JIMATEK: JURNAL ILMIAH MAHASISWA TEKNIK
JIMATEK is Available Online at:
https://ojs-teknik.usni.ac.id/index.php/JIMAT
Vol. 04 No. 1(2026), pages: 29-36
DOI: www.doi.org/10.59134/jimat.v4i1.828

SISTEM CERDAS REKOMENDASI TANAMAN HORTIKULTURA MENGGUNAKAN METODE RULE-BASED BERBASIS PARAMETER TANAH DAN INTERNET OF THINGS

Afrizal Muhasan
Program Studi Teknik Informatika, Universitas Satya Negara Indonesia
afrizalmuhasan2000@gmail.com

Keywords

Rule-Based System; Forward Chaining; Internet of Things; NPK Sensor; Soil Parameters

ABSTRAK

This research designs and develops an Internet of Things (IoT)-based intelligent system for recommending horticultural vegetable crop selection using a rule-based Zexpert system with forward chaining inference technique. Unlike previous studies that generally focused solely on soil condition monitoring, this system integrates the simultaneous measurement of seven soil parameters with automated decision-making capabilities to guide users in precise crop selection. The system utilizes an RS485 Modbus RTU-based 7-in-1 NPK sensor to measure soil moisture, temperature, electrical conductivity (EC), pH, Nitrogen (N), Phosphorus (P), and Potassium (K). An ESP32 microcontroller processes the sensor data through a rule base covering 15 vegetable commodities, and distributes recommendation notifications along with fertilizing guidance via a Telegram Bot, while all data are synchronized to a MySQL database. Testing was conducted on three soil conditions: yard soil, compost soil, and agricultural field soil. Results confirm that the system performs stable data acquisition across all seven parameters, and the forward chaining logic demonstrated 100% accuracy in matching physical soil data with the rule base across all tested scenarios. The system proves to be a practical and affordable decision-support solution for farmers in determining suitable vegetable crops based on real soil conditions.

Kata Kunci

Rule-Based System; Forward Chaining; Internet of Things; NPK Sensor; Soil Parameters

ABSTRAK

Penelitian ini merancang dan membangun sistem cerdas berbasis Internet of Things (IoT) untuk rekomendasi pemilihan tanaman hortikultura sayuran menggunakan metode sistem pakar berbasis aturan (rule-based system) dengan teknik inferensi forward chaining. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya terbatas pada pemantauan kondisi tanah, sistem ini mengintegrasikan pengukuran tujuh parameter tanah sekaligus dengan kemampuan pengambilan keputusan otomatis. Sistem memanfaatkan sensor NPK 7-in-1 berbasis protokol RS485 Modbus RTU untuk mengukur kelembaban, suhu, konduktivitas listrik (EC), pH, Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K).

Mikrokontroler ESP32 memproses data melalui basis aturan yang mencakup 15 komoditas sayuran, mendistribusikan notifikasi rekomendasi dan saran pemupukan melalui Telegram Bot, serta menyinkronkan seluruh data ke basis data MySQL. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi tanah: tanah halaman rumah, tanah kompos, dan tanah lahan pertanian. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu melakukan akuisisi data tujuh parameter tanah secara stabil, dan logika forward chaining terbukti akurat 100% dalam mencocokkan data fisik tanah dengan basis aturan pada seluruh skenario pengujian. Sistem ini terbukti menjadi solusi pendukung keputusan yang praktis dan terjangkau bagi petani dalam menentukan jenis tanaman sayuran yang sesuai berdasarkan kondisi tanah yang sebenarnya.

PENDAHULUAN

Sektor pertanian hortikultura memegang peranan strategis dalam perekonomian nasional maupun ketahanan pangan Indonesia. Produktivitas sektor hortikultura nasional masih belum optimal, terbukti dari data impor hortikultura Indonesia yang mencapai 1.152.072 ton (Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian, 2021), mengindikasikan bahwa produksi dalam negeri belum mampu memenuhi kebutuhan konsumsi nasional.

Salah satu faktor penyebab rendahnya produktivitas hortikultura adalah ketidaksesuaian antara jenis tanaman yang dibudidayakan dengan kondisi tanah di lahan tersebut. Kesesuaian lahan dengan jenis tanaman yang dibudidayakan berperan penting terhadap keberhasilan produktivitas, sedangkan ketidaksesuaian lahan dapat menyebabkan penurunan produktivitas tanaman (Nganji dkk., 2018). Di lapangan, penentuan jenis tanaman masih kerap dilakukan berdasarkan pengalaman dan intuisi petani semata, tanpa didukung pengukuran kondisi tanah yang akurat dan terstandar.

