



Analisis Peran Teknologi IoT dalam Praktik Regeneratif Soil Management: Studi Kualitatif atas Best Practices Global

Aryanti ^{1*}, Raditya Ahnaf Fauzan ², Siti Wahidatul Atsna ³, Chairunnissa Putri ⁴,
Tazkia Nurul ⁵, Yeni Budiawati ⁶

¹⁻⁶ Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Alamat: Jl. Raya Jkt Km 4 Jl. Pakupatan, Panancangan, Kec. Cipocok Jaya, Kota Serang, Banten, 42124

Corresponding Author: 4441220134@untirta.ac.id

Abstract. *This qualitative study analyzes the role of Internet of Things (IoT) technology in regenerative soil management practices, focusing on global best practices that can be replicated in Indonesia. As a vital resource, soil plays a crucial role in supporting agricultural productivity and food security, yet it faces significant threats from degradation due to unsustainable agricultural practices and chemical overuse. The study emphasizes the importance of integrating IoT technology to monitor and manage soil conditions in real-time, enhancing decision-making for sustainable agriculture. Key questions addressed include how IoT supports regenerative practices, examples of successful global implementations, and the effectiveness of IoT in improving soil quality and organic carbon content. Findings highlight that IoT can significantly enhance soil health by enabling precise monitoring of key parameters such as moisture, pH, and temperature, thereby facilitating timely interventions. The research also explores the challenges and opportunities associated with IoT adoption in regenerative agriculture, particularly in developing countries. Ultimately, the integration of IoT in regenerative soil management presents a promising pathway to achieving sustainable agricultural practices that meet the growing global food demands while restoring ecosystem health.*

Keywords: *IoT, Soil, Regenerative, Agriculture, Sustainability*

Abstrak. Studi kualitatif ini menganalisis peran teknologi Internet of Things (IoT) dalam praktik pengelolaan tanah regeneratif, dengan fokus pada praktik terbaik global yang dapat diterapkan di Indonesia. Sebagai sumber daya vital, tanah memainkan peran krusial dalam mendukung produktivitas pertanian dan ketahanan pangan, namun menghadapi ancaman serius akibat degradasi akibat praktik pertanian yang tidak berkelanjutan dan penggunaan bahan kimia yang berlebihan. Studi ini menekankan pentingnya mengintegrasikan teknologi IoT untuk memantau dan mengelola kondisi tanah secara real-time, sehingga meningkatkan pengambilan keputusan untuk pertanian berkelanjutan. Pertanyaan kunci yang dibahas meliputi bagaimana IoT mendukung praktik regeneratif, contoh implementasi global yang sukses, dan efektivitas IoT dalam meningkatkan kualitas tanah dan kandungan karbon organik. Temuan menyoroti bahwa IoT dapat secara signifikan meningkatkan kesehatan tanah dengan memfasilitasi pemantauan presisi parameter kunci seperti kelembaban, pH, dan suhu, sehingga memudahkan intervensi tepat waktu. Penelitian ini juga mengeksplorasi tantangan dan peluang terkait adopsi IoT dalam pertanian regeneratif, terutama di negara-negara berkembang. Pada akhirnya, integrasi IoT dalam pengelolaan tanah regeneratif menawarkan jalur yang menjanjikan untuk mencapai praktik pertanian berkelanjutan yang memenuhi permintaan pangan global yang terus meningkat sambil memulihkan kesehatan ekosistem.

Kata Kunci: IoT, Tanah, Regeneratif, Pertanian, Keberlanjutan

1. LATAR BELAKANG

Tanah merupakan sumber daya alam yang sangat vital bagi keberlangsungan hidup di seluruh dunia. Tanah adalah bagian penting dari lahan yang memiliki peran krusial dalam mendukung pertumbuhan dan hasil tanaman. Selain menjadi media tempat tumbuhnya tanaman, tanah juga berfungsi untuk menahan serta menyediakan air, sekaligus menjadi sumber unsur hara yang dibutuhkan tanaman dalam proses pertumbuhannya (Mautuka et

al., 2022). Tanah yang sehat akan mendukung produksi pangan global yang menjadi dasar bagi ketahanan pangan dan perekonomian dunia.

Namun, seiring dengan perkembangan populasi dunia yang diikuti oleh peningkatan kebutuhan akan lahan untuk pertanian, pemukiman, dan industri untuk mendukung kebutuhan hidup manusia. Tanah kini menghadapi ancaman degradasi yang serius. Praktik pertanian yang tidak berkelanjutan, konservasi lahan serta penggunaan bahan kimia yang berlebihan telah merusak kualitas tanah di berbagai belahan dunia. Degradasi tanah seperti erosi, kehilangan kesuburan, dan kontaminasi bahan kimia menyebabkan penurunan kemampuan tanah untuk memproduksi pangan yang cukup bagi populasi yang terus berkembang. Berdasarkan laporan PBB Global Outlook yang dirilis pada 27 April 2022, bahwa sekitar 40% dari luas permukaan tanah di bumi mengalami degradasi. Setiap tahunnya, sekitar 1 juta kilometer persegi lahan subur dan produktif mengalami penurunan kualitas dan jika pola ini berlanjut diperkirakan pada tahun 2030 akan ada 1,5 miliar hektar lahan yang terancam degradasi.

Oleh karena itu, diperlukan pengetahuan dan wawasan terkait teknologi yang digunakan pada praktik-praktik manajemen lahan untuk mengurangi terjadinya degradasi tanah. Pendekatan ini tidak hanya menjaga produktivitas, tetapi juga memperkuat fungsi ekosistem dan kualitas tanah jangka panjang. Salah satu praktik pertanian berkelanjutan yang kini menjadi fokus adalah *regenerative soil management* yang menekankan pada pemulihan dan peningkatan kualitas tanah melalui praktik-praktik seperti rotasi tanaman, penggunaan pupuk organik, dan pengurangan gangguan tanah dengan kolaborasi penggunaan IoT. Praktik-praktik ini tidak hanya menjaga produktivitas pertanian, tetapi juga mampu meningkatkan keanekaragaman hayati, efisiensi penggunaan air, dan penyerapan karbon dari atmosfer, sehingga memberikan kontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim (Schreefel et al., 2020). Dalam konteks ini, teknologi Internet of Things (IoT) menawarkan potensi besar untuk memantau dan mengelola kondisi tanah secara real-time, memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat dan efisien dalam praktik pertanian berkelanjutan.

