinci
Validitas hasil	Data empiris dan hasil terukur
Kualitas pembahasan	Temuan didukung analisis ilmiah

Penilaian kualitas artikel dilakukan untuk memastikan bahwa setiap publikasi yang dianalisis memiliki relevansi dan validitas ilmiah yang memadai. Artikel yang tidak menjelaskan metode penelitian secara jelas atau tidak menyajikan data empiris yang terukur tidak dimasukkan dalam sintesis akhir. Pendekatan tersebut dilakukan untuk meningkatkan konsistensi kualitas data serta meminimalkan potensi bias dalam proses kajian literatur.

Data dari setiap artikel kemudian diekstraksi ke dalam beberapa komponen utama, meliputi jenis teknologi yang digunakan, jenis sensor tanah, sistem irigasi, konteks geografis penelitian, efisiensi penggunaan air, pengaruh terhadap produktivitas tanaman, serta berbagai kendala implementasi teknologi. Informasi tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan pendekatan sintesis kualitatif tematik dengan mengidentifikasi pola temuan, membandingkan hasil antar penelitian, dan mengelompokkan tema berdasarkan efektivitas *smart irrigation*, peran sensor tanah, integrasi teknologi, efisiensi penggunaan air, serta tantangan implementasi pada pertanian lahan kering.

Selain memberikan sintesis terhadap hasil penelitian yang telah dipublikasikan, pendekatan ini juga digunakan untuk mengidentifikasi kecenderungan perkembangan teknologi serta peluang penerapan sistem irigasi cerdas pada konteks pertanian lahan kering di negara berkembang, termasuk Indonesia. Di sisi lain, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena hanya menggunakan artikel yang tersedia pada database tertentu dan didominasi oleh publikasi berbahasa Inggris. Selain itu, pendekatan sintesis kualitatif yang

digunakan belum memungkinkan analisis statistik komparatif sebagaimana pada metode meta analisis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsep Pertanian Presisi dalam Pengelolaan Air

Pertanian presisi (*precision agriculture*) merupakan pendekatan pengelolaan pertanian berbasis teknologi yang memanfaatkan data, sensor, sistem informasi, dan otomatisasi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan input secara spesifik lokasi dan sesuai kebutuhan tanaman (Gebbers & Adamchuk, 2010). Konsep ini berkembang sebagai respons terhadap meningkatnya kebutuhan efisiensi produksi pertanian, keterbatasan sumber daya alam, serta tuntutan terhadap sistem pertanian yang lebih berkelanjutan. Dalam praktiknya, pertanian presisi tidak hanya difokuskan pada peningkatan produktivitas, tetapi juga diarahkan untuk mengoptimalkan penggunaan air, pupuk, energi, dan input pertanian lainnya secara lebih akurat dan efisien.

Dalam pengelolaan air pertanian, pendekatan pertanian presisi bertujuan mengurangi ketidakefisienan penggunaan air melalui penerapan teknologi monitoring dan pengendalian berbasis data real-time. Sistem ini memungkinkan keputusan irigasi dilakukan berdasarkan kondisi aktual tanah, kebutuhan fisiologis tanaman, dan faktor lingkungan lainnya sehingga distribusi air dapat dilakukan secara lebih tepat waktu, tepat jumlah, dan tepat sasaran. Pendekatan tersebut berbeda dengan sistem irigasi konvensional yang umumnya masih menggunakan jadwal tetap tanpa mempertimbangkan dinamika kondisi lapangan secara aktual (Evans & Sadler, 2008).

Perkembangan teknologi digital mendorong integrasi berbagai perangkat dalam sistem pertanian presisi, seperti sensor kelembapan tanah, sistem informasi geografis (*Geographic Information System/GIS*), Internet of Things (IoT), komputasi awan (*cloud computing*), dan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*). Teknologi tersebut berfungsi untuk mengumpulkan, mengirimkan, menganalisis, dan menginterpretasikan data kondisi lingkungan sebagai dasar pengambilan keputusan irigasi secara otomatis maupun semi-otomatis (Kour & Arora, 2020). Hasil sintesis berbagai penelitian menunjukkan bahwa pertanian presisi menjadi pendekatan yang semakin penting dalam mendukung pengelolaan air yang lebih efisien, terutama melalui integrasi sensor tanah, IoT, dan sistem irigasi otomatis.

Sensor tanah menjadi salah satu komponen utama dalam sistem pertanian presisi karena mampu menyediakan informasi kondisi kelembapan tanah secara real-time. Data tersebut kemudian diintegrasikan dengan sistem kontrol irigasi untuk menentukan kebutuhan air tanaman secara lebih akurat. Pada sistem yang lebih berkembang, data sensor juga dikombinasikan dengan informasi cuaca, evapotranspirasi, suhu udara, dan prakiraan iklim untuk meningkatkan ketepatan rekomendasi irigasi. Integrasi berbagai sumber data tersebut memungkinkan sistem merespons perubahan kondisi lingkungan secara lebih cepat dibandingkan pengamatan manual oleh petani.