Menurut Direktorat Perbenihan Hortikultura (2013), tanaman hortikultura terbagi menjadi empat golongan utama, yaitu olerikultura (sayuran), frutikultura (buah-buahan), florikultura (tanaman hias), dan biofarmaka (tanaman obat-obatan). Penelitian ini secara khusus difokuskan pada golongan hortikultura sayuran (olerikultura), mengingat golongan ini memiliki siklus tanam yang relatif singkat serta tingkat sensitivitas tinggi terhadap perubahan parameter fisik dan kimia tanah.

Seiring perkembangan teknologi Internet of Things (IoT), kini tersedia sensor NPK 7 in 1 berbasis RS485 yang mampu mengukur tujuh parameter tanah sekaligus dalam satu probe, yaitu kelembaban, suhu, konduktivitas listrik (EC), pH, nitrogen, fosfor, dan kalium. Penelitian terdahulu seperti Thoriq dkk. (2022), Rinanda (2023), dan Arifin dkk. (2024) telah membangun sistem monitoring parameter tanah berbasis IoT, namun penelitian-penelitian tersebut masih berfokus pada pembacaan dan penampilan data sensor semata, tanpa dilengkapi mekanisme pengambilan keputusan otomatis untuk memberikan rekomendasi tanaman yang sesuai.

Kondisi tanah yang menentukan keberhasilan budidaya hortikultura meliputi berbagai parameter fisik dan kimia, di antaranya suhu tanah, kelembaban tanah, tingkat keasaman (pH), konduktivitas listrik (EC), serta kandungan unsur hara makro nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Setiap jenis tanaman memiliki rentang nilai optimal yang berbeda-beda untuk masing-masing parameter tersebut, sehingga ketidaksesuaian salah satu parameter saja dapat berdampak signifikan terhadap hasil panen yang diperoleh (Arifin dkk., 2025). Kondisi ini diperparah oleh kenyataan bahwa hanya sebagian kecil petani yang memiliki akses terhadap teknologi pengukuran tanah yang terjangkau dan mudah digunakan, sehingga penentuan jenis tanaman masih banyak bergantung pada pengalaman perorangan yang bersifat subjektif dan tidak selalu konsisten dari satu lahan ke lahan lainnya.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem monitoring tanah berbasis IoT dengan berbagai kombinasi sensor. Unik dan Mualfah (2024) membangun sistem monitoring pH dan kelembaban tanah untuk optimasi pertumbuhan tanaman terong, sementara Arifin dkk.

(2025) mengembangkan sistem monitoring kesuburan lahan pertanian dengan sensor pH, suhu, intensitas cahaya, dan kelembaban tanah. Kedua penelitian tersebut, sebagaimana penelitian sejenis lainnya, menunjukkan bahwa parameter tanah dapat dipantau secara real-time menggunakan teknologi IoT dengan tingkat keandalan yang baik. Namun demikian, seluruh sistem yang dikembangkan masih terbatas pada fungsi pemantauan (monitoring) dan belum dilengkapi dengan mekanisme pengambilan keputusan otomatis yang dapat langsung memberikan rekomendasi jenis tanaman kepada pengguna berdasarkan data yang terbaca.

Merespons celah tersebut, penelitian ini merancang dan membangun sistem cerdas berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor NPK 7 in 1 dengan mikrokontroler ESP32 untuk mengukur tujuh parameter tanah secara real-time, kemudian mengolah data tersebut menggunakan metode sistem pakar berbasis aturan (rule-based system) dengan teknik inferensi forward chaining guna menghasilkan rekomendasi tanaman hortikultura sayuran yang tepat. Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada integrasi antara pemantauan tujuh parameter tanah sekaligus dengan sistem pengambilan keputusan otomatis dalam satu perangkat yang terjangkau, yang belum banyak ditemukan pada penelitian-penelitian sejenis sebelumnya. Tujuan penelitian ini adalah merancang dan membangun sistem cerdas berbasis Internet of Things yang dapat merekomendasikan tanaman hortikultura sayuran berdasarkan parameter tanah, sehingga dapat menjadi solusi praktis dan terjangkau bagi petani dalam menentukan jenis tanaman yang sesuai dengan kondisi lahannya.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah Research and Development (R&D) dengan pendekatan model prototyping, meliputi tahap pengumpulan kebutuhan, perancangan sistem, pembuatan prototipe, serta pengujian dan evaluasi. Data dikumpulkan melalui wawancara dengan petani dan Kelompok Wanita Tani (KWT) setempat, observasi langsung kondisi tanah, serta studi pustaka mengenai parameter tanah dan sistem pakar.