Meskipun berbagai studi telah mengeksplorasi penerapan IoT dalam pertanian, terdapat kesenjangan dalam pemahaman tentang bagaimana teknologi ini dapat diintegrasikan secara efektif dalam praktik *regenerative soil management*. Kebanyakan penelitian berfokus pada aspek teknis atau efisiensi operasional, sementara aspek keberlanjutan jangka panjang dan dampak terhadap kualitas tanah sering kali kurang

mendapat perhatian. Masih minimnya studi yang menggabungkan pendekatan kualitatif untuk memahami praktik terbaik secara global dalam konteks lokal Indonesia.

Oleh karena itu, diperlukan sebuah alat pendeteksi kesuburan tanah yang dilengkapi dengan fitur pemantauan visual dan dapat dikontrol melalui aplikasi versatile berbasis Internet of Things (IoT). Dengan menggunakan IoT memungkinkan perangkat seperti sensor pH untuk terhubung ke web dan mengirim informasi secara *real-time* ke aplikasi *portable*. Data tersebut dapat dianalisis untuk menentukan perlakuan spesifik lahan yang sesuai dengan prinsip regeneratif, seperti kapan waktu optimal untuk menanam tanaman penutup atau kapan tanah perlu diistirahatkan. Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pengelolaan tanah, tetapi juga memperkuat daya dukung ekosistem melalui pengurangan input sintetis dan peningkatan kapasitas tanah dalam menyimpan karbon (Schreefel *et al.*, 2020).

2. KAJIAN TEORI

Regeneratif Soil Management

Menurut Maharani (2024) penurunan kualitas lahan pertanian, khususnya terkait dengan kesehatan tanah (*soil health*) disebabkan oleh kerusakan pada sifat fisik dan kimia tanah. Hal ini menjadi isu yang serius dan menimbulkan kekhawatiran di kalangan masyarakat mengenai keberlanjutan produksi pertanian di masa yang akan datang. Menurut Guo (2021) kesehatan tanah adalah kapasitas berkelanjutan dari tanah untuk berfungsi sebagai ekosistem hidup yang vital yang menopang tanaman, hewan, dan manusia. Definisi lain dari kesehatan tanah adalah terjadinya proses penyesuaian dan penyatuan yang bertujuan untuk mencapai kondisi tanah yang optimal untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas tanah, tanaman serta lingkungan sekitar (Riwandi, 2011)

Kesehatan tanah menjadi salah satu tujuan utama dalam pertanian berkelanjutan, selain fokus pada pengoptimalan pertumbuhan akar yang berkelanjutan, pengurangan gangguan, peningkatan penutupan tanah, serta pemeliharaan keanekaragaman hayati. Menurut Moebius-Clune *et al.*, (2016) dalam Maharani (2024) pemahaman yang lebih dan menyeluruh mengenai kondisi kesehatan tanah memungkinkan penerapan pengelolaan tanah yang lebih efektif dan berkualitas, dapat diperbaharui (regeneratif) dan berkelanjutan melalui strategi yang menyeluruh dan tidak terpisahkan, mampu menyesuaikan dan berdasarkan data.

Soil Management atau Pengelolaan tanah adalah serangkaian praktik dan strategi yang diterapkan untuk menjaga, memperbaiki dan mengoptimalkan fungsi tanah dalam

mendukung pertumbuhan tanaman, konservasi sumber daya alam dan keberlanjutan ekosistem. Menurut Geoderma (2018) pengelolaan tanah bertujuan untuk mengendalikan gulma, menjamin konservasi atau perbaikan tanah, meningkatkan pengelolaan nutrisi dan air, serta memberikan pengaruh positif keanekaragaman hayati. Pengelolaan tanah regeneratif (*Regenerative Soil Management*) merupakan pendekatan pertanian yang menekankan pada perbaikan dan pemulihan kesehatan tanah melalui praktik-praktik berkelanjutan. Pendekatan ini tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan produktivitas pertanian, tetapi juga untuk memperkuat ketahanan ekosistem dan mitigasi perubahan iklim, serta memberikan manfaat jangka panjang berupa peningkatan kesuburan tanah, efisiensi penggunaan air, penyerapan karbon, dan ketahanan petani terhadap gangguan lingkungan maupun ekonomi.

Internet of Things (IoT) dalam Pertanian

Menurut Kevin Ashton (2009), definisi IoT berdasarkan pernyataannya adalah alat dengan dukungan kemampuan internet, di mana alat (*Internet of Things*) tersebut memiliki potensi untuk mengubah sebuah dunia. Internet of Things ataupun kerap disebut dengan IoT merupakan jaringan perangkat fisik yang terhubung ke internet dan mampu mengumpulkan serta bertukar data secara real-time. Dalam konteks pertanian, IoT digunakan untuk mengumpulkan, memantau, dan menganalisis data dari lingkungan pertanian dengan tujuan meningkatkan efisiensi dan produktivitas.

Menurut Lueth, K. L. (2018), konsep Internet of Things (IoT) dibangun atas dasar sebuah jaringan yang menghubungkan berbagai perangkat atau alat dengan internet. Koneksi ini dilakukan melalui teknologi seperti Radio Frequency Identification (RFID), Global Positioning System (GPS), pemindai laser (laser scanner), serta berbagai sensor informasi lainnya. Seluruh perangkat ini saling terhubung dan berkomunikasi menggunakan protokol yang telah disepakati, sehingga memungkinkan terjadinya pertukaran data untuk keperluan identifikasi informasi, pelacakan lokasi, pemantauan (monitoring), dan manajemen sistem secara otomatis.

Teknologi IoT sangat tepat untuk direalisasikan pada bidang pertanian hal ini dikarenakan fungsi elektronisasi yang disediakan oleh IoT mampu menjawab semua tantangan yang dimiliki oleh para petani. Menurut Abbasi (2019), sensor-sensor yang dimiliki IoT mampu meningkatkan keuntungan petani dan hasil panen sambil mengurangi efek negatif pertanian terhadap lingkungan akibat penggunaan pupuk yang berlebihan. Dalam beberapa tahun terakhir, terdapat kemajuan dalam penggunaan sensor sehingga memungkinkan penggunaan sensor dengan biaya yang relatif rendah tanpa mengurangi

kualitasnya. Sensor ini mengukur kelembaban tanah, suhu, kelembaban dan parameter lainnya seperti kadar air, suhu luar ruangan, kecepatan angin dan lain-lain. Kemudian produk teknologi IoT mampu dalam penjadwalan otomatisasi penyiraman, penyemprotan pestisida dan pemupukan.

