Inovasi Teknologi Pengelolaan Tanah dan Air untuk Meningkatkan Produktivitas Lahan

Innovative Technologies for Soil and Water Management to Enhance Land Productivity

Ayu Indah Purnama Mendrofa

Prodi Agroteknologi Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Nias

Corresponden Author: ayuindah8purnamamendrofa@gmail.com

Received: 15 Mei 2025; Accepted 27 Mei 2025; Published: 01 Juni 2025

ABSTRACT

Technological innovation in soil and water management plays a crucial role in sustainably increasing agricultural land productivity. This article aims to review the latest technological innovations applied in soil and water management, such as soil testing, balanced fertilization, amelioration, precision agriculture, as well as Internet of Things (IoT)-based irrigation systems and digital water management. The method used is a literature review of various freely accessible national and international journals. The review shows that the implementation of these technological innovations can improve the efficiency of agricultural input use, optimize crop yields, and reduce negative environmental impacts. The integration of digital technology also accelerates data-driven decision-making, supporting agriculture that is adaptive to climate change. Therefore, technological innovation in soil and water management is essential to support future food security and land productivity.

Keywords: *Technological innovation, Soil management, Water management, Land productivity, Precision agriculture*

ABSTRAK

Inovasi teknologi dalam pengelolaan tanah dan air memegang peranan penting dalam meningkatkan produktivitas lahan pertanian secara berkelanjutan. Artikel ini bertujuan untuk mengulas berbagai inovasi teknologi terbaru yang telah diterapkan dalam pengelolaan tanah dan air, seperti uji tanah, pemupukan berimbang, ameliorasi, pertanian presisi, serta sistem irigasi berbasis Internet of Things (IoT) dan digitalisasi pengelolaan air. Metode yang digunakan adalah literature review terhadap berbagai jurnal nasional dan internasional yang dapat diakses secara gratis. Hasil kajian menunjukkan bahwa penerapan inovasi teknologi tersebut mampu meningkatkan efisiensi penggunaan input pertanian, mengoptimalkan hasil panen, serta mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Integrasi teknologi digital juga mempercepat proses pengambilan keputusan berbasis data, sehingga mendukung pertanian yang adaptif terhadap perubahan iklim. Dengan demikian, inovasi teknologi pengelolaan tanah dan air sangat penting untuk mendukung ketahanan pangan dan produktivitas lahan di masa depan.

Kata Kunci: *Inovasi teknologi, Pengelolaan tanah, Pengelolaan air, Produktivitas lahan, Pertanian presisi*

Pendahuluan

Pertanian merupakan sektor vital yang menjadi tulang punggung ketahanan pangan dan perekonomian di banyak negara, termasuk Indonesia. Keberhasilan sektor ini sangat bergantung pada pengelolaan sumber daya alam,

terutama tanah dan air, yang merupakan dua faktor utama penentu produktivitas lahan. Tanah menyediakan unsur hara dan media tumbuh yang esensial bagi tanaman, sementara air berperan penting dalam proses fisiologis tanaman dan menjaga keseimbangan ekosistem pertanian.

Namun, dalam beberapa dekade terakhir, produktivitas lahan pertanian menghadapi berbagai tantangan kompleks, seperti degradasi tanah, penurunan kesuburan, keterbatasan air, serta perubahan iklim yang menyebabkan ketidakpastian pola curah hujan dan kondisi lingkungan yang semakin ekstrem. Oleh karena itu, pengelolaan tanah dan air yang efektif dan berkelanjutan menjadi kebutuhan mendesak untuk memastikan produktivitas lahan tetap optimal.

Degradasi tanah merupakan salah satu masalah utama yang mengancam keberlanjutan pertanian. Proses degradasi ini meliputi erosi, penurunan kandungan bahan organik, salinisasi, dan pencemaran oleh bahan kimia berbahaya yang berasal dari penggunaan pupuk dan pestisida yang tidak tepat. Penurunan kualitas tanah ini berdampak langsung pada kemampuan tanah dalam menyediakan unsur hara dan mempertahankan air, sehingga mengurangi hasil panen secara signifikan. Studi oleh (Nursyamsi, 2018) mengungkapkan bahwa inovasi teknologi pengelolaan lahan, seperti konservasi tanah dan pemupukan berimbang, sangat penting untuk menjaga kesuburan tanah dan meningkatkan produktivitas pertanian secara berkelanjutan.

Selain itu, lahan kering masam yang tersebar di berbagai wilayah Indonesia juga menghadirkan tantangan tersendiri dalam pengelolaan tanah. Lahan ini memiliki tingkat keasaman tinggi yang menghambat pertumbuhan tanaman dan penyerapan unsur hara. Penelitian yang dilakukan oleh (Irawan et al., 2015) menunjukkan bahwa pengembangan dan diseminasi inovasi teknologi pertanian, seperti penggunaan amelioran dan pupuk organik, mampu mengoptimalkan pengelolaan lahan kering masam sehingga produktivitasnya meningkat tanpa merusak lingkungan.

Air merupakan sumber daya yang sangat vital bagi pertanian, namun distribusi dan

ketersediaannya sering kali tidak merata dan tidak sesuai dengan kebutuhan tanaman. Sistem irigasi tradisional yang kurang efisien menyebabkan pemborosan air dan menimbulkan masalah seperti genangan air yang dapat merusak tanaman atau kekeringan yang menghambat pertumbuhan. Perubahan iklim juga menyebabkan ketidakpastian pola hujan, sehingga pengelolaan air harus lebih adaptif dan responsif terhadap kondisi lingkungan. Penelitian oleh (Antriyandati et al., 2023) menunjukkan bahwa penerapan teknologi irigasi tetes mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan produktivitas tanaman pada lahan kering, sekaligus mengurangi risiko kekeringan.

Selain itu, pengelolaan air yang efisien juga sangat dibutuhkan pada lahan rawa pasang surut dan lahan pertanian yang rentan terhadap fluktuasi ketersediaan air. Teknologi pengelolaan air yang terintegrasi dengan sistem informasi geografis (SIG) dan sensor berbasis Internet of Things (IoT) mulai diterapkan untuk memantau dan mengatur distribusi air secara real-time, sehingga penggunaan air dapat dioptimalkan dan pemborosan dapat diminimalkan. Konsep pertanian cerdas (smart farming) yang mengintegrasikan teknologi digital ini mulai berkembang di Indonesia dan dipandang sebagai solusi masa depan untuk meningkatkan efisiensi sumber daya dan produktivitas (Lestari, 2022).