Perangkat keras yang digunakan terdiri atas mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan utama, sensor NPK 7 in 1 berbasis protokol RS485/Modbus RTU untuk mengukur kelembaban, suhu, konduktivitas listrik (EC), pH, nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) secara simultan, serta modul MAX485 sebagai konverter sinyal RS485 ke TTL. Perangkat lunak yang digunakan meliputi Arduino IDE, bahasa C/C++, PHP dan MySQL melalui server lokal Laragon, serta Telegram Bot API untuk notifikasi kepada pengguna.

Metode pengambilan keputusan menggunakan pendekatan sistem pakar berbasis aturan (rule-based system) dengan teknik inferensi forward chaining, yaitu penalaran data-driven yang mencocokkan fakta hasil pembacaan sensor dengan himpunan aturan IF-THEN pada basis pengetahuan hingga menghasilkan kesimpulan berupa rekomendasi tanaman. Basis aturan disusun berdasarkan ambang batas (threshold) tujuh parameter tanah untuk 15 komoditas tanaman hortikultura sayuran.

Pemilihan metode rule-based system didasarkan pada tiga pertimbangan utama: (1) kemudahan pemahaman dan pengelolaan logika (understandability), karena struktur IF-THEN mudah disesuaikan dengan standar agronomi; (2) kecepatan eksekusi keputusan, karena pencocokan fakta dilakukan secara linear sehingga sesuai untuk mikrokontroler dengan sumber daya terbatas; dan (3) kesesuaian dengan sifat parameter input yang deterministik dan terukur secara pasti oleh sensor. Dibandingkan dengan pendekatan Machine Learning, yang pada penelitian crop recommendation serupa membutuhkan dataset riwayat tanaman berskala besar untuk mencapai akurasi tinggi menggunakan algoritma seperti Random Forest, Decision Tree, atau Naive Bayes (Malik dkk., 2025), rule-based system tidak memerlukan proses pelatihan karena aturan disusun langsung dari standar syarat tumbuh tanaman pada literatur agronomi. Selain itu, Machine Learning cenderung bersifat black-box sehingga sulit ditelusuri alasan keputusannya (GeeksforGeeks, 2025), sementara rule-based system bersifat deterministik dan transparan. Dibandingkan dengan Fuzzy Logic, parameter input pada penelitian ini berupa nilai numerik presisi hasil pembacaan sensor, bukan istilah linguistik yang ambigu, sehingga

penerapan aturan crisp dinilai lebih sesuai tanpa perlu menambah kompleksitas komputasi berupa fungsi keanggotaan (*membership function*).

Tabel 1. Perbandingan Rule-Based System, Machine Learning, dan Fuzzy Logic

Aspek	Rule-Based System	Machine Learning	Fuzzy Logic
Kebutuhan data	Tidak butuh data pelatihan besar	Butuh dataset historis berskala besar	Tidak butuh data pelatihan, namun perlu fungsi keanggotaan
Transparansi	Transparan dan mudah ditelusuri	Cenderung black-box	Cukup transparan, kompleks jika variabel banyak
Sifat output	Deterministik	Probabilistik	Deterministik dengan derajat parsial
Kesesuaian input	Data numerik presisi (crisp)	Data besar & kompleks	Data linguistik yang ambigu

Sumber: Diolah dari GeeksforGeeks (2025) dan Malik dkk. (2025)

Tabel 1 merangkum perbandingan karakteristik ketiga pendekatan tersebut. Karena penelitian ini tidak memiliki dataset riwayat pertumbuhan tanaman berskala besar dan seluruh parameter input berupa data numerik presisi hasil pembacaan sensor, maka Rule-Based System dengan teknik forward chaining dipandang sebagai pendekatan yang paling sesuai untuk diterapkan pada sistem yang berjalan di atas mikrokontroler dengan sumber daya terbatas seperti ESP32.