Meskipun IoT membawa manfaat signifikan dalam pertanian, penerapannya masih menghadapi berbagai tantangan yang perlu diatasi. IoT dalam pertanian menghadapi tantangan infrastruktur yang belum memadai, terutama di wilayah pedesaan dengan akses internet terbatas. Biaya perangkat keras yang tinggi, seperti sensor dan mikrokontroler, juga menjadi kendala, terutama bagi pelaku usaha kecil. Selain itu, literasi teknologi yang rendah menghambat pemahaman dan adopsi IoT. Risiko keamanan data juga menjadi perhatian, karena perangkat IoT menghasilkan data sensitif yang rentan terhadap ancaman siber jika tidak dilindungi dengan baik.

Salah satu studi oleh Putra dan Kurniawan (2020) mengembangkan sistem irigasi otomatis berbasis IoT yang menggunakan sensor kelembaban tanah, modul mikrokontroler, dan aplikasi berbasis Android. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini mampu menghemat air irigasi dan mempermudah pemantauan kondisi lahan secara real time. Sementara itu, Wibowo dan Santosa (2021) meneliti penggunaan IoT untuk pemantauan suhu dan kelembaban udara di *green house* tanaman sayuran. Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan sensor DHT22 yang terhubung ke internet memungkinkan petani melakukan pemantauan jarak jauh melalui smartphone, sehingga pengendalian lingkungan dapat dilakukan lebih cepat dan akurat.

Sustainable Farming dan Soil Carbon

Pertanian berkelanjutan adalah pendekatan yang menekankan pentingnya pengelolaan sumber daya alam secara bijak yang berfungsi untuk memenuhi kebutuhan pangan tanpa merusak lingkungan. Keberlanjutan dalam pertanian melibatkan keseimbangan antara aspek ekonomi, sosial dan lingkungan. Hal ini penting untuk menjaga produktivitas tanah dan memastikan bahwa generasi masa depan juga dapat memenuhi kebutuhan mereka (Fauzi, 2019).

Kesehatan tanah didefinisikan sebagai kemampuan tanah untuk mendukung pertumbuhan tanaman dan menjalankan fungsi ekosistem dengan baik (Riwandi, 2011). Salah satu aspek krusial dari kesehatan tanah adalah kandungan karbon organik (C-organik), yang berperan penting dalam meningkatkan kesuburan dan struktur tanah. Pupuk organik terbukti efektif dalam meningkatkan kondisi fisik, kimia, dan biologi tanah, serta meningkatkan kandungan C-organik. Pupuk organik tidak hanya memberikan nutrisi yang

diperlukan tanaman, tetapi juga mendukung aktivitas mikroorganisme yang bermanfaat, sehingga memperbaiki kualitas tanah secara keseluruhan (Adiningsih et al., 1989).

Kandungan C-organik yang tinggi dalam tanah berkontribusi pada kemampuan tanah untuk menyimpan air dan nutrisi, serta meningkatkan ketahanan terhadap erosi dan perubahan iklim. Penelitian oleh Mahajan et al. (2016) menunjukkan bahwa penggunaan pupuk organik dapat meningkatkan ketersediaan fosfor dan silika dalam tanah, yang sangat penting untuk pertumbuhan tanaman padi. Dengan mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia, pupuk organik membantu meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti pencemaran tanah dan air, serta mendukung stabilitas ekosistem. Praktik pengelolaan tanah yang berkelanjutan, termasuk pengembalian sisa tanaman ke tanah, sangat bermanfaat untuk meningkatkan kandungan C-organik. Mengembalikan sisa tanaman dan menggunakan pupuk organik membantu mengisi kembali unsur hara yang hilang, serta memperbaiki struktur tanah. Penelitian oleh Yuwono et al. (2007) menunjukkan bahwa pengelolaan lahan yang baik dapat meningkatkan akumulasi silika, yang penting untuk ketahanan tanaman terhadap stres, sekaligus mendukung peningkatan C-organik di dalam tanah.

Meskipun ada banyak manfaat dari penggunaan pupuk organik, tantangan dalam penerapannya masih ada, seperti kurangnya pemahaman petani tentang pentingnya pupuk organik dan keterbatasan akses ke sumber daya tersebut. Oleh karena itu, penyuluhan dan pelatihan bagi petani sangat diperlukan untuk meningkatkan pengetahuan mereka dan mendorong adopsi praktik pertanian berkelanjutan. Dengan upaya yang tepat, penggunaan pupuk organik dapat menjadi kunci untuk meningkatkan kesehatan tanah, memperkuat kandungan C-organik, dan mendukung keberlanjutan sistem pertanian di masa depan.

3. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan metode studi literatur yang bertujuan menggambarkan dari hasil analisis peneliti terhadap sejumlah artikel ilmiah yang telah dikaji. Menurut Sugiono (2013) penelitian kualitatif dengan jenis deskriptif dilakukan dengan mempelajari artikel yang ditemukan secara teliti, menganalisisnya dengan cermat, lalu membuat laporan penelitian secara jelas dan lengkap. Metode studi literatur adalah jenis penelitian yang melibatkan membaca, mengumpulkan, mencatat, menyusun dan mengelola berbagai sumber literatur yang diperoleh. Pengelolaan literatur ini dilakukan dengan cara mengaitkan berbagai referensi yang relevan dengan topik penelitian yang sedang dibahas (Ridley, 2012). Untuk mengkaji berbagai penelitian

terdahulu yang berkaitan dengan penerapan teknologi Internet of Things (IoT), pemetaan digital, dan praktik pertanian regeneratif dalam pengelolaan kesuburan tanah. Literatur yang dianalisis diperoleh melalui dua basis data utama, yaitu Google Scholar dan Research Gate. Proses pencarian dilakukan dengan menggunakan sejumlah kata kunci dalam bahasa Indonesia dan Inggris, seperti “Internet of Things in Agriculture”, “Smart Farming”, “Soil Fertility”, “Regenerative Agriculture”, “IoT Kesuburan Tanah”, dan “Digital Soil Mapping”. Pencarian difokuskan pada artikel yang terbit dalam kurun waktu 2018 hingga 2025, dengan kriteria bahwa artikel merupakan publikasi ilmiah (jurnal atau prosiding) yang tersedia dalam bentuk full-text dan memiliki keterkaitan langsung dengan tema penelitian.

