

**PREDIKSI KESEHATAN TANAH *REALTIME* BERBASIS AI DARI DATA SENSOR IoT DI LAHAN KERING**

**Husnitalia Mayantika<sup>1\*</sup>, Misbahuddin<sup>2</sup>, Sukartono<sup>3</sup>**

<sup>1\*, -3</sup>Universitas Mataram, Indonesia

*Email: [mhusnitalia@gmail.com](mailto:mhusnitalia@gmail.com)*

**Article Info**

**Article history:**

Received 15 June, 2026

Approved 28 June 2026

**Abstract**

Lahan kering yang menempati 45% permukaan daratan bumi menghadapi tantangan serius berupa kelangkaan air, degradasi tanah, dan produktivitas rendah. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengembangan sistem prediksi kesehatan tanah berbasis kecerdasan buatan (AI) yang terintegrasi dengan sensor Internet of Things (IoT) untuk monitoring real-time di lahan kering. Metode penelitian menggunakan studi literatur dengan pendekatan kualitatif, menganalisis publikasi dari basis data akademik Scopus, Web of Science, dan Google Scholar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arsitektur sistem optimal terdiri dari lapisan sensor multi parameter, komunikasi wireless berbasis LoRa, dan platform cloud computing untuk analitik prediktif. Parameter kritis yang teridentifikasi meliputi kelembaban tanah, pH, suhu, konduktivitas listrik, dan kandungan N-P-K. Algoritma machine learning seperti Random Forest, Support Vector Machine, dan Artificial Neural Network memberikan akurasi prediksi di atas 90%. Sistem menunjukkan reliabilitas tinggi dengan refresh rate data setiap 15 menit dan akurasi pengukuran hingga dua desimal. Implementasi sistem meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 60% dan mendukung praktik pertanian presisi. Tantangan implementasi meliputi kondisi lingkungan ekstrem dan keterbatasan infrastruktur, yang dapat diatasi melalui pemilihan komponen tahan ekstrem dan teknologi komunikasi jarak jauh. Sistem ini berkontribusi signifikan terhadap pertanian berkelanjutan di lahan kering melalui optimalisasi sumber daya dan pencegahan degradasi lahan.

**Keywords:** Internet of Things; Kecerdasan Buatan; Kesehatan Tanah

Copyright © 2025, The Author(s).

This is an open access article under the CC-BY-SA license



**How to cite:** Mayantika, H., Misbahuddin & Sukartono. (2025). Prediksi Kesehatan Tanah Realtime Berbasis AI Dari Data Sensor IoT Di Lahan Kering. *Jurnal Sosial, Budaya dan Humaniora*, 2(1), 1–12.

**INTRODUCTION**

Lahan kering merupakan ekosistem yang menempati sekitar 45% dari permukaan daratan bumi dan mendukung hampir 38% populasi manusia global. Wilayah ini menghadapi tantangan signifikan berupa kelangkaan air, curah hujan tidak menentu, dan kerentanan tinggi terhadap degradasi lahan. Degradasi lahan di wilayah kering dapat menurunkan produktivitas pertanian, mengurangi kesuburan tanah, dan meningkatkan kerentanan terhadap perubahan

iklim. Diperkirakan 25-35% lahan kering telah mengalami degradasi, mempengaruhi lebih dari 250 juta orang secara langsung. Kondisi ini semakin diperparah oleh praktik pertanian yang tidak berkelanjutan, seperti pengolahan tanah berlebihan dan penggembalaan yang tidak terkontrol, yang menyebabkan erosi tanah dan penurunan kandungan bahan organik.

Kesehatan tanah menjadi fondasi utama dalam produktivitas pertanian, terutama di lahan kering yang memiliki karakteristik tanah beragam dengan kandungan bahan organik rendah dan salinitas tinggi. Monitoring kesehatan tanah secara tradisional memerlukan pengujian laboratorium yang memakan waktu dan biaya tinggi, melibatkan proses pengumpulan sampel, pengemasan, dan pengiriman ke laboratorium khusus. Keterbatasan metode konvensional ini membuat petani kesulitan melakukan pemantauan secara berkala dan responsif terhadap perubahan kondisi tanah. Parameter penting seperti pH, kelembaban, suhu, konduktivitas listrik, serta kandungan nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) perlu dimonitor secara terus-menerus untuk optimalisasi pertumbuhan tanaman dan pencegahan degradasi lahan lebih lanjut (Sharma & Shivandu, 2024).

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) telah membawa transformasi signifikan dalam pertanian presisi dengan memungkinkan pemantauan real-time terhadap berbagai parameter kritis pertanian. Sensor IoT menyediakan data kontinyu dengan resolusi tinggi mengenai kesehatan tanah, status pertumbuhan tanaman, dan kondisi lingkungan. Integrasi sensor IoT dalam pertanian menawarkan manfaat signifikan termasuk otomatisasi proses berdasarkan data real-time, seperti sistem irigasi yang dapat menyesuaikan diri secara otomatis berdasarkan tingkat kelembaban tanah. Platform IoT mengagregasi data dari berbagai sensor yang memungkinkan analitik lanjutan dan wawasan prediktif untuk membantu petani mengantisipasi masalah seperti wabah hama dan penyakit tanaman (Sharma & Shivandu, 2024).