Penerapan konsep pertanian presisi dalam pengelolaan air memberikan berbagai keuntungan, terutama dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mengurangi kehilangan air akibat pemberian yang berlebihan. Selain itu, pendekatan ini mampu membantu menjaga stabilitas kelembapan tanah pada zona perakaran tanaman sehingga mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih optimal. Beberapa penelitian melaporkan bahwa sistem pengelolaan air berbasis pertanian presisi mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air sekaligus mempertahankan produktivitas tanaman pada berbagai kondisi agroekosistem.

Di sisi lain, efektivitas implementasi pertanian presisi tidak selalu menunjukkan hasil yang seragam pada setiap kondisi. Perbedaan karakteristik tanah, kualitas infrastruktur digital, kapasitas pengguna, tingkat integrasi teknologi, serta biaya implementasi menyebabkan keberhasilan penerapan sistem sangat bervariasi antar wilayah. Pada beberapa kasus, keterbatasan akurasi sensor dan ketidakstabilan jaringan komunikasi juga dapat memengaruhi kualitas data yang digunakan dalam pengambilan keputusan irigasi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penerapan pertanian presisi memerlukan penyesuaian teknologi sesuai kondisi lokal agar manfaat yang diperoleh dapat lebih optimal.

Dalam konteks pertanian lahan kering, penerapan pertanian presisi memiliki potensi yang besar untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan air dan memperkuat adaptasi terhadap

perubahan iklim. Sistem pengelolaan air berbasis data memungkinkan penggunaan sumber daya air dilakukan secara lebih hemat dan responsif terhadap dinamika lingkungan yang berubah secara cepat. Namun, implementasi teknologi pada wilayah lahan kering di negara berkembang masih menghadapi berbagai kendala, terutama keterbatasan infrastruktur digital, tingginya biaya investasi teknologi, dan rendahnya kapasitas sumber daya manusia dalam pengoperasian sistem berbasis teknologi.

Dalam pengelolaan air pertanian, salah satu bentuk implementasi utama pertanian presisi adalah penerapan *smart irrigation* yang memanfaatkan sensor tanah dan sistem kontrol otomatis untuk mengatur distribusi air secara lebih efisien dan adaptif. Teknologi ini berkembang sebagai solusi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air pada wilayah dengan keterbatasan sumber daya air, terutama pada pertanian lahan kering.

Karakteristik Umum Penelitian

Pertanian Hasil penelusuran literatur menunjukkan bahwa penelitian mengenai *smart irrigation* dan sensor tanah mengalami peningkatan yang cukup signifikan dalam satu dekade terakhir, terutama setelah berkembangnya teknologi Internet of Things (IoT), otomatisasi pertanian, dan sistem monitoring berbasis data real-time. Sebagian besar artikel yang dianalisis berasal dari negara dengan tingkat pengembangan pertanian presisi yang relatif maju, seperti Amerika Serikat, Spanyol, India, Tiongkok, dan Australia. Sementara itu, penelitian pada konteks negara berkembang, termasuk Indonesia, masih relatif terbatas dan umumnya berada pada tahap pengembangan prototipe atau demonstrasi teknologi skala terbatas.

Berdasarkan hasil sintesis, mayoritas penelitian berfokus pada penerapan sensor kelembapan tanah yang diintegrasikan dengan sistem irigasi otomatis untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air. Teknologi yang digunakan meliputi sensor berbasis resistive, capacitive, dan *Time Domain Reflectometry* (TDR), yang dikombinasikan dengan sistem kontrol otomatis, aktuator irigasi, serta platform monitoring berbasis IoT. Pada beberapa penelitian, sistem juga telah dikembangkan menggunakan komputasi awan (*cloud computing*), kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), dan analisis prediktif untuk mendukung pengambilan keputusan irigasi secara lebih adaptif.

Tabel 3. Karakteristik Umum Artikel yang Dianalisis

Penulis	Negara	Komoditas	Teknologi	Hasil Utama	Kendala
Taghvaeian et al. (2022)	Amerika Serikat	Jagung	Sensor-based irrigation	Efisiensi air meningkat 20–40%	Biaya instalasi
Singh et al. (2020)	India	Gandum	Soil moisture sensor	Akurasi monitoring meningkat	Kalibrasi sensor
Vallejo-G et al. (2023)	Spanyol	Hortikultura	IoT smart irrigation	Monitoring real-time lebih efektif	Infrastruktur internet
Susila et al. (2023)	Indonesia	Cabai	Sensor + drip irrigation	Efisiensi irigasi meningkat	Literasi teknologi rendah
Mohamed et al. (2024)	Mesir	Tomat	IoT irrigation system	Penghematan air signifikan	Kompleksitas sistem

Sejumlah penelitian memperlihatkan bahwa perkembangan teknologi *smart irrigation* tidak hanya berorientasi pada penghematan air, tetapi juga diarahkan untuk meningkatkan ketepatan distribusi air sesuai kebutuhan tanaman. Pada sistem konvensional, pemberian air umumnya dilakukan berdasarkan jadwal tetap sehingga kurang mempertimbangkan kondisi aktual tanah dan tanaman. Sebaliknya, sistem irigasi cerdas memungkinkan pemberian air dilakukan secara dinamis berdasarkan data kelembapan tanah, suhu, cuaca, dan kebutuhan fisiologis tanaman.