Dari hasil penelusuran awal, diperoleh sebanyak 16 artikel dari Google Scholar dan Research Gate yang relevan dengan dengan topik penelitian. Selanjutnya dilakukan proses penyaringan berdasarkan judul, abstrak, dan kesesuaian isi dengan fokus penelitian. Artikel yang tidak relevan atau tidak memiliki data teknis yang memadai tidak dimasukkan. Setelah melalui tahap seleksi, diperoleh 8 artikel utama yang layak dianalisis lebih lanjut. Setelah artikel terkumpul, dilakukan proses identifikasi dan pengelompokan isi artikel berdasarkan pendekatan teknologi yang digunakan, parameter yang diamati (seperti kelembaban, pH tanah, suhu, atau aktivitas mikrobia), serta hasil atau kesimpulan penelitian. Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif kualitatif dengan tujuan untuk merangkum perkembangan penerapan teknologi digital dalam pertanian, mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang ada, serta menawarkan arah pengembangan teknologi selanjutnya untuk mendukung pertanian cerdas yang berkelanjutan.

Tabel 1. Data analisis

Judul Artikel	Penulis dan Tahun	Tujuan Penelitian	Teknologi IoT yang Digunakan	Hasil
Peran Artificial Intelligence dalam Sistem IoT untuk Pertanian Cerdas	Afiana Nurani <i>et al</i> (2025)	Mereview Literatur IoT dan AI dalam Smart Agriculture	Sensor IoT, Machine Learning, AI	IoT berperan penting dalam efisiensi dan produktivitas sektor pertanian.
Penerapan IoT terhadap Sistem Pendeteksi Kesuburan Tanah pada Lahan Perkebunan	Ali Mahmudin <i>et al</i> (2020)	Mendesain sistem pendeteksi kesuburan tanah berbasis sensor IoT	Sensor pH, kelembaban tanah, mikrokontroler	Sistem berhasil membaca kesuburan tanah secara real-time dan efisien.
Regenerative Agriculture—A Literature Review on the Practices	Khangura <i>et al</i> (2023)	Mereview praktik dan mekanisme pertanian regeneratif untuk meningkatkan kesehatan	fokus pada praktik seperti no-tillage, cover crops, integrasi hewan, rotasi tanaman	Praktik RA seperti no-tillage dan cover cropping dapat

and Mechanisms Used to Improve Soil Health		tanah		meningkatkan kandungan karbon tanah dan kesehatan tanah, tapi hasil bervariasi tergantung wilayah
Smart Agriculture: IOT-Driven Soil Nutrient Management System	Bachhav <i>et al</i> (2024)	Mengembangkan sistem monitoring nutrisi tanah berbasis IoT	Sensor NPK, kelembaban, pH; Arduino dan konektivitas GSM	Sistem IoT memberikan data real-time yang akurat untuk manajemen pemupukan yang lebih efisien dan berkelanjutan
IoT-Based Soil Monitoring System & Crop Management	Choubey <i>et al</i> (2024)	Memonitor kondisi tanah dan memberikan rekomendasi tanaman dan pupuk berbasis data	Sensor NPK, pH, kelembaban, suhu (DHT-11), NodeMCU, machine learning (Random Forest)	Sistem dapat memprediksi jenis tanaman yang cocok dan merekomendasikan pupuk, meningkatkan hasil dan efisiensi pertanian
Implementasi ESP32 untuk Sistem Pemantauan Kesuburan Tanah Berbasis IoT	Farhan Nuryadi, Ni Wayan Parwati, Mei Lestari (2025)	Mengembangkan sistem pemantauan tanah berbasis IoT menggunakan platform ESP32 untuk memantau kondisi tanah secara <i>real-time</i> dan mengembangkan aplikasi <i>client-server</i> untuk pemantauan serta notifikasi otomatis melalui telegram.	Platform ESP32 dengan konektivitas WiFi dan Bluetooth, sensor tanah (kelembapan, pH, suhu), aplikasi <i>client-server</i> (website), aplikasi telegram.	Sistem efektif dalam memantau kondisi tanah secara <i>realtime</i> dan meningkatkan efisiensi penggunaan air serta pengelolaan lahan pertanian.
Advanced Techniques for Soil Health and Nutrient Management	Bhupendra Singh Parmar, Anurag Patel, Narendra Singh Chandel, Satish Kumar Singh (2024)	Mengulas teknik-teknik canggih, aplikasi Kecerdasan Buatan (AI) dan sensor untuk pengukuran, pemantauan, dan pengelolaan kesehatan serta nutrisi tanah secara <i>realtime</i> dan lebih cepat.	Sensor tanah (nutrient, moisture, pH, organic matter, temperature, tensiometers, airflow, neutron probe, electrochemical, electromagnetic, electrical resistance, Time Domain Reflectometer (TDR)), IoT, AI, <i>Machine Learning</i> (ML).	Teknologi AI dan IoT memungkinkan pemantauan kesehatan tanah secara <i>realtime</i> , membantu pengelolaan nutrisi yang presisi (melalui <i>prescription mapping</i> dan <i>Variable Rate Technology</i>), dan praktik pertanian ramah lingkungan.
Implementing Soil Health Improvement	Haider Alabdali, Muhamma	Meningkatkan kesehatan tanah dan efisiensi pemupukan dalam	Sensor kelembapan EC-5, Sensor NPK Atlas Scientific,	Retensi air naik 10–15%, hasil panen naik 8%,

Techniques in Regenerative Agriculture Using IoT-Enabled NPK Sensing for Precision Nutrient Management	d Kadhi Obaid, dan Vivek Kumar C (2025)	pertanian regeneratif melalui integrasi teknologi IoT.	LoRaWAN, UAV (NDVI), dan platform IoT terpusat.	aktivitas mikroba meningkat, limpasan nutrisi turun 10%, dan kesuburan tanah meningkat
--	---	--	---	--

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Peran Teknologi IoT dalam Mendukung Prinsip-Prinsip Regeneratif Soil Management

Praktik *regenerative soil management* didasarkan pada serangkaian prinsip yang bertujuan untuk memulihkan dan meningkatkan kesehatan tanah. Teknologi IoT menawarkan berbagai alat dan teknik untuk mendukung implementasi dan pemantauan prinsip-prinsip ini secara efektif (Nurani *et al.*, 2025).