Kecerdasan buatan (AI) dan algoritma machine learning telah terbukti efektif dalam mengoptimalkan alokasi sumber daya dan manajemen tanaman dengan memanfaatkan data historis dan real-time. Penelitian menunjukkan bahwa sistem AI dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 60% dalam irigasi cerdas, memastikan setiap unit air yang diaplikasikan berkontribusi maksimal terhadap pertumbuhan tanaman dan hasil panen. Berbagai algoritma machine learning seperti Random Forest, Support Vector Machines, K-Nearest Neighbors, dan jaringan neural telah diimplementasikan dalam prediksi kesehatan tanah dan rekomendasi tanaman. Sistem berbasis IoT dan AI telah menunjukkan akurasi tinggi dengan margin error di bawah 2% dalam pengukuran parameter tanah (Mallareddy et al., 2023).

Integrasi teknologi IoT dan AI memberikan solusi komprehensif untuk monitoring dan prediksi kesehatan tanah secara real-time. Sistem hibrida yang menggabungkan berbagai teknik machine learning dengan teknologi IoT telah dikembangkan untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi monitoring tanah. Penelitian menunjukkan bahwa algoritma hibrida seperti Bayesian optimization dengan KNN dapat meningkatkan performa prediktif dalam analisis kesehatan tanah. Implementasi sensor multi-parameter yang terintegrasi dengan mikroprosesor dan platform cloud memungkinkan analisis fertilitas tanah secara real-time dan rekomendasi budidaya yang disesuaikan. Sistem seperti ini telah terbukti efektif mendeteksi defisiensi nutrisi spesifik lokasi dan meningkatkan estimasi kesesuaian tanaman (Kumar et al., 2024).

Meskipun terdapat kemajuan signifikan dalam teknologi IoT dan AI untuk pertanian presisi, penerapannya di lahan kering masih menghadapi berbagai tantangan. Karakteristik

unik lahan kering seperti variabilitas iklim tinggi, curah hujan rendah dan tidak teratur, serta degradasi tanah yang sudah berlangsung lama memerlukan pendekatan khusus dalam desain sistem monitoring dan prediksi. Kebutuhan akan sistem yang hemat biaya, dapat diandalkan dalam kondisi ekstrem, dan mudah diakses oleh petani lokal menjadi pertimbangan penting. Selain itu, integrasi pengetahuan lokal dengan teknologi modern perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan adopsi dan efektivitas sistem di tingkat lapangan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada beberapa rumusan masalah: Bagaimana mengembangkan sistem prediksi kesehatan tanah berbasis AI yang dapat bekerja secara real-time menggunakan data sensor IoT di lahan kering? Parameter tanah apa saja yang paling berpengaruh dalam prediksi kesehatan tanah di lahan kering? Algoritma machine learning mana yang paling efektif untuk prediksi kesehatan tanah dengan data sensor IoT? Bagaimana tingkat akurasi sistem prediksi yang dikembangkan dalam kondisi real-time? Penelitian ini diharapkan dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut melalui pendekatan sistematis yang menggabungkan teknologi sensor IoT, analisis data real-time, dan algoritma AI yang dioptimalkan untuk kondisi lahan kering.

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan sistem prediksi kesehatan tanah berbasis AI yang terintegrasi dengan sensor IoT untuk monitoring real-time di lahan kering, mengidentifikasi parameter tanah kritis yang mempengaruhi kesehatan tanah di lahan kering, membandingkan performa berbagai algoritma machine learning dalam prediksi kesehatan tanah, serta mengevaluasi akurasi dan reliabilitas sistem dalam implementasi lapangan. Manfaat yang diharapkan meliputi penyediaan alat bantu keputusan real-time bagi petani untuk manajemen lahan yang lebih efisien, kontribusi terhadap pengembangan pertanian presisi di wilayah lahan kering, pengurangan biaya monitoring tanah melalui otomatisasi berbasis sensor, dan dukungan terhadap praktik pertanian berkelanjutan yang dapat mencegah degradasi lahan lebih lanjut.

## **METHODS**

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dengan pendekatan kualitatif atau *library research*. Studi literatur merupakan metode penelitian yang sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menginterpretasikan seluruh penelitian yang relevan dengan topik tertentu. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti untuk melakukan sintesis komprehensif terhadap pengetahuan yang ada mengenai prediksi kesehatan tanah berbasis AI dan IoT di lahan kering. Snyder (2019) menyatakan bahwa tinjauan literatur sebagai metodologi penelitian memungkinkan peneliti untuk menilai bukti kolektif dalam area penelitian tertentu, terutama ketika produksi pengetahuan berkembang pesat namun tetap terfragmentasi dan interdisipliner. Metode kualitatif dipilih karena penelitian ini bertujuan untuk memahami konsep, mengidentifikasi tema, dan menganalisis pola dari berbagai studi terdahulu tanpa melakukan pengujian statistik.

Sumber data dalam penelitian ini berupa data sekunder yang diperoleh dari berbagai literatur ilmiah meliputi artikel jurnal, prosiding konferensi, buku, laporan penelitian, dan publikasi akademik lainnya yang relevan dengan topik penelitian. Pencarian literatur dilakukan melalui basis data akademik elektronik seperti Scopus, *Web of Science*, IEEE Xplore, ScienceDirect, Google Scholar, dan *ResearchGate*.