Efektivitas *Smart irrigation* dalam Pengelolaan Air

Hasil sintesis menunjukkan bahwa penerapan *smart irrigation* secara umum mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air pada berbagai jenis tanaman dan kondisi agroekosistem. Peningkatan efisiensi tersebut terutama diperoleh melalui optimalisasi waktu dan volume pemberian air berdasarkan kondisi aktual tanah dan kebutuhan tanaman. Beberapa penelitian melaporkan bahwa penerapan *smart irrigation* mampu menekan

penggunaan air sebesar 20–50% dibandingkan sistem konvensional, terutama pada sistem irigasi tetes berbasis sensor tanah (Taghvaeian et al., 2022; Mohamed et al., 2026; Vallejo-G et al., 2023).

Secara umum, penelitian yang dianalisis memperlihatkan kecenderungan bahwa peningkatan efisiensi penggunaan air sangat dipengaruhi oleh tingkat integrasi teknologi yang digunakan. Sistem irigasi yang terhubung secara otomatis dengan sensor kelembapan tanah umumnya menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan sistem semi-otomatis atau irigasi berbasis jadwal tetap. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa keberhasilan *smart irrigation* tidak hanya bergantung pada keberadaan sensor, tetapi juga ditentukan oleh kemampuan sistem dalam merespons perubahan kondisi tanah dan kebutuhan air tanaman secara dinamis.

Efisiensi penggunaan air yang lebih tinggi terjadi karena sistem mampu mengurangi kehilangan air akibat evaporasi, limpasan permukaan, dan infiltrasi berlebih di luar zona perakaran tanaman. Pada sistem irigasi konvensional, pemberian air sering kali dilakukan secara berlebihan untuk mengantisipasi kekurangan air pada tanaman. Praktik tersebut menyebabkan penggunaan air menjadi tidak efisien, terutama pada lahan kering yang memiliki kapasitas retensi air rendah. Integrasi sensor tanah dalam sistem irigasi memungkinkan pengendalian air dilakukan secara lebih presisi sehingga volume air yang diberikan menjadi lebih sesuai dengan kebutuhan aktual tanaman.

Selain meningkatkan efisiensi penggunaan air, beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa *smart irrigation* mampu menjaga stabilitas produktivitas tanaman pada kondisi cekaman kekeringan. Sistem irigasi berbasis sensor dapat membantu mempertahankan kelembapan tanah pada kisaran optimal sehingga tanaman tetap memperoleh suplai air yang memadai selama fase pertumbuhan kritis. Pada komoditas hortikultura seperti tomat, cabai, dan mentimun, penerapan sistem irigasi tetes otomatis dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi air tanpa menurunkan hasil produksi secara signifikan.

Di sisi lain, efektivitas *smart irrigation* tidak selalu menunjukkan hasil yang seragam pada setiap kondisi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi penggunaan air tidak selalu diikuti oleh peningkatan produktivitas tanaman secara signifikan. Pada tanah bertekstur pasir dengan kapasitas retensi air rendah, pengurangan volume air yang terlalu agresif justru dapat meningkatkan risiko stres tanaman apabila sistem sensor dan kontrol irigasi tidak memiliki sensitivitas yang memadai. Selain itu, keberhasilan sistem juga dipengaruhi oleh kualitas sensor, akurasi data, jenis tanaman, serta tingkat integrasi teknologi yang digunakan.

Dalam praktiknya, sistem irigasi otomatis yang terintegrasi penuh dengan sensor tanah umumnya memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan sistem semi-otomatis atau irigasi berbasis jadwal tetap. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kualitas integrasi antar komponen teknologi menjadi faktor penting dalam menentukan efektivitas sistem *smart irrigation* pada pertanian lahan kering.

Efisiensi Penggunaan Air dan Produktivitas

Penerapan *smart irrigation* dan sensor tanah menunjukkan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan efisiensi penggunaan air pada berbagai sistem budidaya pertanian. Secara umum literatur, sebagian besar penelitian melaporkan bahwa sistem irigasi berbasis sensor mampu mengurangi penggunaan air dibandingkan metode irigasi konvensional. Tingkat penghematan air yang dilaporkan bervariasi, berkisar antara 20–50%, tergantung jenis tanaman, kondisi agroekosistem, tingkat integrasi teknologi, dan metode irigasi yang digunakan.

Peningkatan efisiensi penggunaan air terjadi karena sistem irigasi cerdas mampu mengatur waktu dan volume pemberian air berdasarkan kondisi aktual kelembapan tanah dan kebutuhan tanaman. Pendekatan tersebut memungkinkan pengurangan kehilangan air akibat evaporasi, limpasan permukaan, dan infiltrasi berlebih di luar zona perakaran. Pada sistem konvensional, pemberian air umumnya dilakukan berdasarkan jadwal tetap sehingga sering menyebabkan penggunaan air yang berlebihan, terutama pada lahan dengan kapasitas retensi air rendah.