Inovasi teknologi dalam pengelolaan tanah dan air merupakan solusi strategis untuk menghadapi berbagai permasalahan tersebut. Teknologi konservasi tanah seperti pembuatan teras, guludan, mulsa, dan penanaman penutup tanah dapat mencegah erosi dan memperbaiki struktur tanah sehingga meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air dan unsur hara. Selain itu, teknologi uji tanah modern memungkinkan petani mendapatkan data akurat mengenai kondisi fisik dan kimia tanah sehingga pemupukan dapat

dilakukan secara tepat dan efisien, mengurangi pemborosan pupuk dan dampak negatif terhadap lingkungan. Dalam pengelolaan air, teknologi irigasi berbasis IoT dan digitalisasi pengelolaan air memberikan kemudahan dalam pemantauan dan pengaturan distribusi air secara real-time. Sistem ini memungkinkan pengurangan pemborosan air hingga 30% dan meningkatkan efisiensi irigasi, sekaligus membantu petani mengantisipasi kondisi kekeringan atau kelebihan air. Teknologi ini sangat penting terutama pada lahan dengan ketersediaan air yang fluktuatif, seperti lahan kering dan lahan rawa pasang surut.

Selain berperan penting dalam meningkatkan produktivitas lahan, pengelolaan tanah dan air yang efektif juga berkontribusi besar terhadap ketahanan tanaman terhadap hama dan penyakit. Tanah yang sehat, kaya bahan organik, dan memiliki struktur yang baik akan mendukung pertumbuhan akar yang optimal serta meningkatkan aktivitas mikroorganisme menguntungkan yang mampu menekan populasi patogen. Sementara itu, pengelolaan air yang tepat dapat mencegah kondisi lingkungan yang mendukung perkembangan hama dan penyakit, seperti kelembapan berlebih yang sering menjadi pemicu infeksi jamur atau bakteri. Dengan demikian, inovasi teknologi dalam pengelolaan tanah dan air tidak hanya berdampak pada peningkatan hasil panen, tetapi juga menjadi bagian integral dari sistem proteksi tanaman yang berkelanjutan. Hal ini semakin menegaskan bahwa upaya perbaikan manajemen tanah dan air sangat penting untuk menciptakan ekosistem pertanian yang lebih sehat, produktif, dan tahan terhadap gangguan organisme pengganggu tanaman.

Penerapan inovasi teknologi tersebut telah terbukti meningkatkan produktivitas lahan secara signifikan, mengurangi pemborosan sumber daya, dan meningkatkan ketahanan pangan nasional. Selain itu, teknologi ini juga membantu petani

mengatasi tantangan perubahan iklim dan keterbatasan sumber daya air dan tanah. Kajian literatur yang komprehensif sangat diperlukan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai perkembangan teknologi, manfaat, serta tantangan implementasinya di lapangan. Tujuan Penelitian Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan kajian literatur terkait inovasi teknologi dalam pengelolaan tanah dan air yang dapat meningkatkan produktivitas lahan. Kajian ini akan mengidentifikasi berbagai teknologi yang telah diterapkan, manfaatnya, serta hambatan dalam penerapannya, sehingga dapat menjadi referensi bagi pengembangan teknologi pertanian yang lebih efektif dan berkelanjutan di masa depan.

Parameter Pengamatan

Dalam penelitian ini, parameter pengamatan ditentukan berdasarkan aspek-aspek penting yang berkaitan dengan pengelolaan tanah dan air dalam sistem pertanian. Parameter tersebut meliputi sifat fisik dan kimia tanah seperti struktur, tekstur, kandungan bahan organik, pH tanah, dan kapasitas tukar kation (KTK). Selain itu, pengamatan juga mencakup metode pengelolaan tanah baik secara organik maupun konvensional, teknik konservasi tanah dan air, serta efektivitas penggunaan pupuk organik dan anorganik. Setiap parameter ini dipilih karena memiliki pengaruh signifikan terhadap produktivitas lahan dan keberlanjutan sistem pertanian.

Analisis Penelitian

Analisis dalam penelitian ini dilakukan melalui pendekatan studi pustaka, yang bertujuan untuk mengevaluasi dan mengintegrasikan berbagai temuan ilmiah dari sumber-sumber yang kredibel dan relevan. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti untuk menjangkau beragam informasi dari banyak studi sebelumnya, sehingga dapat membandingkan dan menilai

efektivitas berbagai metode pengelolaan tanah dan air tanpa harus melakukan eksperimen langsung di lapangan. Teknik analisis yang digunakan bersifat deskriptif-kualitatif, di mana data yang dikumpulkan dianalisis dengan cara mengelompokkan, membandingkan, dan menafsirkan hasil-hasil penelitian berdasarkan kesamaan, perbedaan, serta kontribusinya terhadap topik yang dibahas. Proses analisis dimulai dengan mengidentifikasi literatur yang relevan, kemudian menyaring informasi berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Data yang terkumpul dari jurnal ilmiah, buku akademik, laporan penelitian, dan sumber tepercaya lainnya dikaji untuk mengetahui bagaimana berbagai sistem pengelolaan tanah dan air berdampak terhadap sifat tanah, efisiensi penggunaan air, serta hasil produksi pertanian. Dari hasil pengolahan informasi tersebut, peneliti berusaha menarik benang merah yang dapat digunakan untuk menyusun rekomendasi atau simpulan yang mendukung praktik pertanian yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Dengan demikian, analisis ini tidak hanya bersifat menyusun ulang informasi, tetapi juga bertujuan menghasilkan pemahaman baru berdasarkan integrasi pengetahuan yang telah ada.