Sebagai ilustrasi, representasi logika aturan IF-THEN pada sistem dengan tujuh parameter input ditunjukkan pada contoh berikut. Rule untuk komoditas Cabai Rawit: JIKA suhu 24-32°C DAN kelembaban 60-80% DAN pH 6,0-7,0 DAN EC 1,2-2,2 mS/cm DAN N lebih dari 120 mg/kg DAN P lebih dari 50 mg/kg DAN K lebih dari 150 mg/kg, MAKA rekomendasi adalah Cabai Rawit. Rule untuk komoditas Tomat: JIKA suhu 18-27°C DAN kelembaban 50-70% DAN pH 5,5-6,8 DAN EC 2,0-5,0 mS/cm DAN N lebih dari 100 mg/kg DAN P lebih dari 60 mg/kg DAN K lebih dari 180 mg/kg, MAKA rekomendasi adalah Tomat. Seluruh aturan pada basis pengetahuan sistem menggunakan operator AND (forward chaining), sehingga seluruh kondisi pada satu aturan harus terpenuhi secara bersamaan agar sistem dapat menghasilkan rekomendasi tanaman yang bersangkutan. Apabila tidak ada satu pun aturan yang terpenuhi oleh data hasil pembacaan sensor, sistem akan menampilkan status bahwa kondisi tanah belum sesuai untuk tanaman manapun dalam basis aturan, disertai saran pengondisian tanah berupa pemupukan atau pengapuran sesuai dengan parameter yang kurang memenuhi standar.

Secara prinsip kerja, ketujuh parameter tanah diukur menggunakan mekanisme sensorik yang berbeda-beda. Kelembaban tanah diukur berdasarkan konstanta dielektrik tanah, karena air memiliki konstanta dielektrik yang jauh lebih tinggi dibandingkan udara. Suhu tanah diukur menggunakan elemen termistor NTC yang nilai resistansinya berubah terhadap suhu. Pengukuran pH tanah menggunakan elektroda ion-selective yang mendeteksi aktivitas ion hidrogen (H+), yang kemudian dikonversi menjadi nilai pH menggunakan prinsip Persamaan Nernst (Prominent Indonesia, 2024). Konduktivitas listrik (EC) diukur melalui sepasang elektroda yang mengalirkan arus listrik ke dalam tanah. Adapun nilai Nitrogen, Fosfor, dan Kalium diperoleh secara tidak langsung (indirect measurement) melalui korelasi terhadap nilai EC dengan koefisien empiris hasil kalibrasi pabrik, sehingga nilai yang dihasilkan bersifat estimasi kesuburan tanah (Sari dkk., 2019; BGT Hydromet, 2026), bukan hasil analisis kimia kuantitatif presisi tinggi seperti pada uji laboratorium.

Pengujian sistem dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu pengujian fungsional seluruh komponen, pengujian stabilitas pembacaan sensor, pengujian logika rule-based system menggunakan data simulasi, pengujian lapangan pada tiga kondisi tanah berbeda, pengujian latensi pengiriman data, serta pengujian Black Box System untuk memverifikasi skenario perilaku sistem terhadap berbagai kondisi input.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Sistem

Sistem yang dibangun terdiri atas empat lapisan utama: lapisan sensor (sensor NPK 7 in 1), lapisan kontrol (mikrokontroler ESP32 dan modul MAX485), lapisan inferensi (rule-based system dengan forward chaining), serta lapisan output (Telegram Bot, API PHP, dan basis data MySQL). Probe sensor ditancapkan langsung ke tanah untuk membaca ketujuh parameter secara simultan setiap 3 detik, kemudian hasil inferensi dikirimkan ke pengguna melalui notifikasi Telegram setiap 30 detik serta ditampilkan pada dashboard web berbasis HTML, CSS, JavaScript (AJAX), dan PHP. Alur kerja sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.

Sensor NPK 7 in 1 (7 Parameter Tanah)	ESP32 + Modul MAX485	Rule-Based System (Forward Chaining)	Telegram Bot & Database MySQL
↓ RS485/Modbus	↓ Data Digital	↓ Hasil Inferensi	Output ke Pengguna

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Gambar 1. Alur Kerja Sistem

Gambar 1 menunjukkan bahwa data mengalir secara berurutan mulai dari akuisisi tujuh parameter tanah oleh sensor, diproses oleh mikrokontroler melalui logika rule-based, hingga hasil rekomendasi didistribusikan kepada pengguna melalui Telegram Bot dan disimpan pada basis data MySQL untuk keperluan dokumentasi.