Praktik seperti *no-tillage* atau pengurangan pengolahan tanah bertujuan untuk menjaga struktur tanah, meningkatkan infiltrasi air, dan melindungi karbon tanah untuk meminimalisasi gangguan tanah (*minimize soil disturbance*) (Nurani *et al.*, 2025). Sistem IoT dapat memantau parameter seperti kelembapan tanah dan suhu tanah secara *real-time*. Data yang didapat dari sistem membantu petani memahami kondisi tanah tanpa perlu melakukan pengambilan sampel fisik yang invasif, sehingga mendukung keputusan untuk mengurangi frekuensi pengolahan tanah. Sistem pemantauan visual seperti pada penelitian oleh Sinambela, Mahmudin, dan Auliasari (2020) dengan mengembangkan alat pendeteksi tanah sehingga dapat menampilkan keadaan secara visual pada fitur monitoring dan dapat dikendalikan secara efisien dengan media wireless lewat website membuat tanah menjadi lebih minim mendapat tindakan fisik.

Dalam penelitian Khangura *et al.* (2023), penggunaan tanaman penutup (*cover crops*) atau mulsa dari sisa tanaman dapat membantu melindungi tanah dari erosi, menekan gulma, dan menambah bahan organik sehingga tanah menjadi lebih sehat, oleh karena itu di sini IoT memiliki peran dalam menjaga tanah tetap tertutup (*keep the soil covered*). Moyer *et al.* (2020) menambahkan bahwa sensor kelembapan tanah dan suhu tanah yang terhubung IoT dapat membantu menentukan waktu yang optimal untuk menanam tanaman penutup atau efektivitas mulsa dalam menjaga kelembapan dan suhu tanah. Pemantauan nutrisi tanah seperti Natrium (N), Fosfor (P), Kalium (K) dapat membantu memilih jenis tanaman penutup yang sesuai untuk memperbaiki defisiensi nutrisi.

Penggunaan tanaman penutup (*cover crops*) seperti dalam penelitian oleh Khangura *et al.* (2023) dan Moyer *et al.* (2020) atau melakukan rotasi tanaman yang intensif, menyediakan makanan bagi organisme tanah dan membantu membangun struktur tanah dapat menjaga umur hidup akar yang lebih lama (*keep living roots in the soil*). Dengan memantau kondisi kesuburan tanah seperti pH, nutrisi NPK, suhu, dan kelembapan, IoT dapat membantu petani merencanakan rotasi tanaman atau penanaman tanaman penutup yang berkelanjutan, memastikan kondisi tanah mendukung pertumbuhan akar sepanjang tahun.

Diversifikasi tanaman dalam melakukan rotasi, tanaman penutup majemuk, dan integrasi agroforestri meningkatkan ketahanan ekosistem dan kesehatan tanah. Sistem IoT dapat membantu mengelola kondisi mikro lingkungan yang berbeda untuk tanaman yang beragam dengan menyediakan data spesifik lokasi mengenai kebutuhan air dan nutrisi. Rekomendasi tanaman berbasis data sensor IoT dapat mendukung pemilihan spesies yang beragam dan sesuai dengan kondisi lahan sehingga keanekaragaman hayati dapat meningkat (*increase species diversity*) (Khangura *et al.*, 2020).

Mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia dan pestisida dengan memanfaatkan proses biologis alami dan input organik. Sensor NPK dan pH tanah membantu dalam pemupukan yang tepat jumlah dan waktu sehingga lebih presisi dan mengurangi penggunaan pupuk berlebih. Sistem dapat memberikan rekomendasi pupuk berdasarkan data sensor. Pemantauan kondisi lingkungan dan tanah dapat membantu dalam deteksi dini serangan hama atau penyakit, memungkinkan intervensi non kimia atau penggunaan pestisida yang lebih tertarget dan lebih minimum. Sistem IoT mampu mendeteksi pola dan anomali, memfasilitasi intervensi tepat waktu (Nurani *et al.*, (2025).

Best Practice Global dalam Integrasi IoT dengan Regenerative Soil Management

Kajian terhadap berbagai studi kasus global menunjukkan bahwa integrasi Internet of Things (IoT) dalam manajemen tanah regeneratif mampu memberikan dampak signifikan dalam meningkatkan kesehatan tanah dan produktivitas pertanian. Salah satu studi dilakukan di wilayah Najaf, Karbala, Al Diwaniyah, dan Babilonia di Irak, serta melibatkan kolaborator dari Hyderabad, India. Penelitian ini menerapkan teknologi seperti Sensor Kelembapan Tanah EC-5, Kit Sensor NPK Atlas Scientific, sistem komunikasi LoRaWAN, serta Unmanned Aerial Vehicle (UAV) yang dilengkapi dengan kamera multispektral untuk memantau kesehatan vegetasi melalui NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Di dalam penelitian tersebut menggunakan Sensor EC-5 untuk memantau kadar kelembapan tanah secara real-time, memungkinkan irigasi presisi dan menghindari erosi tanah. Hasil

studi menunjukkan bahwa penggunaan sensor ini meningkatkan retensi kelembapan tanah sebesar 10–15% dan memperkuat aktivitas mikroba tanah, yang sangat penting dalam dekomposisi bahan organik dan siklus nutrisi (Alabdeli et al., 2025). Selain itu, kit sensor NPK digunakan untuk memantau kandungan nitrogen, fosfor, dan kalium di tanah, yang mendukung strategi pemupukan presisi dan ramah lingkungan. Teknologi ini tercatat mampu mengurangi limpasan nutrisi hingga 10%, meningkatkan hasil panen sebesar 8%, dan mempertahankan keseimbangan pH tanah dalam kisaran optimal 6,1–6,5 (Alabdeli et al., 2025)

Data dari seluruh sensor dan UAV diintegrasikan ke dalam platform IoT pusat yang menyediakan analisis menyeluruh atas kondisi lahan, memungkinkan intervensi berbasis data yang lebih efisien dan tepat sasaran. Di samping itu, UAV memfasilitasi pengamatan udara yang dapat mendeteksi area stres tanaman, mempercepat diagnosis masalah, dan mendukung keputusan agronomi yang lebih akurat. Studi ini juga mencatat peningkatan karbon organik tanah (hingga 17,5 g/kg), laju respirasi tanah (hingga 34,2 mg CO₂/kg/hari), dan penurunan kepadatan tanah, yang secara keseluruhan mencerminkan perbaikan signifikan dalam kesehatan dan kesuburan tanah (Alabdeli et al., 2025)