Hasil dan Pembahasan

1) Inovasi Teknologi Pengelolaan Tanah

Teknologi uji tanah dan pemupukan berimbang merupakan tonggak utama dalam inovasi pengelolaan tanah modern yang bertujuan meningkatkan produktivitas lahan secara berkelanjutan. Uji tanah memungkinkan penilaian status kesuburan tanah secara akurat melalui analisis berbagai parameter kimia utama, seperti pH, kandungan unsur hara makro (N, P, K), unsur hara mikro, serta sifat fisik tanah. Dengan pendekatan ini, rekomendasi pemupukan dapat disesuaikan dengan kebutuhan aktual tanaman dan

kondisi tanah di setiap lokasi, sehingga input pupuk yang diberikan benar-benar tepat jenis, dosis, waktu, dan cara aplikasinya. Penelitian dan pengembangan perangkat uji tanah, baik manual maupun digital, telah banyak dilakukan di Indonesia. Balai Penelitian Tanah Kementerian Pertanian RI, misalnya, secara aktif mengembangkan dan mendiseminasikan perangkat uji tanah digital serta metode pengelolaan hara terpadu untuk berbagai sistem lahan, termasuk lahan sawah, lahan kering, dan lahan rawa (Balai Penelitian Tanah, 2019). Teknologi ini tidak hanya membantu petani dalam menentukan kebutuhan pupuk spesifik lokasi, tetapi juga mendorong penggunaan pupuk organik, anorganik, dan pembenah tanah secara terpadu untuk meningkatkan efisiensi serapan hara dan memperbaiki kualitas tanah. Hasil penelitian Balittanah menunjukkan bahwa penerapan inovasi pemupukan berimbang berbasis uji tanah dapat meningkatkan hasil panen padi, jagung, dan kedelai secara signifikan serta menjaga kesuburan tanah dalam jangka panjang.

Studi terbaru juga menyoroti pentingnya metode penilaian kesuburan tanah yang komprehensif. Penelitian oleh (Pulunggono, 2024) di Kalimantan Barat, misalnya, membandingkan tiga metode utama, yaitu Five Major Soil Chemical Properties (FMSCP), Basic Cation Saturation Ratio (BCSR), dan Sufficiency Level of Available Nutrients (SLAN), dalam menilai status kesuburan tanah pasir tropis. Hasilnya menunjukkan bahwa metode BCSR dan SLAN memberikan gambaran lebih detail tentang status hara tanah dan variasi antar lokasi, sehingga sangat bermanfaat untuk dasar rekomendasi pemupukan berimbang di lahan tropis Indonesia. Temuan ini menegaskan pentingnya inovasi dalam metode evaluasi kesuburan tanah agar rekomendasi pemupukan semakin presisi dan adaptif terhadap karakteristik

tanah lokal. Selain perangkat uji tanah dan metode penilaian modern, inovasi lain yang mendukung pemupukan berimbang adalah pengembangan peta status hara berbasis digital, perangkat lunak rekomendasi pemupukan, serta layanan klinik tanah yang mendekatkan akses analisis tanah kepada petani. Diseminasi teknologi ini juga didukung oleh pelatihan dan bimbingan teknis kepada petani, penyuluh, dan pemangku kepentingan pertanian.

Dengan penerapan uji tanah dan pemupukan berimbang, efisiensi serapan hara oleh tanaman meningkat, produktivitas lahan dapat dioptimalkan, dan dampak negatif terhadap lingkungan akibat akumulasi pupuk kimia dapat diminimalkan. Pemberian pupuk yang tepat tidak hanya meningkatkan pertumbuhan, tetapi juga memperkuat sistem imun tanaman, sehingga menurunkan insiden penyakit tular tanah.

Selanjutnya yaitu ameliorasi tanah yang merupakan inovasi teknologi penting dalam pengelolaan lahan yang bertujuan memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah agar lebih subur dan produktif, terutama pada lahan marginal seperti lahan berpasir, lahan rawa, lahan gambut, dan lahan salin. Proses ameliorasi dilakukan dengan penambahan bahan pembenah tanah (amelioran) yang dapat berupa tanah mineral, bahan organik, kapur, fosfat alam, biochar, atau limbah industri yang diformulasikan khusus untuk memperbaiki kondisi tanah setempat. Penambahan bahan ini berfungsi memperbaiki tekstur tanah, meningkatkan pH tanah yang asam, menetralkan senyawa toksik seperti aluminium dan besi berlebih, serta meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Salah satu pendekatan ameliorasi yang banyak diterapkan adalah penambahan tanah mineral pada lahan berpasir yang didominasi oleh partikel kasar sehingga teksturnya kurang ideal untuk pertumbuhan

tanaman. Penambahan tanah mineral ini bertujuan memperbaiki keseimbangan proporsi pasir, debu, dan liat sehingga tanah menjadi lebih mampu menahan air dan hara (Antara News, 2023). Selain itu, penambahan bahan organik dari limbah pertanian seperti jerami, abu sekam, kompos, dan pupuk kandang juga sangat efektif untuk meningkatkan kandungan karbon organik tanah, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam siklus hara (Susmawati, 2022). Penelitian lain oleh (Bonanomi et al., 2020) juga menegaskan bahwa pengelolaan tanah berbasis bahan organik dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap patogen melalui perbaikan struktur tanah dan peningkatan keragaman mikroba tanah.

Pada lahan rawa pasang surut, ameliorasi dengan kapur (kalsit dan dolomit) dan fosfat alam menjadi kunci untuk mengatasi masalah kemasaman tanah dan kekurangan hara fosfor. Pemberian kapur dapat menaikkan pH tanah, mengurangi toksisitas aluminium dan besi, serta meningkatkan ketersediaan kalsium dan magnesium yang penting bagi pertumbuhan tanaman. Penelitian menunjukkan bahwa dosis kapur 0,5-3 ton/ha mampu meningkatkan hasil padi, jagung, dan kedelai secara signifikan di lahan rawa. Selain itu, pemberian bahan organik secara rutin dapat mempertahankan kesuburan tanah dan mencegah degradasi lahan dalam jangka panjang. Tanah yang subur dan sehat tidak hanya penting untuk pertumbuhan tanaman, tetapi juga berperan dalam menekan perkembangan patogen dan hama. Penambahan bahan organik dan pengelolaan tanah yang baik dapat meningkatkan populasi mikroorganisme antagonis seperti *Trichoderma* spp. dan *Bacillus* spp., yang efektif dalam mengendalikan patogen penyebab penyakit tular tanah (Sartori et al., 2022). Penelitian menunjukkan bahwa aplikasi biochar dan kompos dapat

meningkatkan aktivitas mikroba tanah dan menurunkan insiden penyakit layu *Fusarium* pada tanaman tomat.