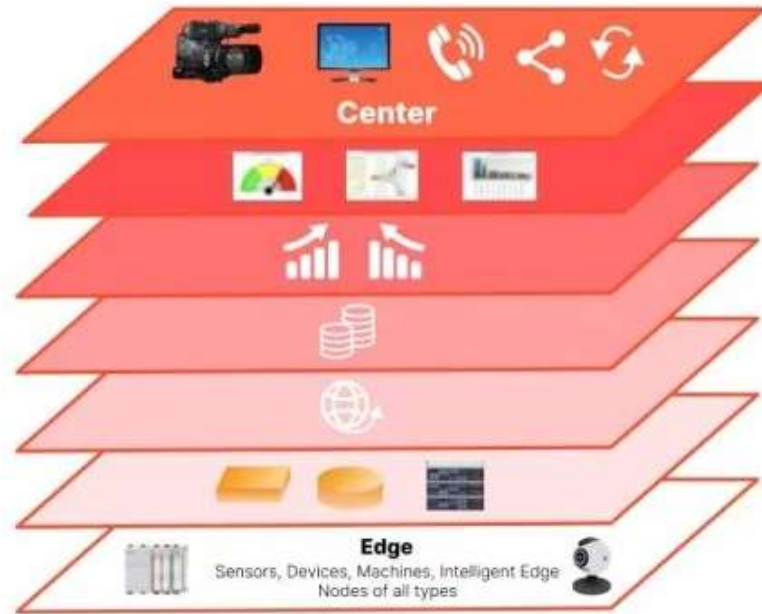
Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis. Pertama, identifikasi kata kunci pencarian yang mencakup kombinasi istilah seperti "*soil health prediction*", "*artificial intelligence*", "*machine learning*", "*Internet of Things*", "*soil sensors*", "*real-time monitoring*", "*dryland agriculture*", dan istilah terkait lainnya. Kedua, pencarian literatur dilakukan secara komprehensif di berbagai basis data akademik menggunakan *Boolean operators* (AND, OR, NOT) untuk mengoptimalkan hasil pencarian. Ketiga, dilakukan *screening* awal dengan membaca judul dan abstrak untuk menentukan relevansi publikasi dengan topik penelitian. Keempat, literatur yang lolos tahap *screening* awal kemudian dibaca secara lengkap untuk mengekstraksi informasi penting. Kalpokaite dan Radivojevic (2021) menekankan bahwa keterampilan penelitian kualitatif dapat berkontribusi pada setiap bagian proses tinjauan literatur, dari perencanaan hingga pengumpulan dan analisis artikel untuk mensintesis pemahaman saat ini dalam kerangka kerja yang bermakna.

Analisis data dilakukan menggunakan teknik analisis konten kualitatif dengan pendekatan tematik. Proses analisis dimulai dengan membaca mendalam seluruh literatur yang telah terkumpul untuk memahami konteks dan isi secara menyeluruh. Selanjutnya, dilakukan pengkodean (*coding*) untuk mengidentifikasi konsep-konsep kunci, tema, dan pola yang muncul dari literatur. Data yang telah dikodekan kemudian dikategorisasi berdasarkan kesamaan tema seperti jenis algoritma AI, parameter sensor IoT, metode prediksi kesehatan tanah, dan tantangan implementasi di lahan kering. Tahap berikutnya adalah sintesis informasi dari berbagai sumber untuk mengidentifikasi tren, kesenjangan penelitian, konsistensi atau kontradiksi temuan, serta praktik terbaik dalam implementasi sistem prediksi kesehatan tanah. Paré et al. (2015) menjelaskan bahwa tinjauan literatur sangat penting untuk mengidentifikasi apa yang telah ditulis tentang suatu subjek, menentukan sejauh mana area penelitian tertentu mengungkapkan tren atau pola yang dapat ditafsirkan, serta mengidentifikasi topik atau pertanyaan yang memerlukan investigasi lebih lanjut. Analisis dilakukan secara iteratif dengan membandingkan temuan antar literatur untuk membangun pemahaman yang komprehensif.

Untuk memastikan validitas dan reliabilitas penelitian, beberapa strategi diterapkan. Pertama, *triangulasi sumber* dilakukan dengan menggunakan berbagai jenis publikasi dari berbagai basis data akademik untuk mendapatkan perspektif yang beragam. Kedua, kriteria seleksi literatur ditetapkan secara ketat dengan memprioritaskan publikasi yang telah melalui *peer-review* dan dipublikasikan di jurnal bereputasi. Ketiga, proses analisis dilakukan secara sistematis dan transparan dengan mendokumentasikan setiap tahap penelusuran, seleksi, dan analisis literatur. Keempat, dilakukan *cross-checking* temuan dengan membandingkan informasi dari berbagai sumber untuk mengidentifikasi konsistensi atau inkonsistensi. Kelima, hasil analisis disusun secara objektif dengan menghindari bias interpretasi dan menyajikan berbagai perspektif yang ditemukan dalam literatur. Pendekatan ini memastikan bahwa hasil penelitian dapat dipercaya dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