Kajian studi kasus global lainnya terkait integritas Internet of Things (IoT) dalam manajemen tanah regeneratif dapat dilihat pada penerapan teknologi di Bilaspur, India. Studi ini dilaksanakan oleh Government Engineering College Bilaspur dan berfokus pada pengembangan sistem pemantauan tanah berbasis IoT untuk meningkatkan keberlanjutan dan produktivitas praktik pertanian. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan jaringan sensor canggih, seperti sensor NPK, kelembapan tanah, pH, dan suhu yang terhubung dengan sensor DHT-11. Seluruh perangkat ini dikombinasikan dengan mikrokontroler NodeMCU dan Arduino serta terhubung melalui konektivitas internet untuk mengumpulkan dan mengirimkan data secara real-time. Data tersebut dianalisis menggunakan algoritma pembelajaran mesin, khususnya Random Forest, yang terbukti memberikan akurasi tinggi antara 97 hingga 98 persen dalam memprediksi kebutuhan tanaman dan pupuk, serta parameter kesuburan tanah lainnya (Choubey et al., 2024)

Dengan kemampuan ini, sistem mampu memberikan rekomendasi prediktif terkait jenis tanaman yang paling cocok ditanam dan jenis pupuk yang perlu digunakan sesuai kondisi tanah aktual. Studi ini memiliki relevansi besar terhadap manajemen tanah regeneratif karena mendukung prinsip-prinsip utama seperti mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia secara berlebihan, mengoptimalkan kelembapan tanah untuk

mencegah degradasi, serta memanfaatkan teknologi digital dan data real-time untuk menjaga dan memulihkan kesuburan tanah (Choubey et al., 2024)

Efektivitas Penerapan IoT dalam Meningkatkan Kualitas Tanah dan Karbon Organik Tanah

Penerapan teknologi Internet of Things (IoT) dalam sektor pertanian telah menjadi pendekatan modern yang efektif dalam mengoptimalkan pengelolaan lahan. Salah satu dampak penting dari penerapan teknologi ini adalah perbaikan kualitas tanah, yang berkaitan erat dengan ketersediaan unsur hara serta akumulasi karbon organik tanah. Karbon organik merupakan komponen penting dalam menjaga kesuburan tanah, aktivitas mikroba, serta retensi air dan unsur hara.

Studi yang dilakukan oleh Nuryadi, Septiani, dan Lestari (2025) mengembangkan sistem pemantauan tanah berbasis ESP32 yang mampu mendeteksi dan mengirimkan data kelembaban, pH, dan suhu tanah secara real-time melalui koneksi Wi-Fi. Sistem ini terintegrasi dengan server dan aplikasi Telegram, memungkinkan petani untuk mendapatkan notifikasi otomatis apabila kondisi tanah berada di luar ambang batas optimal. Selain itu, sistem ini juga mendukung pengendalian pompa air secara otomatis berdasarkan hasil pembacaan sensor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ini mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mempercepat pengambilan keputusan lapangan (Nuryadi et al., 2025, hlm. 79–85).

Efisiensi dalam penggunaan air dan kontrol terhadap pH tanah yang dilakukan secara tepat waktu akan menciptakan kondisi yang lebih stabil bagi tanah. Lingkungan tanah yang terjaga ini akan mendorong aktivitas biologis tanah yang berkelanjutan dan mendukung proses pembentukan karbon organik, meskipun aspek tersebut tidak dijelaskan secara eksplisit dalam studi tersebut.

Sebagai pembanding, Sujal S. Bachhav, Aman A. Deshmukh, Lochana G. Kotangale, Yogesh A. Shaniware, dan Rahul K. Bhise (2024) dari Mahatma Phule Krishi Vidyapeeth, India, mengembangkan sistem manajemen hara tanah berbasis IoT yang dirancang untuk mendeteksi secara akurat kadar nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) di dalam tanah menggunakan sensor NPK. Sistem ini menggunakan Arduino dan NodeMCU yang terhubung dengan web interface, memberikan tampilan grafik yang mudah diakses oleh petani. Keunggulan sistem ini terletak pada kecepatan pembacaan (<10 detik), akurasi tinggi, dan biaya rendah, yang menjadikannya solusi ideal untuk pemantauan nutrisi tanah secara berkelanjutan (Bachhav et al., 2024, hlm. 169–175).

Hasil dari penelitian tersebut menegaskan bahwa pemantauan unsur hara makro tanah melalui sistem IoT dapat meningkatkan efisiensi pemupukan dan mencegah penggunaan pupuk berlebih yang merusak keseimbangan tanah. Dengan adanya informasi yang akurat mengenai defisiensi unsur hara, petani dapat melakukan intervensi yang lebih terarah untuk menjaga kesehatan tanah. Dalam konteks keberlanjutan, peningkatan kadar nutrisi yang seimbang dalam tanah menjadi fondasi penting bagi proses peningkatan karbon organik tanah, karena keseimbangan nutrisi memperkuat aktivitas biologis tanah dan pembentukan bahan organik.

Kedua studi menunjukkan bahwa sistem pemantauan tanah berbasis IoT sangat efektif dalam meningkatkan kualitas tanah, baik dari aspek struktur fisik, ketersediaan unsur hara, maupun stabilitas kelembaban. Efektivitas ini secara langsung berkontribusi pada penciptaan lingkungan mikro yang kondusif bagi akumulasi karbon organik, terutama melalui pengurangan stres tanah dan optimalisasi input pertanian. Dengan demikian, adopsi IoT dalam pengelolaan tanah pertanian bukan hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga menjadi salah satu strategi mendukung pertanian ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Tantangan dan Peluang dalam Implementasi IoT untuk Praktik Pertanian Regeneratif

Transformasi menuju praktik pertanian regeneratif menuntut adopsi teknologi modern yang berkelanjutan, salah satunya adalah Internet of Things (IoT). Internet of Things (IoT) adalah teknologi lain yang memainkan peran penting dalam agribisnis (Barbosa & Martins, 2021). Dalam studi yang dilakukan oleh Adi Candra Purnama, Santi Nur Rahayu, dan Soni Tri Dirgantara (2024), pada program *Tawangargo Smart Eco-Farming Village (TAMENG)* yang diinisiasi oleh PT Petrokimia Gresik, IoT diposisikan sebagai elemen kunci dalam mendukung prinsip *Climate Smart Agriculture (CSA)* yang bertujuan meningkatkan produktivitas, adaptasi terhadap perubahan iklim, dan mitigasi emisi gas rumah kaca. Namun, penerapan IoT dalam praktik pertanian tidak lepas dari berbagai tantangan struktural, sosial, dan teknis, meskipun di sisi lain membuka peluang strategis dalam mengembangkan pertanian regeneratif yang inklusif dan berkelanjutan.