Inovasi lain yang sedang berkembang adalah penggunaan biochar dan bahan organik alternatif berbasis limbah industri, seperti sludge pulp dan kertas atau limbah kelapa muda, yang melalui proses pirolisis menghasilkan bahan pembenah tanah yang ekonomis dan ramah lingkungan. Biochar memiliki kemampuan tinggi dalam mengadsorpsi logam berat dan pestisida, sehingga membantu remediasi tanah tercemar sekaligus meningkatkan kapasitas tukar kation dan retensi air tanah (Herviyanti et al., 2023). Pada lahan gambut yang memiliki kendala tinggi berupa kemasaman, rendahnya unsur hara makro dan mikro, serta tata air yang buruk, ameliorasi dengan pemberian pembenah tanah dari limbah industri juga terbukti efektif. Penambahan dregs (limbah padat industri) dapat memenuhi kekurangan unsur mikro seperti tembaga dan seng yang esensial bagi tanaman, sekaligus memperbaiki sifat fisik tanah gambut sehingga lebih produktif untuk pertanian (Marlina et al., 2017).

Ameliorasi juga sangat penting untuk mengatasi masalah salinitas tanah yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan menurunkan hasil panen. Penelitian pada tanah salin menunjukkan bahwa pemberian amelioran dapat menurunkan tingkat salinitas dan memperbaiki kondisi tanah sehingga tanaman seperti kacang hijau dapat tumbuh lebih optimal (Wahyuningsih et al., 2017). Secara global, negara-negara dengan lahan berpasir dan kering seperti Israel, Australia, dan Uni Emirat Arab telah sukses menerapkan berbagai teknologi ameliorasi tanah yang dikombinasikan dengan pengelolaan air canggih dan penggunaan varietas tanaman adaptif. Pendekatan ini berhasil mengubah lahan tandus

menjadi lahan subur yang produktif dan berkelanjutan (Taufiq, 2024).

Lalu ada juga pertanian presisi (precision agriculture) yang merupakan sistem pengelolaan lahan berbasis data yang memanfaatkan teknologi digital untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya (air, pupuk, pestisida) sesuai kebutuhan spesifik lokasi. Konsep ini bertujuan meningkatkan produktivitas lahan, mengurangi limbah pertanian, dan meminimalkan dampak lingkungan. Pertanian presisi mencakup seluruh rantai agribisnis, mulai dari produksi hingga distribusi, dengan prinsip low input, high efficiency, dan keberlanjutan.

a) Teknologi Pendukung

- Sensor dan IoT Sensor tanah dan tanaman berbasis IoT (Internet of Things) memantau parameter seperti kelembaban tanah, pH, suhu, dan nutrisi secara real-time. Data ini diintegrasikan dengan sistem analisis untuk membuat rekomendasi pemupukan dan irigasi yang presisi. Contoh: sensor multispektral pada drone yang mendeteksi stres tanaman akibat kekurangan hara atau serangan hama (Judijanto et al., 2024).
- Sistem Informasi Geografis (SIG) Pemetaan digital lahan menggunakan SIG membantu mengidentifikasi variasi kesuburan tanah di dalam satu petak lahan. Petani dapat membagi lahan menjadi zona-zona pengelolaan (management zones) untuk memberikan input sesuai kebutuhan (Tulungen, 2024).
- Drone dan Robotika Drone digunakan untuk pemantauan lahan skala luas, penyemprotan pestisida, dan penanaman benih. Di Indonesia, penggunaan drone dalam budidaya

padi mampu meningkatkan efisiensi pemupukan hingga 25% dan mengurangi penggunaan air hingga 20%.

- Kecerdasan buatan (AI) dan machine learning menganalisis data historis dan prediksi cuaca untuk memberikan rekomendasi penanaman, irigasi, dan panen. Contoh: model prediksi hasil panen jagung dengan akurasi 90% menggunakan data satelit dan sensor lapangan.

b) Studi Kasus dan Dampak

- Peningkatan produktivitas padi di Jawa Tengah Penerapan pertanian presisi di Kabupaten Grobogan (Jawa Tengah) meningkatkan hasil panen padi dari 5,2 ton/ha menjadi 6,8 ton/ha (30%) melalui penggunaan sensor kelembaban tanah dan irigasi otomatis. Penggunaan pupuk juga berkurang 15% tanpa mengurangi kualitas hasil.
- Pengurangan biaya produksi jagung Di Lampung, integrasi drone dan AI untuk pemupukan presisi mengurangi biaya pupuk sebesar Rp 1,2 juta/hektar dan meningkatkan hasil panen jagung hibrida dari 7 ton/ha menjadi 9 ton/ha (Saputri Mendrofa et al., 2024).

c) Dampak Lingkungan dan Ekonomi

- Penggunaan air irigasi berkurang 20–30% melalui sistem irigasi tetes berbasis sensor.
- Optimasi pupuk mengurangi emisi N₂O (gas rumah kaca) hingga 18%.
- Di Subang, petani bawang merah meningkatkan keuntungan bersih Rp 12 juta/hektar berkat penggunaan drone untuk pemantauan hama.

d) Tantangan Implementasi

- Keterbatasan jaringan internet di daerah terpencil menghambat penggunaan teknologi IoT.
- Harga drone dan sensor masih relatif mahal bagi petani kecil (Rp 15–50 juta/unit).
- Hanya 12% petani Indonesia yang terlatih menggunakan perangkat digital.

2) Inovasi Teknologi Pengelolaan Air

Pengelolaan air merupakan salah satu aspek krusial dalam meningkatkan produktivitas pertanian, terutama di tengah tantangan perubahan iklim dan keterbatasan sumber daya air. Teknologi irigasi berbasis Internet of Things (IoT) telah muncul sebagai solusi inovatif yang memungkinkan pengelolaan air secara lebih efisien, tepat waktu, dan berbasis data real-time. Sistem irigasi IoT mengintegrasikan sensor kelembaban tanah, sensor suhu, sensor curah hujan, serta aktuator yang mengatur aliran air secara otomatis berdasarkan data yang dikumpulkan. Sensor-sensor ini terhubung melalui jaringan internet dan dikendalikan oleh mikrokontroler yang dapat diprogram untuk menyesuaikan kebutuhan irigasi sesuai kondisi tanaman dan lingkungan secara dinamis.

Salah satu keunggulan utama teknologi ini adalah kemampuannya untuk mengurangi pemborosan air yang sering terjadi pada sistem irigasi konvensional. Dengan sistem irigasi berbasis IoT, air hanya dialirkan ketika tanah benar-benar membutuhkan, sehingga efisiensi penggunaan air dapat meningkat hingga 30% atau lebih. Selain itu, teknologi ini juga memungkinkan penghematan tenaga kerja karena proses irigasi dapat dikontrol secara otomatis dan jarak jauh melalui aplikasi mobile atau platform web. Hal ini sangat membantu petani, terutama di daerah

terpencil, untuk mengelola irigasi tanpa harus selalu hadir di lapangan.