Selain meningkatkan efisiensi penggunaan air, beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa penerapan *smart irrigation* mampu mempertahankan bahkan meningkatkan

produktivitas tanaman. Pada komoditas hortikultura seperti tomat, cabai, mentimun, dan melon, sistem irigasi berbasis sensor dilaporkan mampu menjaga stabilitas kelembapan tanah pada zona perakaran sehingga tanaman memperoleh suplai air yang lebih optimal selama fase pertumbuhan kritis. Kondisi tersebut berkontribusi terhadap peningkatan pertumbuhan vegetatif, kualitas hasil, dan efisiensi penggunaan air per satuan produksi.

Di sisi lain, hubungan antara efisiensi penggunaan air dan peningkatan produktivitas tidak selalu bersifat linear. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pengurangan volume air yang terlalu tinggi dapat meningkatkan risiko stres tanaman, terutama pada tanah bertekstur pasir dengan kapasitas penyimpanan air yang rendah. Pada kondisi tertentu, peningkatan efisiensi penggunaan air tidak selalu diikuti oleh peningkatan hasil panen secara signifikan. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa keberhasilan sistem *smart irrigation* sangat dipengaruhi oleh ketepatan pengaturan ambang kelembapan tanah, kualitas sensor, jenis tanaman, dan karakteristik lingkungan setempat.

Hasil sintesis juga menunjukkan bahwa sistem irigasi tetes otomatis yang terintegrasi penuh dengan sensor tanah umumnya memberikan hasil efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sistem semi-otomatis atau irigasi berbasis jadwal tetap. Integrasi teknologi memungkinkan distribusi air dilakukan secara lebih presisi sehingga tanaman memperoleh air sesuai kebutuhan aktualnya. Di sisi lain, sistem yang belum terintegrasi secara optimal masih menghadapi risiko ketidaksesuaian distribusi air akibat keterlambatan respons atau ketidakakuratan data sensor.

Dalam konteks pertanian lahan kering, peningkatan efisiensi penggunaan air menjadi faktor yang sangat penting mengingat keterbatasan sumber daya air dan tingginya risiko kekeringan. Oleh karena itu, penerapan *smart irrigation* dan sensor tanah memiliki potensi besar untuk mendukung sistem pertanian yang lebih adaptif dan berkelanjutan. Namun, keberhasilan implementasinya tetap memerlukan penyesuaian teknologi terhadap kondisi lokal agar efisiensi penggunaan air dapat dicapai tanpa menurunkan produktivitas tanaman secara signifikan.

Peran Sensor Tanah dalam Monitoring dan Pengambilan Keputusan

Sensor tanah memiliki peranan penting dalam mendukung sistem pengelolaan air berbasis pertanian presisi. Sensor ini digunakan untuk memantau kondisi kelembapan tanah secara real-time sehingga keputusan pemberian air dapat dilakukan secara lebih akurat dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Informasi yang dihasilkan sensor menjadi dasar utama dalam menentukan kapan irigasi dilakukan dan berapa volume air yang perlu diberikan.

Berdasarkan hasil sintesis literatur, sensor kelembapan tanah yang paling banyak digunakan meliputi sensor resistive, capacitive, dan *Time Domain Reflectometry* (TDR). Masing-masing sensor memiliki tingkat sensitivitas, akurasi, dan biaya implementasi yang berbeda.

Tabel 4. Jenis Sensor Tanah dan Karakteristiknya

Jenis Sensor	Parameter	Kelebihan	Keterbatasan
Resistive sensor	Kelembapan tanah	Murah dan sederhana	Mudah korosi
Capacitive sensor	Kelembapan tanah	Stabil dan tahan lama	Membutuhkan kalibrasi
TDR sensor	Kandungan air tanah	Akurasi tinggi	Biaya relatif tinggi
IoT-based sensor	Monitoring real-time	Integrasi otomatis	Bergantung konektivitas

Sensor berbasis resistive umumnya digunakan karena biaya implementasinya relatif murah dan mudah diterapkan pada skala kecil. Namun, sensor jenis ini memiliki kelemahan berupa tingkat korosi yang lebih tinggi sehingga umur pakainya relatif pendek. Sensor capacitive memiliki stabilitas yang lebih baik dan lebih tahan terhadap kondisi lingkungan, tetapi tetap membutuhkan proses kalibrasi untuk memperoleh hasil pengukuran yang akurat. Sementara itu, sensor TDR dikenal memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan sensor lainnya, meskipun biaya implementasinya relatif lebih mahal.

Variasi tingkat akurasi antar sensor menunjukkan bahwa efektivitas monitoring kelembapan tanah tidak hanya dipengaruhi oleh jenis sensor yang digunakan, tetapi juga

berkaitan dengan karakteristik fisik tanah, kandungan bahan organik, serta proses kalibrasi lokal. Pada beberapa kondisi, sensor dengan biaya rendah tetap mampu memberikan hasil yang cukup baik apabila dikalibrasi sesuai karakteristik tanah setempat.

Sejumlah penelitian memperlihatkan bahwa tingkat akurasi sensor sangat dipengaruhi oleh karakteristik tanah, terutama tekstur tanah, suhu, salinitas, dan kandungan bahan organik. Oleh karena itu, proses kalibrasi lokal menjadi faktor penting untuk memastikan validitas data yang digunakan dalam pengambilan keputusan irigasi. Pada beberapa penelitian, ketidakakuratan data sensor menyebabkan sistem irigasi memberikan air dalam jumlah yang tidak sesuai dengan kebutuhan tanaman.