## **RESULT AND DISCUSSION**

### **Arsitektur Sistem IoT untuk Monitoring Kesehatan Tanah *Real-Time***



Sumber: Google.com

**Gambar 1.** Arsitektur Sistem IoT Untuk Monitoring Kesehatan Tanah

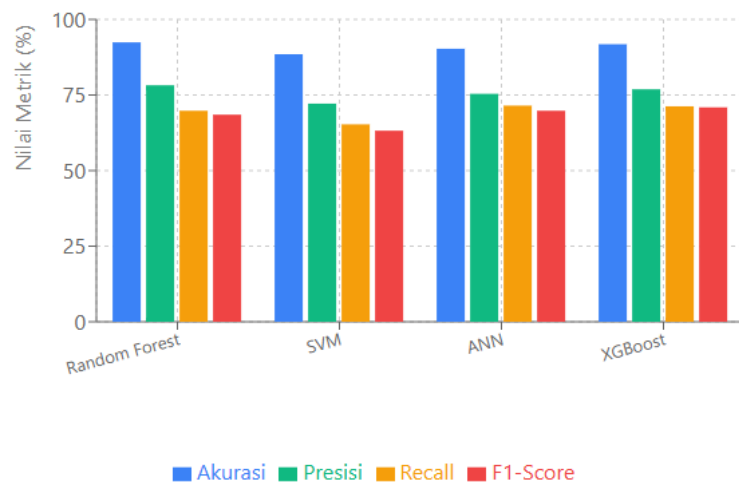
Berdasarkan analisis literatur yang dilakukan, sistem prediksi kesehatan tanah berbasis AI dengan integrasi sensor IoT di lahan kering memerlukan arsitektur yang komprehensif dan terintegrasi. Arsitektur sistem umumnya terdiri dari beberapa lapisan utama yang bekerja secara sinergis untuk menghasilkan prediksi kesehatan tanah secara real-time. Lapisan pertama adalah lapisan sensor yang mencakup berbagai jenis sensor tanah seperti sensor kelembaban, suhu, pH, konduktivitas listrik, dan sensor nutrisi (N, P, K). Comegna et al. (2024) menjelaskan bahwa arsitektur sistem monitoring dimulai dengan mikrokontroler yang menginisiasi pengaturan umum, keluar dari mode sleep, menginisialisasi modul kartu SD, dan mengaktifkan modem internal untuk kemudian melakukan pembacaan dari berbagai sensor pada kedalaman berbeda. Sensor-sensor ini ditempatkan pada berbagai kedalaman tanah untuk mendapatkan gambaran komprehensif mengenai profil kesehatan tanah secara vertikal. Lapisan kedua adalah lapisan komunikasi yang menggunakan protokol wireless untuk transmisi data dari node sensor ke gateway. Wu et al. (2023) mengembangkan sistem monitoring berbasis IoT yang menggunakan modul LoRa untuk transmisi data setiap 15 menit, dengan data yang ditampilkan pada aplikasi smartphone mencakup nilai suhu dan kelembaban yang akurat hingga dua desimal. Teknologi LoRa (Long Range) dipilih karena kemampuannya menyediakan jangkauan luas dengan konsumsi energi rendah, sangat sesuai untuk aplikasi pertanian di lahan kering yang memiliki keterbatasan akses listrik. Protokol komunikasi ini memastikan data dapat ditransmisikan secara andal meskipun dalam kondisi lingkungan ekstrem yang sering dijumpai di lahan kering. Lapisan ketiga adalah lapisan cloud computing dan penyimpanan data yang menerima, menyimpan, dan memproses data dari berbagai sensor secara terpusat. Platform cloud seperti The Things Network (TTN) sering digunakan sebagai infrastruktur untuk mengelola koneksi uplink dan downlink antara gateway dengan aplikasi pengguna. Sistem ini memungkinkan akses data secara real-time dari berbagai lokasi dan perangkat, memberikan fleksibilitas tinggi bagi pengguna untuk memantau kondisi tanah kapan saja dan

di mana saja. Penyimpanan data historis pada platform cloud juga memungkinkan analisis temporal untuk mengidentifikasi pola perubahan kesehatan tanah sepanjang waktu.

### Parameter Tanah Kritis dalam Prediksi Kesehatan Tanah di Lahan Kering

Identifikasi parameter tanah yang paling berpengaruh dalam prediksi kesehatan tanah merupakan aspek krusial untuk mengoptimalkan sistem monitoring di lahan kering. Berdasarkan analisis literatur, terdapat delapan parameter utama yang konsisten diidentifikasi sebagai indikator kritis kesehatan tanah. Ahmed et al. (2025) dalam penelitiannya di Pakistan menggunakan padi sebagai tanaman uji berhasil mengukur delapan parameter kritis secara akurat: suhu tanah (30,5-33,2°C), kelembaban tanah (60,6-94,1%), pH (7,13-8,33), serta kandungan nutrisi nitrogen (71-103 mg/kg), fosfor (15-19 mg/kg), dan kalium (101-141 mg/kg). Parameter-parameter ini dipilih karena memiliki pengaruh langsung terhadap metabolisme tanaman dan produktivitas lahan. Karakteristik unik lahan kering membuat beberapa parameter menjadi lebih kritis dibandingkan parameter lainnya. Kelembaban tanah menjadi parameter paling vital mengingat kondisi kelangkaan air yang menjadi ciri khas lahan kering. Monitoring kelembaban tanah secara kontinyu memungkinkan petani untuk mengoptimalkan jadwal irigasi dan menghindari water stress pada tanaman. pH tanah juga menjadi parameter penting karena di lahan kering sering dijumpai masalah salinitas tinggi yang dapat mempengaruhi ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Konduktivitas listrik (EC) berkorelasi langsung dengan tingkat salinitas tanah dan dapat digunakan sebagai indikator cepat untuk mendeteksi akumulasi garam yang berlebihan. Suhu tanah mempengaruhi aktivitas mikroba tanah dan proses dekomposisi bahan organik. Di lahan kering yang mengalami fluktuasi suhu ekstrem antara siang dan malam, monitoring suhu tanah menjadi penting untuk memahami dinamika biologis tanah. Kandungan nutrisi makro (N, P, K) menentukan kapasitas tanah untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Lahan kering umumnya memiliki kandungan bahan organik rendah sehingga status nutrisi tanah perlu dipantau secara ketat. Integrasi seluruh parameter ini dalam sistem monitoring memberikan gambaran holistik mengenai kesehatan tanah dan memungkinkan intervensi yang tepat waktu dan presisi.