Penelitian oleh (Wahyudi et al., 2025) mengembangkan sistem irigasi otomatis berbasis mikrokontroler ESP32 yang mampu mengatur siklus penyiraman dengan presisi tinggi. Sistem ini tidak hanya menghemat air, tetapi juga mengoptimalkan pertumbuhan tanaman dengan menjaga kelembaban tanah pada level ideal. Studi lapangan di Wonosobo, Jawa Tengah, menunjukkan bahwa penerapan sistem irigasi berbasis IoT meningkatkan produktivitas tanaman padi hingga 15-20% dibandingkan metode irigasi manual, sekaligus mengurangi penggunaan air secara signifikan. Selain efisiensi air, teknologi ini juga mendukung keberlanjutan pertanian dengan mengurangi dampak negatif lingkungan akibat penggunaan air yang berlebihan, seperti erosi dan pencucian hara. Dengan data yang dikumpulkan secara real-time, petani dan pengelola lahan dapat melakukan pemantauan kondisi lahan secara kontinu, mengidentifikasi masalah lebih awal, dan mengambil tindakan korektif dengan cepat. Beberapa sistem irigasi IoT juga dilengkapi dengan fitur peringatan dini jika terjadi gangguan teknis atau kondisi lingkungan ekstrem, sehingga risiko gagal panen dapat diminimalkan. Implementasi irigasi berbasis IoT juga membuka peluang integrasi dengan teknologi lain seperti pertanian presisi dan big data analytics. Data irigasi yang terkumpul dapat dianalisis untuk mengembangkan model prediksi kebutuhan air yang lebih akurat, menyesuaikan dengan pola cuaca dan siklus pertumbuhan tanaman. Hal ini memungkinkan pengelolaan sumber daya air yang lebih adaptif dan responsif terhadap perubahan iklim, yang menjadi tantangan utama bagi sektor pertanian di Indonesia dan dunia.

Namun, penerapan teknologi irigasi berbasis IoT juga menghadapi beberapa tantangan, terutama

terkait infrastruktur digital dan biaya investasi awal. Di beberapa daerah terpencil, keterbatasan jaringan internet dan listrik menjadi kendala utama dalam mengoperasikan sistem ini secara optimal. Selain itu, harga perangkat sensor dan aktuator masih relatif mahal bagi petani kecil, sehingga perlu adanya dukungan dari pemerintah dan lembaga terkait melalui program subsidi, pelatihan, dan pendampingan teknis. Literasi teknologi juga menjadi faktor penting agar petani dapat memahami dan memanfaatkan teknologi ini secara maksimal. Untuk mengatasi tantangan tersebut, beberapa lembaga penelitian dan startup agritech di Indonesia mulai mengembangkan solusi irigasi berbasis IoT yang lebih terjangkau dan mudah digunakan. Contohnya adalah pengembangan sistem irigasi otomatis dengan sensor kelembaban tanah yang dapat dipasang secara modular dan dikendalikan melalui aplikasi smartphone dengan antarmuka sederhana. Program pelatihan dan pendampingan juga digalakkan untuk meningkatkan kemampuan petani dalam mengoperasikan teknologi ini.

Selanjutnya ada pengelolaan air pada lahan rawa yang merupakan aspek krusial yang menentukan keberhasilan usaha tani di ekosistem rawa, yang memiliki karakteristik unik seperti fluktuasi muka air yang tinggi dan kondisi tanah yang cenderung tergenang. Teknologi pengelolaan air di lahan rawa bertujuan untuk menjaga keseimbangan kadar air yang optimal bagi pertumbuhan tanaman sekaligus mencegah kerusakan struktur tanah dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Salah satu teknologi utama yang diterapkan adalah sistem tata air satu arah dan tabat konservasi (Sistak) yang dilengkapi dengan stoplog, berfungsi mengatur aliran air masuk dan keluar secara terkontrol sehingga dapat menjaga muka air tanah pada tingkat yang sesuai kebutuhan tanaman (Maftu'ah et al., 2016). Sistem ini juga

membantu pengawetan tanah dan pencucian unsur racun seperti aluminium, besi, dan hidrogen sulfida yang berpotensi meracuni tanaman. Selain itu, pengelolaan mikrohidrologi melalui kanal-kanal terkontrol sangat penting untuk mempertahankan keseimbangan kadar air di lahan rawa. Teknologi ini meminimalkan risiko over-drainage yang dapat merusak struktur tanah dan memicu pelepasan karbon ke atmosfer, sekaligus mendukung produktivitas pertanian yang berkelanjutan (Susilawati et al., 2017). Di lahan rawa pasang surut, pengaturan tata air mikro dengan pola aliran satu arah terbukti meningkatkan hasil panen padi dibandingkan sistem aliran dua arah, karena dapat mengoptimalkan distribusi air dan mengurangi genangan berlebih yang merugikan tanaman (P2MAL, 2022).

Pemanfaatan kalender tanam (katam) juga menjadi inovasi penting dalam pengelolaan lahan rawa untuk menyesuaikan pola tanam dengan fluktuasi iklim dan muka air. Dengan informasi kalender tanam yang akurat, petani dapat menentukan waktu tanam yang tepat guna mengurangi risiko gagal panen akibat banjir atau kekeringan (Maftu'ah et al., 2016). Varietas unggul padi rendah emisi gas rumah kaca yang dikembangkan khusus untuk lahan rawa juga mendukung peningkatan hasil dan keberlanjutan lingkungan.

Konsep smart farming di lahan rawa mulai diperkenalkan dengan penerapan teknologi sensor dan IoT untuk memantau tinggi muka air dan kondisi lahan secara real-time. Sistem ini memungkinkan pengelolaan air yang adaptif dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan, sekaligus meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem rawa. Namun, penerimaan teknologi ini masih menghadapi tantangan karena sebagian petani lebih memilih metode tradisional dan keterbatasan akses teknologi. Penggunaan

teknologi irigasi presisi seperti sistem irigasi tetes yang dimodifikasi untuk lahan rawa juga telah terbukti mampu mengurangi kebutuhan air hingga 30% dibandingkan metode konvensional, sekaligus mengurangi genangan yang merusak tanaman (Murjani, 2025). Selain itu, aplikasi biochar sebagai bahan ameliorasi meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air dan nutrisi, serta berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim dengan menyerap karbon.