Dalam konteks Program *Tawangargo Smart Eco-Farming Village (TAMENG)* yang diinisiasi oleh PT Petrokimia Gresik, salah satu kendala utama implementasi IoT adalah rendahnya kapasitas sumber daya manusia, khususnya petani yang mayoritas berusia di atas 40 tahun dan cenderung memiliki keterbatasan dalam mengakses serta mengoperasikan teknologi berbasis digital. Minimnya regenerasi petani muda menjadi penghambat keberlanjutan sistem pertanian berbasis teknologi karena masih terbatasnya minat generasi

muda terhadap profesi petani yang seringkali diasosiasikan sebagai pekerjaan fisik konvensional.

Ketersediaan infrastruktur teknologi yang mendukung implementasi IoT secara optimal masih terbatas. Kendala dalam hal konektivitas internet, pemeliharaan perangkat, dan kurangnya fasilitas teknologi pendukung seperti *automatic weather station* (AWS) menjadi tantangan dalam pengambilan keputusan berbasis data. Disfungsi kelembagaan seperti lemahnya peran Badan Usaha Milik Desa (BUMDes) juga menghambat integrasi teknologi ke dalam sistem produksi dan distribusi hasil pertanian. Biaya investasi awal yang relatif tinggi dalam pengadaan perangkat IoT, *greenhouse*, dan sistem *drip irrigation* menjadi tantangan tambahan, terutama bagi petani gurem yang memiliki keterbatasan akses terhadap pembiayaan.

Meskipun menghadapi tantangan-tantangan tersebut, implementasi IoT dalam pertanian regeneratif membuka berbagai peluang strategis. Teknologi ini memungkinkan monitoring kondisi lingkungan tumbuh secara real-time, serta pengaturan sistem penyiraman dan pemupukan secara presisi, yang telah terbukti mampu meningkatkan frekuensi panen dan produktivitas hasil pertanian. Dalam studi kasus Program TAMENG (2024), penggunaan sistem pertanian berbasis IoT telah meningkatkan hasil panen cabai rawit dari tiga hingga empat kali panen menjadi empat belas hingga delapan belas kali panen dalam satu musim tanam. Selain itu, integrasi teknologi *smart greenhouse* telah memungkinkan tanaman tumbuh dalam lingkungan yang lebih stabil, terlepas dari fluktuasi iklim yang ekstrem.

IoT juga berperan penting dalam mendorong model ekonomi sirkular melalui pengelolaan limbah pertanian menjadi produk bernilai tambah seperti pupuk organik cair, wafer pakan ternak, serta olahan pangan seperti mi sayur. Hal ini mendukung prinsip pertanian regeneratif yang tidak hanya berfokus pada keberlanjutan produksi, tetapi juga pada pemulihan ekosistem dan optimalisasi sumber daya secara menyeluruh. Di sisi sosial, keterlibatan kelompok rentan seperti perempuan kepala keluarga dan pemuda dalam pengelolaan teknologi ini menunjukkan bahwa IoT dapat menjadi sarana pemberdayaan dan inklusi sosial. Kemitraan antara masyarakat, pemerintah desa, lembaga pendidikan, dan sektor swasta dalam Program TAMENG (2024) semakin memperkuat transfer teknologi, penguatan kelembagaan, dan perluasan dampak inovasi.

Meskipun adopsi IoT dalam pertanian regeneratif menghadapi tantangan multidimensional, peluang yang ditawarkan jauh lebih besar jika disertai dengan strategi pemberdayaan yang menyeluruh, peningkatan kapasitas sumber daya manusia, serta

dukungan infrastruktur dan kebijakan yang memadai. Studi kasus Program TAMENG (2024) menunjukkan bahwa teknologi digital seperti IoT, bila diintegrasikan secara partisipatif dan kontekstual, dapat menjadi instrumen kunci dalam membangun sistem pertanian yang resilien, inklusif, dan berkelanjutan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan mengenai peran teknologi Internet of Things (IoT) dalam praktik regenerative soil management, beberapa poin penting dapat disimpulkan. Bahwa penerapan IoT memiliki potensi signifikan untuk meningkatkan kesehatan dan kualitas tanah. Melalui pemantauan real-time yang dilakukan oleh sensor-sensor, petani dapat membuat keputusan yang lebih tepat mengenai pengelolaan lahan, termasuk dalam hal pemupukan, penyiraman, dan pemilihan jenis tanaman yang sesuai.

Praktik regenerative soil management, yang berfokus pada pemulihan dan peningkatan kualitas tanah melalui metode seperti rotasi tanaman dan penggunaan pupuk organik, dapat diperkuat dengan dukungan teknologi IoT. Data yang diperoleh dari sensor memungkinkan petani untuk mengidentifikasi masalah lebih awal, sehingga intervensi dapat dilakukan secara efisien dan tepat waktu. Studi kasus internasional menunjukkan bahwa integrasi IoT dalam manajemen tanah regeneratif dapat memberikan dampak yang signifikan, seperti peningkatan produktivitas dan pengurangan penggunaan pupuk kimia. Namun, tantangan yang dihadapi, termasuk rendahnya pemahaman teknologi di kalangan petani, infrastruktur yang belum memadai, dan biaya investasi awal yang tinggi, perlu diatasi agar manfaat teknologi ini dapat dirasakan secara lebih luas.

Oleh karena itu, untuk mendorong penerapan IoT dalam praktik pertanian regeneratif, diperlukan peningkatan kapasitas sumber daya manusia melalui penyuluhan dan pelatihan. Dukungan kebijakan yang memadai juga sangat penting untuk menciptakan lingkungan yang mendukung penerapan teknologi ini. Dengan langkah-langkah tersebut, diharapkan pertanian yang berkelanjutan, inklusif, dan ramah lingkungan dapat terwujud, serta mampu mendukung ketahanan pangan dan pemulihan ekosistem secara menyeluruh.