Selain berfungsi sebagai alat monitoring, sensor tanah juga berperan dalam mendukung pengembangan sistem pengambilan keputusan otomatis (*decision support system*). Data yang diperoleh sensor dapat diintegrasikan dengan platform IoT dan sistem komputasi awan untuk menghasilkan rekomendasi irigasi secara otomatis berdasarkan kondisi lingkungan aktual. Integrasi tersebut memungkinkan sistem merespons perubahan kelembapan tanah secara lebih cepat dibandingkan pengamatan manual oleh petani.

Integrasi *Smart irrigation* dan Sensor Tanah

Integrasi *smart irrigation* dan sensor tanah merupakan salah satu komponen utama dalam pengembangan pertanian presisi berbasis data. Sistem ini bekerja melalui pengumpulan data kondisi tanah secara real-time, transmisi data melalui jaringan IoT, analisis kebutuhan air tanaman, dan pengendalian aktuator irigasi secara otomatis. Integrasi tersebut memungkinkan pengelolaan air dilakukan secara lebih efisien, adaptif, dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Tabel 5. Integrasi *Smart Irrigation* dan Sensor Tanah

Komponen Sistem	Fungsi Utama	Kontribusi
Sensor tanah	Mengukur kelembapan tanah	Data real-time
IoT	Transmisi data	Monitoring jarak jauh
Cloud/data system	Analisis data	Prediksi kebutuhan air
Smart controller	Mengatur irigasi	Efisiensi distribusi air
Aktuator irigasi	Eksekusi pemberian air	Pengurangan pemborosan

Tantangan Implementasi pada Pertanian Lahan Kering

Meskipun memiliki potensi yang besar, implementasi *smart irrigation* dan sensor tanah pada pertanian lahan kering masih menghadapi berbagai kendala teknis, ekonomi, sosial, dan kelembagaan.

Hambatan Teknis

Hambatan teknis meliputi kebutuhan kalibrasi sensor, keterbatasan daya tahan perangkat di lapangan, serta risiko kesalahan data akibat variasi tekstur tanah, suhu, dan salinitas. Selain itu, konektivitas internet yang tidak stabil pada wilayah pedesaan menjadi kendala utama dalam penerapan sistem monitoring berbasis IoT secara real-time.

Hambatan Ekonomi

Biaya investasi awal yang relatif tinggi masih menjadi hambatan dominan, terutama bagi petani skala kecil. Pengadaan sensor, perangkat kontrol otomatis, jaringan komunikasi, serta biaya pemeliharaan menyebabkan teknologi ini belum dapat diakses secara luas oleh seluruh petani.

Hambatan Sosial

Rendahnya literasi teknologi dan keterbatasan pelatihan menyebabkan sebagian petani masih mengalami kesulitan dalam memahami pengoperasian sistem dan interpretasi data sensor. Pada beberapa kasus, petani juga masih memiliki preferensi terhadap metode irigasi konvensional yang dianggap lebih sederhana dan mudah diterapkan.

Hambatan Kelembagaan

Dukungan kebijakan, subsidi teknologi, dan penguatan kelembagaan pertanian presisi di Indonesia masih relatif terbatas. Kondisi ini menyebabkan implementasi teknologi lebih banyak berada pada tahap penelitian dan demonstrasi dibandingkan penerapan luas pada tingkat petani.

Dalam konteks negara berkembang, tantangan implementasi smart irrigation tidak hanya berkaitan dengan aspek teknologi, tetapi juga dipengaruhi oleh kesiapan sosial-ekonomi petani dan dukungan kelembagaan. Pada banyak kasus, teknologi sebenarnya telah tersedia, namun adopsinya berjalan lambat karena keterbatasan akses pembiayaan, rendahnya literasi digital, serta belum optimalnya sistem pendampingan teknologi di tingkat lapangan. Kondisi ini menunjukkan bahwa transformasi menuju pertanian presisi memerlukan pendekatan multidisiplin yang tidak hanya berorientasi pada inovasi teknologi, tetapi juga pada penguatan kapasitas pengguna dan sistem kelembagaan pertanian.

Perbandingan Implementasi Global vs Indonesia

Perkembangan *smart irrigation* di negara maju umumnya didukung oleh infrastruktur digital yang lebih baik, akses pembiayaan yang kuat, serta dukungan kebijakan yang lebih adaptif terhadap inovasi pertanian. Negara seperti Amerika Serikat, Australia, dan Spanyol telah mengembangkan sistem irigasi otomatis berbasis IoT secara komersial pada berbagai skala usaha tani.

Sebaliknya, implementasi di Indonesia masih menghadapi berbagai keterbatasan, terutama terkait infrastruktur digital, akses teknologi, dan kapasitas sumber daya manusia. Sektor pertanian Indonesia masih didominasi oleh petani skala kecil dengan keterbatasan modal dan tingkat adopsi teknologi yang relatif rendah.