Pengelolaan air yang terintegrasi dengan rehabilitasi ekosistem, seperti pemulihan vegetasi mangrove dan tumbuhan rawa asli, juga menjadi strategi penting untuk mengurangi risiko erosi dan banjir serta meningkatkan cadangan karbon alami. Pemberdayaan masyarakat lokal melalui pelatihan dan edukasi berkelanjutan juga menjadi kunci keberhasilan pengelolaan lahan rawa yang berkelanjutan.

Lalu ada juga digitalisasi pengelolaan air pertanian yang merupakan inovasi mutakhir yang mengintegrasikan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) untuk meningkatkan efisiensi, ketepatan, dan keberlanjutan penggunaan sumber daya air. Sistem informasi air berbasis digital memungkinkan pemantauan kondisi air secara real-time, analisis data yang cepat, serta pengambilan keputusan yang lebih tepat dan adaptif terhadap perubahan lingkungan dan kebutuhan tanaman. Teknologi ini umumnya memanfaatkan sensor cerdas, Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan (AI), serta aplikasi berbasis cloud dan mobile untuk mengelola dan mengoptimalkan distribusi air irigasi.

Sistem irigasi cerdas (smart irrigation system) adalah salah satu contoh penerapan digitalisasi dalam pengelolaan air. Sistem ini menggunakan sensor kelembaban tanah, suhu, dan curah hujan yang terhubung ke platform digital untuk mengumpulkan data secara kontinu. Data tersebut

kemudian dianalisis menggunakan algoritma AI untuk menentukan waktu, durasi, dan volume irigasi yang optimal. Air disalurkan secara otomatis melalui pompa dan saluran irigasi tanpa campur tangan manual, sehingga mengurangi pemborosan air dan meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 30-50%. Selain itu, petani dapat memantau dan mengendalikan sistem irigasi dari jarak jauh melalui aplikasi smartphone, memberikan kemudahan dan fleksibilitas dalam pengelolaan lahan (P2DPT, 2024).

Selain efisiensi penggunaan air, digitalisasi juga mempercepat pengumpulan dan pengolahan data penting seperti kondisi jaringan irigasi, kapasitas saluran, dan kebutuhan rehabilitasi. Contohnya adalah aplikasi E-Paksi yang digunakan di Kabupaten Barito Timur untuk memetakan, memonitor, dan menganalisis kondisi jaringan irigasi secara real-time. Dengan data yang akurat dan dapat diakses kapan saja, pengelolaan irigasi menjadi lebih transparan dan terkoordinasi antar berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah daerah, petani, dan operator jaringan irigasi. Hal ini mendukung perencanaan pembangunan, pemeliharaan, dan rehabilitasi jaringan irigasi yang lebih efektif serta meningkatkan ketahanan pangan lokal (Barito Timur, 2024).

Digitalisasi juga memungkinkan integrasi data dari berbagai sumber seperti sensor lapangan, citra satelit, dan prakiraan cuaca untuk perencanaan irigasi yang adaptif terhadap perubahan iklim. Dengan sistem informasi geografis (SIG) dan big data analytics, pengelolaan air dapat dilakukan secara spasial dan temporal, menyesuaikan kebutuhan air tanaman di berbagai zona lahan. Pendekatan ini tidak hanya menghemat air, tetapi juga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan seperti erosi dan pencemaran air.

Selain itu, teknologi digital mendukung pemberdayaan petani melalui akses informasi real-time mengenai kondisi cuaca, harga pasar, dan peringatan dini hama atau penyakit tanaman. Hal ini memungkinkan petani membuat keputusan yang lebih cepat dan tepat dalam pengelolaan air dan sumber daya lainnya, sehingga produktivitas dan pendapatan petani meningkat.

Optimalisasi pengelolaan air berbasis IoT juga melibatkan penggunaan alat seperti Weather Station dan Water Level Sensor yang memantau ketinggian air dan kondisi lingkungan secara terus-menerus. Data yang terkumpul dikirim ke platform cloud untuk dianalisis dan digunakan dalam pengaturan irigasi otomatis. Jika sensor mendeteksi bahwa ketinggian air sudah mencukupi, sistem irigasi akan berhenti secara otomatis, menghemat air dan energi. Sebaliknya, jika air berkurang, irigasi akan dinyalakan kembali sesuai kebutuhan tanaman (Taniin.id, 2024).

3) Integrasi Pengelolaan dan Dampaknya

Isi Integrasi teknologi dalam pengelolaan tanah dan air merupakan kunci utama untuk mencapai pertanian yang efisien, produktif, dan berkelanjutan. Pendekatan ini memadukan berbagai inovasi seperti sensor tanah cerdas, sistem irigasi berbasis IoT, drone untuk pemantauan lahan, serta kecerdasan buatan (AI) untuk analisis data dan pengambilan keputusan. Dengan mengintegrasikan teknologi sensor untuk pemantauan irigasi, petani dapat memperoleh data real-time tentang kelembaban tanah, curah hujan, suhu, dan kebutuhan nutrisi tanaman. Data ini memungkinkan pengelolaan air dan pemupukan dilakukan secara presisi, sehingga penggunaan sumber daya menjadi lebih efisien dan hasil panen meningkat (Kuripan Kidul, 2025).

Praktik integrasi pengelolaan tanah dan air juga meliputi penerapan integrated soil and water

management (ISWM), yaitu kombinasi praktik pengelolaan tanah dan air yang bertujuan memaksimalkan manfaat ekonomi dan sosial, sekaligus menjaga fungsi ekologi lahan (Semalulu et al., 2015). ISWM mencakup teknik seperti pemupukan berimbang, penggunaan bahan organik, pengendalian erosi, pengelolaan air hujan, serta irigasi dan drainase yang terintegrasi. Studi di berbagai negara menunjukkan bahwa ISWM meningkatkan produktivitas lahan, memperbaiki retensi air tanah, dan memperkuat ketahanan petani terhadap perubahan iklim (Xing et al., 2024). Selain itu, pengelolaan air yang optimal, seperti penerapan irigasi tetes dan pengaturan drainase, terbukti dapat mengurangi kelembapan berlebih di sekitar perakaran tanaman. Kondisi ini penting untuk menekan perkembangan penyakit jamur dan bakteri. Studi oleh (Wang et al., 2022) melaporkan bahwa sistem irigasi tetes pada tanaman tomat mampu menurunkan tingkat serangan penyakit akar dan meningkatkan hasil panen secara signifikan.