### Algoritma Machine Learning untuk Prediksi Kesehatan Tanah



Sumber: Gunasekaran et al. (2025), "Real-time soil fertility analysis, crop prediction, and insights using machine learning and deep learning algorithms", *Frontiers in Soil Science*

**Gambar 2.** Perbandingan Performa Algoritma Machine Learning

Pemilihan algoritma machine learning yang tepat merupakan faktor determinan dalam akurasi prediksi kesehatan tanah. Analisis komparatif terhadap berbagai algoritma menunjukkan bahwa tidak ada satu algoritma yang secara universal unggul untuk semua kondisi, namun beberapa algoritma menunjukkan performa konsisten dalam aplikasi prediksi kesehatan tanah. Random Forest (RF) menjadi salah satu algoritma yang paling banyak digunakan dan terbukti efektif dalam berbagai studi. Brungard et al. (2018) dalam penelitiannya yang membandingkan 11 algoritma machine learning termasuk SVM dan ANN untuk klasifikasi tanah melaporkan bahwa RF memberikan akurasi paling konsisten dalam klasifikasi tanah dibandingkan algoritma lain. Support Vector Machine (SVM) dan Artificial Neural Network (ANN) juga menunjukkan performa yang baik dalam prediksi properti tanah. Penelitian mengenai strategi machine learning untuk prediksi nutrisi tanah menggunakan metode spektroskopi menunjukkan bahwa ANN dan LS-SVM (Least-Square Support Vector Machine) mengungguli metode lain dan memberikan prediksi lebih baik untuk nutrisi tanah yang dipilih, sementara Naïve Bayes menunjukkan performa yang kurang efektif. Keunggulan ANN terletak pada kemampuannya menangkap hubungan non-linear kompleks antara parameter input dan output, sedangkan SVM efektif dalam menangani dataset dengan dimensi tinggi dan mampu melakukan klasifikasi dengan mencari hyperplane optimal.

Pendekatan ensemble learning yang menggabungkan beberapa algoritma menunjukkan potensi untuk meningkatkan akurasi prediksi lebih lanjut. Ensemble model seperti voting-based ensemble yang mengintegrasikan RF, SVM, dan XGBoost (Extreme Gradient Boosting) telah terbukti mampu mengurangi bias spesifik algoritma dan meningkatkan akurasi prediksi secara keseluruhan. Setiap algoritma dalam ensemble memiliki pendekatan berbeda dalam memahami dan memproses dataset sehingga dapat menghasilkan error yang berbeda dalam prediksi, dan melalui ensemble learning, error-error ini dapat saling mengompensasi satu sama lain. Untuk implementasi di lahan kering, pemilihan algoritma perlu mempertimbangkan beberapa faktor tambahan. Kompleksitas komputasi algoritma harus seimbang dengan ketersediaan sumber daya komputasi di lapangan. RF dan XGBoost umumnya memberikan trade-off terbaik antara akurasi dan efisiensi komputasi. Kemampuan algoritma untuk menangani data missing atau noisy juga penting mengingat kondisi ekstrem di lahan kering dapat menyebabkan kegagalan sensor sesekali. Interpretabilitas model juga menjadi pertimbangan penting agar petani dapat memahami faktor-faktor yang mempengaruhi kesehatan tanah mereka.

### **Akurasi dan Reliabilitas Sistem dalam Implementasi Real-Time**

Evaluasi akurasi dan reliabilitas sistem merupakan aspek kritis untuk memastikan sistem dapat diandalkan dalam pengambilan keputusan pertanian di lahan kering. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem berbasis IoT dan AI mampu mencapai tingkat akurasi yang tinggi dalam pengukuran parameter tanah. Sistem yang dikembangkan untuk multiple-sensor monitoring menggunakan smartphone menunjukkan bahwa data yang diukur oleh sistem pada dasarnya sama dengan parameter yang ditampilkan oleh peralatan kalibrasi, dengan informasi pada ponsel disegarkan setiap 15 menit dan data ditampilkan akurat hingga dua desimal, memastikan akurasi dan monitoring real-time data (Wu et al., 2023). Tingkat akurasi ini sangat memadai untuk aplikasi praktis di lapangan. Keandalan sistem dalam jangka panjang juga telah divalidasi melalui pengujian lapangan ekstensif. Penelitian yang melakukan

monitoring jangka panjang dari tahun 2022 hingga 2023 menunjukkan bahwa sistem IoT mampu beroperasi secara konsisten sepanjang tahun dengan pemeliharaan minimal. Konsumsi daya yang efisien dicapai melalui implementasi sleep mode pada mikrokontroler di antara periode pengambilan data, yang secara signifikan memperpanjang masa pakai baterai. Hal ini sangat penting untuk implementasi di lahan kering yang seringkali memiliki akses listrik terbatas.