REFERENSI

- Abbasi, M., Yaghmaee, M. H., & Rahnama, F. (2019). Internet of things in agriculture: A survey. *2019 3rd International Conference on Internet of Things and Applications (IoT)*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/IICITA.2019.8808839>

- Adiningsih, J. S. (1989). Evaluasi keperluan fosfat pada lahan sawah intensifikasi di Jawa. Dalam *Prosiding Lokakarya Nasional Penggunaan Pupuk, Cipayung, 25 November 1988* (hlm. 63–89).
- Alabdeli, H., Obaid, M. K., & C, V. K. (2025). Implementing soil health improvement techniques in regenerative agriculture using IoT-enabled NPK sensing for precision nutrient management. [*Artikel konferensi, tidak lengkap*].
- Aliyah, N., Murthingtyas, N. H., Almas, S. S., & Purnomo, D. E. (2025). Tantangan dan peluang penggunaan IoT pada agrokomples: Systematic literature review. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 9(1), 1216–1223.
- Bachhav, S. S., Deshmukh, A. A., Kotangale, L. G., Shaniware, Y. A., & Bhise, R. K. (2024). Smart agriculture: IoT-driven soil nutrient management system. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 25(6), 169–175. <https://doi.org/10.9734/jaeri/2024/v25i6650>
- Cahyani, M. P. (2023). IoT dalam smart farming 4.0 untuk upaya tingkatkan efisiensi agribisnis. *Teknois: Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi dan Sains*, 3(2), 154–190.
- Choubey, A., Wadhwa, S., Ayam, J., Arya, H., & Keshari, A. (2024). IoT-based soil monitoring system & crop management. *International Journal of Creative Research Thought*, 12(4).
- Fauzi, A. (2019). *Teknik analisis keberlanjutan*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Fitriawan, H., Cahyo, K. A. D., Purwiyanti, S., & Alam, S. (2020). Pengendalian suhu dan kelembaban pada budidaya jamur tiram berbasis IoT. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 9(1), 28–37.
- Forest Digest. (2022, April 30). PBB: 40% lahan dunia terdegradasi. *Forest Digest*. <https://www.forestdigest.com/detail/1707/pbb-40-lahan-dunia-terdegradasi>
- Geoderma. (2018). Soil management. *ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/soil-management>
- Guo, M. (2021). Soil health assessment and management: Recent development in science and practices. *Soil Systems*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/soilsystems5040061>
- Khangura, R., Ferris, D., Wagg, C., & Bowyer, J. (2023). Regenerative agriculture—A literature review on the practices and mechanisms used to improve soil health. *Sustainability*, 15(3), 2338.
- Komaludin, D. (2018). Penerapan teknologi Internet of Thing (IoT) pada bisnis budidaya tanaman hidroponik sebagai langkah efisiensi biaya perawatan. *Prosiding FRIMA (Festival Riset Ilmiah Manajemen dan Akuntansi)*, (1), 682–690.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627.
- Mahajan, G., Mahajan, G., & Chauhan, B. S. (2016). Effect of organic manure application on availability and uptake of phosphorus by rice and wheat in vertisol. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 64(2), 171–177.

- Maharani, T. (2024). Upaya peningkatan kesehatan tanah dengan penggunaan pupuk organik dalam bingkai pertanian berkelanjutan (hlm. 103–115). *[Publikasi tidak disebutkan]*.
- Mautuka, Z. A., Astriana, M., & Martasiana, K. (2022). Pemanfaatan biochar tongkol jagung guna perbaikan sifat kimia tanah lahan kering. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 8(1), 201–208. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5827375>
- Moebius-Clune, B. N., Moebius-Clune, D. J., Gugino, B. K., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Ristow, A. J., Van Es, H. M., Thies, J. E., Shayler, H. A., McBride, M. B., Wolfe, D. W., & Abawi, G. S. (2016). *Comprehensive assessment of soil health* (3rd ed.). Cornell University.
- Muda, H. B., Ermilinda, L., & Lodan, M. W. (2025). Aplikasi mobile untuk menentukan tingkat kesuburan tanah dan kesesuaian tanaman dengan metode fuzzy logic menggunakan IoT. *Innovative: Journal of Social Science Research*, 5(2), 1983–1993.
- Nuryadi, F., Septiani, N. W. P., & Lestari, M. (2025). Implementasi ESP32 untuk sistem pemantauan kesuburan tanah berbasis IoT. *Seminar Nasional Riset dan Inovasi Teknologi (SEMNAS RISTEK)*, 79–86.
- Purnama, A. C., Rahayu, S. N., & Dirgantara, S. T. (2024, Oktober). Achievements of climate smart agriculture practices in horticultural agriculture in the Tawangargo smart eco-farming village program. Dalam *E-Proceeding Conference: Indonesia Social Responsibility Award*, 2(5).
- Putra, R. A., & Kurniawan, D. (2020). Rancang bangun sistem irigasi otomatis berbasis Internet of Things (IoT) pada lahan pertanian. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 21(1), 45–52.
- Ridley, D. (2012). *The literature review: A step-by-step guide for students* (2nd ed., K. Metzler, Ed.). London, UK: SAGE Publications Ltd.
- Riwandi. (2010). Identifikasi dan interpretasi indikator kesehatan tanah. *Makalah Seminar Nasional dan Kongres Masyarakat Konservasi Tanah dan Air Indonesia (MKTI)*, 24–25 November 2010, Jambi. https://repository.unib.ac.id/144/1/Kum_B11_Riwandi.pdf
- Riwandi. (2011). Metode cepat penilaian kesehatan tanah dengan indikator kinerja tanah. Dalam *Seminar Nasional dan Rapat Tahunan Dekan Bidang Ilmu-Ilmu Pertanian*, 23–25 Mei 2011, Palembang. <https://repository.unib.ac.id/145/>
- Sari, I. P., Novita, A., Al-Khowarizmi, A. K., Ramadhani, F., & Satria, A. (2024). Pemanfaatan Internet of Things (IoT) pada bidang pertanian menggunakan Arduino Uno R3. *Blend Sains: Jurnal Teknik*, 2(4), 337–343.
- Sugiyono. (2013). *Metodologi penelitian kuantitatif kualitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Yuwono, E., & Yukamgo, N. W. (2007). Peran silikon sebagai unsur bermanfaat pada tanaman tebu. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 7(2), 103–116.