Integrasi teknologi sensor, IoT, dan AI terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan air dan pupuk, mengurangi pemborosan, serta meningkatkan hasil panen. Sistem irigasi berbasis sensor dan IoT dapat mengurangi pemborosan air hingga 30%, sedangkan teknologi pertanian presisi mampu meningkatkan hasil panen hingga 25% pada berbagai komoditas (Kuripan Kidul, 2025). Penggunaan *integrated water-fertilizer technology* memungkinkan pemberian air dan pupuk secara simultan dan presisi, sehingga meningkatkan efisiensi serapan hara, mengurangi pencemaran lingkungan, dan meningkatkan kualitas hasil pertanian. Studi meta-analisis menunjukkan bahwa kombinasi pupuk organik dan anorganik serta pengelolaan air yang tepat dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah hingga 55% dan hasil jagung hingga 220% (Xing et al., 2024).

Selain itu penambahan bahan organik juga meningkatkan populasi mikroba menguntungkan seperti *Trichoderma* dan *Bacillus*, yang dapat menekan patogen penyebab penyakit akar.

Dampak ekonomi dari integrasi teknologi juga signifikan. Penghematan air dan energi menurunkan biaya operasional petani, sementara hasil panen yang meningkat berkontribusi pada peningkatan pendapatan. Selain itu, teknologi sensor dan sistem peringatan dini membantu petani mengantisipasi cuaca ekstrem dan mencegah kerugian akibat gagal panen.

Studi di Desa Kuripan Kidul menunjukkan bahwa integrasi teknologi sensor pada sistem irigasi meningkatkan produktivitas pertanian, menghemat air, dan menurunkan biaya energi. Petani dapat memantau dan mengendalikan irigasi dari jarak jauh, sehingga waktu dan tenaga lebih efisien. Selain itu, sistem ini membantu mencegah pemborosan air dan melindungi sumber daya air tawar dari intrusi air asin, mendukung keberlanjutan lingkungan (Kuripan Kidul, 2025).

Penelitian internasional tentang *integrated soil and water management (ISWM)* di Uganda menunjukkan bahwa praktik seperti mulsa, minimum tillage, dan pemanenan air hujan meningkatkan profitabilitas lahan hingga 200% untuk tanaman pisang, kopi, dan kacang-kacangan. Adopsi teknologi ISWM juga terbukti memperkuat ketahanan petani terhadap perubahan iklim dan memperbaiki kesehatan tanah secara jangka panjang. Studi lain menegaskan bahwa penggunaan *integrated water-fertilizer technology* berbasis sensor dan *big data analytics* meningkatkan hasil panen, efisiensi penggunaan air dan pupuk, serta mengurangi polusi pertanian secara signifikan.

Kesimpulan

Inovasi teknologi dalam pengelolaan tanah dan air terbukti menjadi faktor kunci dalam

meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan pertanian di era modern. Penerapan teknologi uji tanah dan pemupukan berimbang memungkinkan penggunaan pupuk yang lebih efisien dan spesifik lokasi, sehingga meningkatkan hasil panen sekaligus menjaga kesuburan tanah. Ameliorasi tanah dengan berbagai bahan pembenah, baik organik maupun anorganik, telah berhasil memperbaiki struktur, kimia, dan biologi tanah pada lahan marginal, rawa, dan gambut, sehingga lahan-lahan suboptimal pun dapat dimanfaatkan secara produktif. Pengembangan pertanian presisi yang mengintegrasikan sensor, drone, sistem informasi geografis, dan kecerdasan buatan telah membawa efisiensi dalam penggunaan input pertanian, meminimalkan pemborosan sumber daya, serta mengoptimalkan hasil pertanian. Di sisi lain, inovasi dalam pengelolaan air—seperti irigasi berbasis IoT, pengelolaan air di lahan rawa, serta digitalisasi dan sistem informasi air—telah meningkatkan efisiensi penggunaan air, mengurangi risiko gagal panen akibat kekeringan atau kelebihan air, dan mendukung adaptasi terhadap perubahan iklim.

Integrasi berbagai teknologi tersebut dalam pengelolaan tanah dan air memberikan dampak positif yang nyata terhadap produktivitas lahan, efisiensi biaya, dan kelestarian lingkungan. Studi-studi kasus dan penelitian menunjukkan bahwa adopsi inovasi ini mampu meningkatkan hasil panen, mengurangi input berlebih, serta memperkuat ketahanan pangan dan pendapatan petani. Namun, agar manfaat teknologi ini dapat dirasakan secara luas, diperlukan dukungan infrastruktur digital, peningkatan literasi teknologi petani, serta kolaborasi antara pemerintah, peneliti, dan pelaku usaha pertanian.

Inovasi teknologi pengelolaan tanah dan air tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga berperan penting dalam memperkuat

ketahanan tanaman terhadap hama dan penyakit. Oleh karena itu, keberhasilan inovasi ini harus diukur dari kontribusinya terhadap sistem proteksi tanaman yang berkelanjutan.

Dengan demikian, inovasi teknologi pengelolaan tanah dan air merupakan fondasi penting bagi pertanian masa depan yang produktif, efisien, dan berkelanjutan. Upaya pengembangan, diseminasi, dan integrasi teknologi harus terus ditingkatkan agar pertanian Indonesia mampu menghadapi tantangan global dan tetap menjadi penopang utama ketahanan pangan nasional.

Daftar Pustaka

- Antara News. (2023). *Inovasi dan teknologi untuk tingkatkan kesuburan lahan agar bisa produktif*. Megapolitan.AntaraneWS.Com. <https://megapolitan.antaraneWS.com/berita/272310/inovasi-dan-teknologi-untuk-tingkatkan-kesuburan-lahan-agar-bisa-produktif>
- Balai Penelitian Tanah. (2019). *Laporan Tahunan 2019: Teknologi Pengelolaan Tanah Dan Pupuk*.
- Barito Timur. (2024). *Inovasi Digital Barito Timur Tingkatkan Pengelolaan Irigasi dan Ketahanan Pangan*. MediCenter.Baritotimurkab.Go.Id. <https://mediacenter.baritotimurkab.go.id/e-paksi-inovasi-digital-barito-timur-tingkatkan-pengelolaan-irigasi-dan-ketahanan-pangan/>
- Bonanomi, G., Alioto, D., Minutolo, M., Marra, R., Cesarano, G. & Vinale, F. (2020). Organic Amendments Modulate Soil Microbiota and Reduce Virus Disease Incidence in the TSWV-Tomato Pathosystem. *Pathogens*, 9(5), 379. <https://doi.org/10.3390/pathogens9050379>
- Herviyanti, Harianti, M., Dwipa, I., Maulana, A. & Razi, F. (2023). *Teknologi Ameliorasi*