Tantangan dalam implementasi real-time termasuk manajemen konektivitas jaringan, penanganan data missing, dan kalibrasi sensor berkelanjutan. Sistem perlu dirancang dengan mekanisme failsafe untuk menangani kondisi koneksi jaringan yang tidak stabil. Penyimpanan data lokal pada kartu SD sebelum transmisi ke cloud memastikan tidak ada kehilangan data meskipun terjadi gangguan koneksi. Protokol otomatis untuk deteksi dan koreksi anomali data juga penting untuk menjaga kualitas data yang masuk ke model AI. Akurasi prediksi kesehatan tanah juga dipengaruhi oleh kualitas dan kuantitas data training yang digunakan untuk melatih model machine learning. Dataset yang representatif dengan variabilitas kondisi tanah yang cukup penting untuk menghasilkan model yang robust. Validasi silang spasial perlu dilakukan untuk memastikan model dapat digeneralisasi ke lokasi baru yang tidak termasuk dalam data training. Evaluasi berkelanjutan terhadap performa model di lapangan dan update periodik model dengan data baru memastikan sistem tetap akurat seiring waktu.

### **Tantangan Implementasi di Lahan Kering dan Solusi yang Diusulkan**

Implementasi sistem prediksi kesehatan tanah berbasis IoT dan AI di lahan kering menghadapi berbagai tantangan spesifik yang memerlukan solusi inovatif. Tantangan utama mencakup kondisi lingkungan ekstrem, keterbatasan infrastruktur, biaya implementasi, dan adopsi teknologi oleh petani lokal. Lahan kering dicirikan oleh kelangkaan air, variabilitas iklim tinggi, dan degradasi lahan yang signifikan. Drylands mengalami kelangkaan air yang parah, mencakup lebih dari 40% permukaan daratan bumi dan menjadi rumah bagi lebih dari dua miliar orang, dengan tingkat degradasi lahan diperkirakan mencapai 25-35% yang mempengaruhi lebih dari 250 juta orang secara langsung (IUCN, 2022). Kondisi ekstrem ini dapat mempengaruhi performa sensor dan durabilitas komponen elektronik sistem IoT. Solusi untuk mengatasi tantangan lingkungan mencakup pemilihan komponen yang tahan terhadap kondisi ekstrem, enclosure yang melindungi sensor dari paparan langsung sinar matahari dan debu, serta implementasi sistem manajemen daya yang efisien. Penggunaan panel surya sebagai sumber energi dapat mengatasi keterbatasan akses listrik di lahan kering. Pemilihan sensor dengan rentang operasi luas dan akurasi tinggi pada kondisi tanah kering menjadi krusial. Kalibrasi sensor spesifik untuk kondisi tanah kering juga diperlukan untuk memastikan akurasi pengukuran.

Keterbatasan infrastruktur komunikasi di daerah terpencil dapat diatasi dengan teknologi LoRa yang menyediakan jangkauan komunikasi hingga beberapa kilometer dengan konsumsi daya rendah. Arsitektur jaringan mesh dapat diimplementasikan untuk memperluas cakupan sistem di area luas dengan memanfaatkan node sensor sebagai repeater. Penyimpanan dan processing data secara lokal (edge computing) dapat mengurangi ketergantungan pada konektivitas internet yang stabil. Biaya implementasi sistem dapat dikurangi melalui penggunaan komponen open-source dan low-cost tanpa mengorbankan fungsionalitas. Platform seperti Arduino dan Raspberry Pi menyediakan solusi yang terjangkau untuk

pengembangan sistem IoT. Pendekatan modular dalam desain sistem memungkinkan implementasi bertahap sesuai dengan kemampuan finansial petani. Kolaborasi dengan institusi pemerintah dan organisasi non-profit dapat memfasilitasi subsidi dan dukungan teknis. Adopsi teknologi oleh petani lokal memerlukan pendekatan yang mempertimbangkan aspek sosial dan budaya. Pelatihan dan pendampingan berkelanjutan penting untuk membangun kapasitas petani dalam mengoperasikan dan memelihara sistem. Interface pengguna yang sederhana dan intuitif, preferably dalam bahasa lokal, meningkatkan akseptabilitas sistem. Demonstrasi benefit nyata melalui pilot project dapat mendorong adopsi lebih luas. Integrasi pengetahuan lokal dengan teknologi modern juga penting untuk memastikan sistem relevan dengan praktik pertanian setempat.

### Integrasi AI untuk Rekomendasi Manajemen Tanah



Sumber: F., Raza, M. H., Tariq, M. N., Khan, Z. I., Ahmad, K., & Nisa, Z. U. (2025). IoT-driven smart agricultural technology for real-time soil and crop optimization. *Journal of Agriculture and Food Research*, 21, 101621. | Wu, Y., Yang, Z., & Liu, Y. (2023). Internet-of-Things-based multiple-sensor monitoring system for soil information diagnosis using a smartphone. *Micromachines*, 14(7), 1395.