Tabel 6. Perbandingan Implementasi Smart Irrigation

Aspek	Negara Maju	Indonesia
Infrastruktur digital	Stabil	Terbatas
Dukungan subsidi	Tinggi	Relatif rendah
Literasi teknologi	Tinggi	Masih rendah
Skala usaha tani	Besar	Fragmentatif
Tingkat adopsi	Komersial luas	Pilot project

KESIMPULAN

Sejumlah penelitian memperlihatkan bahwa penerapan *smart irrigation* dan sensor tanah memiliki potensi yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan air pada pertanian lahan kering. Integrasi teknologi berbasis sensor, Internet of Things (IoT), dan sistem kontrol otomatis memungkinkan distribusi air dilakukan secara lebih presisi berdasarkan kondisi aktual tanah dan kebutuhan tanaman. Pendekatan tersebut mampu mengurangi kehilangan air akibat evaporasi, limpasan, dan pemberian air berlebih yang umum terjadi pada sistem irigasi konvensional.

Secara umum berbagai penelitian, penerapan *smart irrigation* secara umum mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dengan tingkat penghematan yang bervariasi tergantung jenis tanaman, kondisi agroekosistem, kualitas sensor, dan tingkat integrasi teknologi yang digunakan. Selain meningkatkan efisiensi penggunaan air, beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa sistem irigasi cerdas dapat membantu menjaga stabilitas produktivitas tanaman, terutama pada kondisi lahan kering yang memiliki keterbatasan sumber daya air.

Sensor tanah berperan penting dalam mendukung sistem pengambilan keputusan irigasi berbasis data real-time. Informasi mengenai kelembapan tanah memungkinkan sistem irigasi merespons perubahan kondisi lingkungan secara lebih cepat dan akurat dibandingkan pendekatan manual. Integrasi sensor tanah dengan sistem kontrol otomatis dan platform IoT menjadi salah satu komponen utama dalam pengembangan pertanian presisi yang lebih efisien dan adaptif terhadap perubahan lingkungan.

Di sisi lain, implementasi *smart irrigation* dan sensor tanah masih menghadapi berbagai tantangan, terutama terkait biaya investasi, kebutuhan infrastruktur digital, akurasi sensor, serta keterbatasan kapasitas sumber daya manusia dalam pengoperasian teknologi. Pada konteks negara berkembang seperti Indonesia, tingkat adopsi teknologi juga dipengaruhi oleh skala usaha tani yang relatif kecil, keterbatasan akses pembiayaan, dan rendahnya literasi teknologi petani. Fenomena ini mengindikasikan bahwa keberhasilan implementasi teknologi tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis, tetapi juga oleh kesiapan ekosistem inovasi dan dukungan kebijakan yang memadai.

Selain memberikan sintesis mengenai efektivitas *smart irrigation* dan sensor tanah, kajian ini menunjukkan bahwa pengembangan pertanian presisi pada masa mendatang perlu diarahkan tidak hanya pada peningkatan performa teknologi, tetapi juga pada penguatan aspek implementasi di tingkat pengguna. Pengembangan sistem yang lebih sederhana, terjangkau, dan sesuai dengan kondisi lokal menjadi faktor penting untuk meningkatkan adopsi teknologi pada pertanian lahan kering.

Secara keseluruhan, hasil kajian memperlihatkan bahwa integrasi *smart irrigation* dan sensor tanah memiliki prospek yang besar dalam mendukung pengelolaan air yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan pada pertanian lahan kering. Namun, keberhasilan implementasinya memerlukan dukungan infrastruktur, kapasitas sumber daya manusia, dan kebijakan yang mampu mendorong adopsi teknologi secara lebih luas. Oleh karena itu, pengembangan sistem irigasi cerdas pada masa mendatang perlu diarahkan tidak hanya pada peningkatan performa teknologi, tetapi juga pada kesesuaian teknologi dengan kondisi sosial, ekonomi, dan agroekosistem lokal.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena hanya menggunakan artikel dari database tertentu dan didominasi oleh publikasi berbahasa Inggris. Lebih lanjut, pendekatan sintesis kualitatif yang digunakan belum memungkinkan analisis statistik komparatif sebagaimana pada metode meta-analisis. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan kajian berbasis meta-analisis atau penelitian lapang yang lebih spesifik pada kondisi agroekosistem lahan kering di Indonesia agar diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai efektivitas penerapan *smart irrigation* dan sensor tanah dalam mendukung pertanian berkelanjutan.

REKOMENDASI

Berdasarkan hasil kajian, pengembangan dan penerapan *smart irrigation* serta sensor tanah pada pertanian lahan kering perlu diarahkan pada penguatan integrasi teknologi yang lebih adaptif, efisien, dan sesuai dengan kondisi lokal. Penggunaan sistem irigasi berbasis sensor menunjukkan potensi yang besar dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air, namun efektivitas implementasinya sangat dipengaruhi oleh kualitas infrastruktur, kapasitas pengguna, serta tingkat integrasi antar perangkat teknologi. Oleh karena itu, pengembangan teknologi pada masa mendatang perlu mempertimbangkan aspek kesederhanaan sistem, kemudahan operasional, dan keterjangkauan biaya agar dapat diterapkan secara lebih luas pada tingkat petani.