- Berbasis Batubara Sub-Bituminus dan Biochar Limbah Kelapa Muda terhadap Tanah Bekas Tambang Emas Tercemar Merkuri di Kabupaten Dharmasraya.*
 Judijanto, L., Wahyuni, I. & Suryandari, R. Y. (2024). Precision Agriculture Technology Innovation in Supporting Food Security in the Era of Industrial Revolution 4.0. *West Science Nature and Technology*, 2(04), 199–206.
- Kuripan Kidul. (2025). *Transformasi Irigasi Desa: Integrasi Teknologi Sensor untuk Pemantauan dan Pengelolaan Efektif.* Kuripankidul.Desa.Id.
<https://kuripankidul.desa.id/transformasi-irigasi-des-integrasi-teknologi-sensor-untuk-pemantauan-dan-pengelolaan-efektif/>
- Maftu'ah, E., Annisa, W. & Noor, M. (2016). Teknologi Pengelolaan Lahan Rawa untuk Tanaman Pangan dan Hortikultura dalam Konteks Adaptasi Terhadap Perubahan Iklim. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 10(2), 103–114.
- Marlina, Nelvia & Armaini. (2017). Ameliorasi Tanah Gambut dengan Berbagai Limbah Industri terhadap Pertumbuhan dan Hasil Dua Varietas Jagung. *Jurnal Agroteknologi*, 7(2), 21–28.
- Murjani. (2025). Pengelolaan Lahan Rawa untuk Pertanian Berkelanjutan di Tengah Tantangan Perubahan Iklim Global Murjani. *Journal Scientific of Mandalika (Jsm)*, 6(4), 799–807.
<http://ojs.cahayamandalika.com/index.php/jomla>
- P2DPT. (2024). *Penerapan Sistem Irigasi Cerdas dengan Teknologi Digital.* P2dpt.Uma.Ac.Id.
<https://p2dpt.uma.ac.id/2024/12/03/penerapan-sistem-irigasi-cerdas-dengan-teknologi-digital/>
- P2MAL. (2022). *Teknologi Tata Kelola Air Mikro di Lahan Rawa.* P2mal.Uma.Ac.Id.
<https://p2mal.uma.ac.id/2022/03/14/teknologi-tata-kelola-air-micro-di-lahan-rawa/>
- Pulunggono, H. B. (2024). Comparative Analysis of Soil Fertility in Sandy Soils along a Toposequence Transect in Sandai, West Kalimantan. *CELEBES Agricultural*, 5(1), 1–24. <https://doi.org/10.52045/jca.v5i1.779>
- Saputri Mendrofa, J., Zandrato, M. W., Halawa, N., Zalukhu, E. E. & Lase, N. K. (2024). Peran Teknologi dalam Meningkatkan Efisiensi Pertanian. *Tumbuhan: Publikasi Ilmu Sosiologi Pertanian Dan Ilmu Kehutanan*, 1(3), 01–12.
<https://doi.org/https://doi.org/10.62951/tumbuhan.v1i3.1111> Availableonlineat:<https://journal.asritani.or.id/index.php/Tumbuhan>
- Sartori, F., Nesci, A. & Etcheverry, M. (2022). Biochar and Compost Amendments Enhance Soil Microbial Communities and Suppress Fusarium Wilt in Tomato. *Frontiers in Microbiology*, 13.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2022.854273/full>
- Semalulu, O., Kaizzi, K. C., Komutunga, E., Mubiru, D. & Magunda, M. (2015). Conserving soils: Water-smart agriculture through integrated soil and water management: The Uganda experience. *National Agriculture Research Organization Kawanda*.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fufs.2024.1494819/full>
- Susilawati, A., Wahyudi, E. & Minsyah, N. (2017). Pengembangan Teknologi untuk Pengelolaan Lahan Rawa Pasang Surut Berkelanjutan. *Jurnal Lahan Suboptimal: Journal of Suboptimal Lands*, 6(1), 87–94.
www.jlsuboptimal.unsri.ac.id
- Susmawati. (2022). *Ameliorasi Dan Pemupukan*

- Pelatihan Tematik Bagi Non Aparatur (Pemeliharaan Padi Lahan Pasang Surut)* (pp. 0–41).
- Taniin.id. (2024). *Optimalisasi Pengelolaan Air Pertanian Berbasis IoT*. Taniin.Id. <https://taniin.id/optimalisasi-pengelolaan-air-pertanian-berbasis-iot/>
- Taufiq, M. (2024). *Membangkitkan Harapan Petani: Inovasi Teknologi Pertanian di Tanah Berpasir*. Kumparan.Com. <https://kumparan.com/muhammad-taufiq-1724484767677579581/membangkitkan-harapan-petani-inovasi-teknologi-pertanian-di-tanah-berpasir-23PMEZswllb/1>
- Tulungen, F. R. (2024). Teknologi Pertanian Presisi untuk Meningkatkan Efisiensi Produksi Padi di Indonesia. *Jurnal Cahaya Mandalika*, 5(1), 720–727. <http://ojs.cahayamandalika.com/index.php/JCM>
- Wahyudi, Pradana, A. I. & Permatasari, H. (2025). Implementasi Sistem Irigasi Otomatis Berbasis IoT untuk Pertanian Greenhouse. *Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Indonesia*, 5(2), 435–446. <https://doi.org/10.52436/1.jpti.656>
- Wahyuningsih, S., Kristiono, A. & Taufiq, A. (2017). Pengaruh Jenis Amelioran terhadap Pertumbuhan dan Hasil Kacang Hijau di Tanah Salin. *Buletin Palawija*, 15(2), 69–77.
- Wang, J., Du, Y., Niu, W., Han, J., Li, Y. & Yang, P. (2022). Drip irrigation mode affects tomato yield by regulating root–soil–microbe interactions. *Agricultural Water Management*, 260, 107188. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107188>
- Xing, Y., Zhang, X. & Wang, X. (2024). Enhancing soil health and crop yields through water-fertilizer coupling technology. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8(November), 1–23. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1494819>