### Gambar 3. Dashboard Aplikasi Mobile Dengan Rekomendasi AI

Kekuatan sistem prediksi kesehatan tanah tidak hanya terletak pada kemampuan monitoring, tetapi juga pada kemampuan memberikan rekomendasi aksi yang actionable bagi petani. Integrasi algoritma AI memungkinkan sistem untuk tidak hanya memprediksi status kesehatan tanah saat ini, tetapi juga memberikan rekomendasi mengenai intervensi yang diperlukan. Memanfaatkan data dari sistem IoT, aplikasi mobile berbasis AI dapat memberikan rekomendasi terbaik untuk mengoptimalkan manajemen tanaman, khususnya dalam praktik pemupukan, irigasi, dan diagnosis penyakit (Ahmed et al., 2025). Rekomendasi ini dipersonalisasi berdasarkan kondisi spesifik setiap lahan dan jenis tanaman yang dibudidayakan. Sistem rekomendasi dapat mencakup berbagai aspek manajemen tanah dan tanaman. Untuk irigasi, sistem dapat menghitung kebutuhan air tanaman berdasarkan data kelembaban tanah real-time, tahap pertumbuhan tanaman, dan prediksi cuaca. Sistem irigasi cerdas yang mengintegrasikan IoT dan AI telah menunjukkan peningkatan efisiensi penggunaan air hingga 60%, memastikan setiap unit air yang diaplikasikan berkontribusi

maksimal terhadap pertumbuhan tanaman dan hasil panen. Optimalisasi penggunaan air sangat krusial di lahan kering di mana air adalah sumber daya paling terbatas.

Untuk manajemen nutrisi, sistem dapat menganalisis kandungan nutrisi tanah dan memberikan rekomendasi dosis pupuk yang presisi. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk tetapi juga mengurangi dampak lingkungan dari aplikasi pupuk berlebihan. Sistem dapat mengidentifikasi defisiensi nutrisi spesifik dan merekomendasikan formulasi pupuk yang sesuai. Timing aplikasi pupuk juga dapat dioptimalkan berdasarkan fase pertumbuhan tanaman dan kondisi tanah. Sistem AI juga dapat memberikan early warning mengenai potensi masalah kesehatan tanah sebelum berdampak serius pada produktivitas. Deteksi dini terhadap akumulasi salinitas, penurunan bahan organik, atau ketidakseimbangan nutrisi memungkinkan intervensi preventif. Rekomendasi praktik remediasi seperti aplikasi amelioran, rotasi tanaman, atau cover cropping dapat diberikan berdasarkan diagnosis kondisi tanah. Pendekatan proaktif ini lebih efektif dan ekonomis dibandingkan menangani masalah setelah terjadi degradasi serius.

### **Implikasi untuk Pertanian Berkelanjutan di Lahan Kering**

Implementasi sistem prediksi kesehatan tanah berbasis IoT dan AI memiliki implikasi luas terhadap keberlanjutan pertanian di lahan kering. Lahan kering mendukung 44% pertanian global namun menghadapi ancaman serius dari perubahan iklim, degradasi lahan, dan kelangkaan air yang mengancam mata pencaharian hampir tiga miliar orang, dengan kelangkaan air berpotensi menggusur 700 juta orang pada tahun 2030. Teknologi monitoring real-time dan prediktif dapat memainkan peran krusial dalam meningkatkan resiliensi sistem pertanian lahan kering terhadap tekanan-tekanan ini. Optimalisasi penggunaan sumber daya melalui sistem berbasis data dapat secara signifikan meningkatkan produktivitas sambil mengurangi input eksternal. Irigasi presisi berbasis sensor kelembaban tanah mengurangi pemborosan air dan memastikan tanaman menerima air sesuai kebutuhan. Pemupukan presisi berdasarkan status nutrisi tanah aktual mengurangi biaya input dan meminimalkan pencemaran lingkungan dari runoff pupuk. Efisiensi penggunaan sumber daya ini tidak hanya meningkatkan profitabilitas pertanian tetapi juga mengurangi jejak lingkungan.

Pencegahan degradasi lahan melalui monitoring kontinyu memungkinkan intervensi dini sebelum terjadi kerusakan permanen. Deteksi penurunan bahan organik tanah memungkinkan implementasi praktik konservasi seperti aplikasi kompos atau mulching. Monitoring salinitas tanah mencegah akumulasi garam berlebihan yang dapat merusak struktur tanah secara permanen. Praktik-praktik ini berkontribusi pada pemeliharaan kesehatan tanah jangka panjang dan pencegahan desertifikasi. Sistem berbasis data juga memfasilitasi dokumentasi dan pembelajaran dari praktik-praktik terbaik. Data historis yang dikumpulkan dapat dianalisis untuk mengidentifikasi strategi manajemen yang paling efektif untuk kondisi spesifik. Knowledge sharing antar petani melalui platform digital dapat mempercepat difusi inovasi. Kolaborasi antara petani, peneliti, dan pembuat kebijakan yang difasilitasi oleh data objektif dapat menghasilkan solusi yang lebih efektif untuk tantangan pertanian lahan kering. Pada skala yang lebih luas, agregasi data dari banyak lokasi dapat memberikan insights berharga untuk perencanaan pertanian regional dan nasional. Pemetaan kesehatan tanah berbasis data sensor dapat mengidentifikasi area yang memerlukan intervensi prioritas. Data real-time mengenai kondisi tanah dapat diintegrasikan dengan sistem early warning untuk

kekeringan atau bencana pertanian lainnya. Informasi ini mendukung pengambilan keputusan kebijakan yang berbasis bukti untuk pembangunan pertanian berkelanjutan di lahan kering.