Peningkatan kapasitas sumber daya manusia menjadi salah satu faktor penting dalam mendukung keberhasilan implementasi pertanian presisi. Program pelatihan dan pendampingan teknis bagi petani, penyuluh pertanian, dan pengelola irigasi perlu diperkuat agar pemanfaatan teknologi tidak hanya terbatas pada tahap demonstrasi atau proyek penelitian. Selain itu, peningkatan literasi digital dan kemampuan interpretasi data sensor menjadi aspek penting untuk mendukung pengambilan keputusan irigasi yang lebih efektif.

Dari sisi kebijakan, diperlukan dukungan pemerintah dalam bentuk penguatan infrastruktur digital pedesaan, pengembangan sistem pertanian presisi berbasis lokal, serta pemberian insentif atau subsidi teknologi bagi petani skala kecil. Dukungan kelembagaan dan kolaborasi antara pemerintah, perguruan tinggi, sektor swasta, dan lembaga penelitian juga perlu ditingkatkan untuk mempercepat transfer teknologi dan memperluas adopsi *smart irrigation* pada berbagai wilayah pertanian lahan kering.

Pengembangan penelitian selanjutnya disarankan untuk lebih difokuskan pada evaluasi efektivitas teknologi dalam kondisi agroekosistem spesifik di Indonesia, terutama pada wilayah lahan kering dengan karakteristik tanah dan iklim yang beragam. Penelitian berbasis uji lapang jangka panjang juga diperlukan untuk mengevaluasi stabilitas kinerja sensor, efisiensi penggunaan air, dampak terhadap produktivitas tanaman, serta kelayakan ekonomi penerapan teknologi pada tingkat petani. Lebih lanjut, pengembangan sistem berbasis kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) dan analisis prediktif berpotensi menjadi arah penelitian yang penting dalam mendukung sistem pengelolaan air pertanian yang lebih adaptif terhadap perubahan iklim.

Dalam jangka panjang, penerapan *smart irrigation* dan sensor tanah diharapkan tidak hanya berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi penggunaan air, tetapi juga mendukung

transformasi menuju sistem pertanian yang lebih presisi, berkelanjutan, dan resilien terhadap tekanan perubahan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aashabai, A. ., N, H., Kumar, K. C., Srinivasulu, M., & Kumar, G. M. (2024). Laboratory Evaluation of Soil Moisture Sensors for Precision Irrigation in Agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(8), 321–332.
- Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., & Norton, T. (2017). *Advanced Monitoring and Management Systems for Improving Sustainability in Precision Irrigation*. Sustainability, 9(3), 353. <https://doi.org/10.3390/su903035>
- Ahmed, Z., Gui, D., Murtaza, G., Yunfei, L., & Ali, S. (2023). An Overview of Smart irrigation Management for Improving Water Productivity under Climate Change in Drylands. *Agronomy*, 13(8), 1–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy13082113>
- Aisyah, N., Ulhaq, E. D., Dharmawan, A., & Purbakawaca, R. (2025). DESIGN OF AN IOT-BASED SMART IRRIGATION SYSTEM USING SOIL MOISTURE SENSORS FOR WATER EFFICIENCY. *Journals Online of Physics*, 11(1), 89–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.22437/jop.v11i1.48928>
- Ardianto, A. F., Rahmasari, E. S., & Pratama, A. P. (2025). Smart irrigation System Berbasis IoT dengan Sensor Soil Moisture dan DHT22 Menggunakan Sumber Daya Terbarukan. *Seminar Nasional Teknologi Informasi Dan Bisnis*, 500–511.
- Bogena, H.R., Huisman, J.A., Oberdörster, C., & Vereecken, H. (2007). Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *Journal of Hydrology*, 344, 32–42. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2749-2017>
- Ella, W. O. D. M., Biabdillah, F., Wajiansyah, A., & Mulia, A. (2026). SMARTSOIL : SISTEM MONITORING KELEMBAPAN TANAH BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) MENGGUNAKAN ESP32 DAN SENSOR SOIL MOISTURE. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 14(1), 820–827. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23960/jitet.v14i1.8788>
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Agricultural Water Management*, 177, 21–28. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Food and Agriculture Organization. (2021). *Water management in rainfed agriculture*. FAO. <https://www.fao.org/3/cb1447en/cb1447en.pdf>
- Hidayati, N., & Suryanto, A. (2020). Penggunaan sensor kelembapan tanah untuk efisiensi irigasi pada tanaman hortikultura. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 21(3), 167–176.
- Kim, Y., Evans, R. G., & Iversen, W. M. (2008). Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. *Agricultural Water Management*, 96(1), 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.05.005>
- Kour, V., & Arora, S. (2020). Recent developments of the internet of things in agriculture: A survey. *Computer Communications*, 148, 321–349. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.09.030>
- Kurniawan, D., & Wibowo, A. (2022). Penerapan pertanian presisi untuk efisiensi penggunaan air pada lahan kering di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 16(2), 89–98.
- Lapušinskij, A., Suzdalev, I., Goranin, N., Janulevič, J., Ramanauskait, S., & Stankunavičius, G. (2021). The Application of Hough Transform and Canny Edge Detector Methods for the Visual Detection of Cumuliform Clouds. *Sensors*, 21(17), 5821. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s2117582>
- Lowenberg-DeBoer, J., Huang, I. Y., Grigoriadis, V., & Blackmore, S. (2020). Economics of precision agriculture adoption. *Agricultural Systems*, 173, 102867. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102867>
- Miller, T., Mikiciuk, G., Durlik, I., & Mikiciuk, M. (2025). The IoT and AI in Agriculture : The Time Is Now — A Systematic Review of Smart Sensing Technologies. *Sensors*, 25(12), 1–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s25123583>
- Mohamed, Z. E., Afify, M. K., Badr, M. M., & Omar, O. A. (2026). IoT-driven smart irrigation system to improve water use efficiency. *Scientific Reports*, 16(2609), 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-025-33826-6>
- Muñoz-Carpena, R. (2020). Soil moisture modeling and sensor integration for irrigation scheduling. *Vadose Zone Journal*, 19(1), e20033. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20033>

- Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2020). Implementing sustainable irrigation in water-scarce regions under climate change. *Agricultural Water Management*, 241, 106351. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106351>
- Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management*, 108, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>
- Prabowo, A., Saptomo, S. K., & Setiawan, B. I. (2021). Implementasi sistem irigasi otomatis berbasis IoT di lahan kering. *Jurnal Irigasi*, 16(1), 45–56.
- Rantelobo, K., Olviana, T., Pell, Y. M., Laubase, T., Berubu, H. I. A., Bernandus, Rammang, N., & Sampeallo, A. (2025). Implementasi teknologi IoT dengan jaringan sensor nirkabel pada sistem irigasi tetes otomatis di lahan kering kepulauan. *Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat*, 8(3), 317–324. <https://doi.org/10.28989/kacaneegara.v8i3.2741>
- Rose, D. C., Sutherland, W. J., Parker, C., Lobley, M., Winter, M., Morris, C., Twining, S., Ffoulkes, C., Amano, T., & Dicks, L. V. (2016). Decision support tools for agriculture: Towards effective design and delivery. *Agricultural Systems*, 149, 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.09.009>
- Salam, A., Shah, S. A., & others. (2021). Internet of things for sustainable agriculture: Opportunities and challenges. *Sustainability*, 13(4), 1785. <https://doi.org/10.3390/su13041785>
- Saptomo, S. K., Setiawan, B. I., & Prabowo, A. (2018). Development of smart irrigation system for water saving in rice field. *Jurnal Irigasi*, 13(2), 85–96.
- Setiawan, B. I., Saptomo, S. K., & Widodo, S. (2019). Smart irrigation model based on soil moisture for efficient water use. *Jurnal Keteknik Pertanian*, 7(2), 101–110.
- Singh, A., et al. (2020). Soil moisture sensing technologies for precision agriculture: A review. *Sensors*, 20(18), 5125. <https://doi.org/10.3390/s20185125>
- Subhasree, N., Rao, B. K., Mani, A., Annapurna, S., Rao, V. S., Sunitha, K., & Kumar, A. G. M. (2025). Performance Assessment of Soil Moisture Sensors for Precision Irrigation Scheduling. *Journal of Scientific Research and Reports*, 31(11), 643–652.
- Susila, A. D., Suketi, K., & Pratama, M. (2023). Penggunaan Sensor Kelembapan Tanah untuk Penetapan Jadwal Penyiraman Tanaman Cabai melalui Irigasi Tetes Use of Soil Moisture Sensors to Determine Chili Irrigation Scheduling through Drip Irrigation. *Jurnal Hortikultura Indonesia*, 14(200), 126–132. <https://doi.org/http://doi.org/10.29244/jhi.14.3.126-132>
- Taghvaeian, S., et al. (2022). Sensor-based irrigation scheduling for improving water use efficiency. *Irrigation Science*, 40, 123–135. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00769-4>
- Valiente, N., Dountcheva, I., Sanz, D., & Gómez-Alday, J. J. (2022). Using Stable Isotopes to Assess Groundwater Recharge and Solute Transport in a Density-Driven Flow-Dominated Lake – Aquifer System. *Water*, 14(10), 1628. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w14101628>
- Vallejo-g, D., Osorio, M., & Hincapi, C. A. (2023). Smart irrigation Systems in Agriculture : A Systematic Review. *Agronomy*, 13(2), 1–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy13020342>
- Vellidis, G., Liakos, V., Andreis, J. H., Perry, C., Porter, W., Barnes, E., Morgan, K., & Fraisse, C. (2016). Development and assessment of a wireless sensor network for irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*, 172, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.009>
- Wang, Y., Xing, Z., Ma, L., Qu, A., & Xue, J. (2022). Object Detection Algorithm for Lingwu Long Jujubes Based on the Improved SSD. *Agriculture*, 12(9), 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agriculture12091456>
- Widari, L. A. (2025). Dampak Pemanfaatan Teknologi Irigasi Otomatis dan Sensor Kelembapan Tanah terhadap Efisiensi Ekonomi Pertanian dan Ketahanan Pangan Berkelanjutan. *Journal of Economic Studies*, 1(2), 107–113.
- Zhang, L., et al. (2023). Artificial intelligence for smart irrigation management: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204, 107534. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107534>