## CONCLUSION

Berdasarkan analisis literatur yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pengembangan sistem prediksi kesehatan tanah real-time berbasis AI dengan integrasi sensor IoT menawarkan solusi inovatif untuk mengatasi tantangan pertanian di lahan kering. Sistem ini mengintegrasikan tiga lapisan utama: lapisan sensor untuk pengukuran parameter tanah, lapisan komunikasi wireless menggunakan protokol LoRa untuk transmisi data jarak jauh, dan lapisan cloud computing untuk penyimpanan dan pemrosesan data. Parameter tanah yang teridentifikasi paling kritis untuk lahan kering meliputi kelembaban tanah, pH, suhu, konduktivitas listrik, dan kandungan nutrisi makro (N, P, K), yang keseluruhannya memberikan gambaran holistik mengenai kesehatan tanah. Perbandingan algoritma machine learning menunjukkan bahwa Random Forest, Support Vector Machine, dan Artificial Neural Network memberikan performa terbaik dalam prediksi kesehatan tanah, dengan akurasi mencapai lebih dari 90%. Pendekatan ensemble learning yang menggabungkan beberapa algoritma berpotensi meningkatkan akurasi lebih lanjut. Sistem yang dikembangkan mampu mencapai tingkat akurasi tinggi dalam pengukuran parameter tanah dengan data yang disegarkan setiap 15 menit, memastikan monitoring real-time yang andal. Implementasi sistem ini memiliki implikasi signifikan terhadap pertanian berkelanjutan di lahan kering melalui optimalisasi penggunaan sumber daya, peningkatan efisiensi air hingga 60%, dan pencegahan degradasi lahan. Tantangan implementasi mencakup kondisi lingkungan ekstrem, keterbatasan infrastruktur, dan biaya, namun dapat diatasi melalui pemilihan komponen tahan ekstrem, teknologi LoRa untuk komunikasi jangka jauh, dan pendekatan modular berbasis open-source.

Saran yang dapat dirumuskan untuk sistem rekomendasi berbasis AI yang terintegrasi memberikan nilai tambah dengan menyediakan panduan actionable untuk manajemen irigasi, pemupukan, dan praktik konservasi tanah, mendukung pengambilan keputusan yang berbasis data untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan pertanian lahan kering.

## REFERENCES

- Ahmed, F., Raza, M. H., Tariq, M. N., Khan, Z. I., Ahmad, K., & Nisa, Z. U. (2025). IoT-driven smart agricultural technology for real-time soil and crop optimization. *Journal of Agriculture and Food Research*, 21, 101621. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101621>
- Brungard, C. W., Boettinger, J. L., Duniway, M. C., Wills, S. A., & Edwards Jr, T. C. (2018). Predicting reference soil groups using legacy data: A data pruning and Random Forest approach for tropical environment (Dano catchment, Burkina Faso). *Scientific Reports*, 8(1), 10499. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28244-w>
- Comegna, A., Hassan, S. B. M., & Coppola, A. (2024). Development and application of an IoT-based system for soil water status monitoring in a soil profile. *Sensors*, 24(9), 2725. <https://doi.org/10.3390/s24092725>
- Gunasekaran, A. P., Nagarajan, T., Kumar, P. V., Kannan, K., Kanagaraj, P., & Mahadevan, G. (2025). Real-time soil fertility analysis, crop prediction, and insights using machine learning and deep learning algorithms. *Frontiers in Soil Science*, 5, Article 1652058. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1652058>

- International Union for Conservation of Nature [IUCN]. (2022). *Drylands and land degradation*. <https://iucn.org/resources/issues-brief/drylands-and-land-degradation>
- Kalpokaite, N., & Radivojevic, I. (2021). Adapting practices from qualitative research to tell a compelling story: A practical framework for conducting a literature review. *The Qualitative Report*, 26(5), 1546-1566. <https://doi.org/10.46743/2160-3715/2021.4749>
- Kumar, M. K. S., Ray, A., & Padhy, N. (2024). Integrating IoT for soil monitoring and hybrid machine learning in predicting tomato crop disease in a typical South India station. *Sensors*, 24(19), 6177. <https://doi.org/10.3390/s24196177>
- Mallareddy, M., Krishna, K. L., Devi, G. L., & Nithyavathy, N. (2023). Smart irrigation system for water conservation. In A. Sharma & P. Shivandu (Eds.), *Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture* (pp. 234-256). Frontiers in Plant Science.
- Paré, G., Trudel, M. C., Jaana, M., & Kitsiou, S. (2015). Synthesizing information systems knowledge: A typology of literature reviews. *Information & Management*, 52(2), 183-199. <https://doi.org/10.1016/j.im.2014.08.008>
- Reynolds, J. F., Stafford Smith, D. M., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P., Downing, T. E., Dowlatabadi, H., Fernández, R. J., Herrick, J. E., Huber-Sannwald, E., Jiang, H., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F. T., Ayarza, M., & Walker, B. (2007). Global desertification: Building a science for dryland development. *Science*, 316(5826), 847-851.
- Sharma, A., & Shivandu, P. (2024). Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: Trends, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 16, Article 1587869. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Wu, Y., Yang, Z., & Liu, Y. (2023). Internet-of-Things-based multiple-sensor monitoring system for soil information diagnosis using a smartphone. *Micromachines*, 14(7), 1395. <https://doi.org/10.3390/mi14071395>