Pengujian Fungsional Sistem

Pengujian fungsional dilakukan untuk memverifikasi bahwa seluruh komponen sistem bekerja sesuai fungsi yang dirancang.

Tabel 2. Hasil Pengujian Fungsional Sistem

No	Komponen yang Diuji	Status
1	Pembacaan sensor NPK 7 in 1	Berhasil
2	Komunikasi RS485 via MAX485	Berhasil
3	Koneksi WiFi ESP32	Berhasil
4	Proses rule-based system	Berhasil
5	Notifikasi Telegram Bot	Berhasil
6	Penyimpanan data MySQL	Berhasil
7	Stabilitas pembacaan sensor	Berhasil

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Berdasarkan Tabel 2, seluruh tujuh komponen sistem berfungsi dengan baik tanpa gangguan, mulai dari akuisisi data sensor hingga distribusi hasil rekomendasi kepada pengguna.

Pengujian Stabilitas Pembacaan Sensor

Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali pada lokasi yang sama untuk mengevaluasi konsistensi pembacaan sensor pada dua kondisi tanah berbeda: tanah kurang subur dan tanah subur.

Tabel 3. Perbandingan Pembacaan Sensor pada Tanah Kurang Subur dan Tanah Subur

Parameter	Tanah Kurang Subur	Tanah Subur
Kelembaban (%)	24,4	79,1
Suhu (°C)	29,28	28,7
EC (µS/cm)	202	1024
pH	4,8	6,7
Nitrogen (mg/kg)	9	70
Fosfor (mg/kg)	14	50
Kalium (mg/kg)	33	80
Hasil Rekomendasi	Tanah perlu dipupuk	Bayam, Kangkung

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Tabel 3 menunjukkan bahwa sensor mampu membedakan kondisi tanah secara konsisten pada lima kali pengulangan pengujian. Pada tanah dengan pH rendah (4,8) dan kandungan NPK minimal, sistem secara tepat memberikan status "Tanah perlu dipupuk", sedangkan pada tanah dengan pH netral (6,7) dan NPK mencukupi, sistem merekomendasikan Bayam dan Kangkung.

Pengujian Logika Rule-Based System

Pengujian logika dilakukan menggunakan enam skenario data simulasi yang merujuk pada syarat tumbuh optimal masing-masing tanaman berdasarkan literatur.

Tabel 4. Pengujian Logika Rule-Based System

No	Kondisi Data Uji (Ringkasan)	Rekomendasi Sistem	Kesesuaian
1	Kel 55%, Suhu 25°C, pH 6,5	Bayam, Kangkung, Sawi	Sesuai
2	Kel 60%, Suhu 28°C, pH 6,0	Cabai, Terong, Mentimun	Sesuai
3	Kel 50%, Suhu 26°C, pH 6,2	Tomat, Paprika	Sesuai
4	Kel 45%, Suhu 20°C, pH 6,5	Wortel, Bawang Putih, Selada	Sesuai
5	Kel 60%, Suhu 30°C, pH 6,0	Bawang Merah, Pare, Kacang Panjang	Sesuai
6	Kel 24%, Suhu 29°C, pH 4,8	Tanah perlu dipupuk	Sesuai

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Dari enam skenario pengujian pada Tabel 4, seluruhnya menghasilkan rekomendasi yang sesuai dengan basis aturan, sehingga tingkat akurasi logika inferensi mencapai 100%.

Pengujian Lapangan

Pengujian lapangan dilakukan pada tiga lokasi dengan karakteristik tanah berbeda: tanah pekarangan rumah, tanah kompos, dan lahan pertanian.

Tabel 5. Hasil Pengujian Lapangan pada Tiga Kondisi Tanah

Parameter	Pekarangan Rumah	Tanah Kompos	Lahan Pertanian
Suhu (°C)	31,8	26,5	25,0
Kelembaban (%)	32,0	72,0	65,0
EC (µS/cm)	550	1650	1200
pH	5,2	6,6	6,2
N (mg/kg)	35	135	80
P (mg/kg)	22	85	55
K (mg/kg)	40	140	95
Hasil Sistem	Belum ada tanaman yang cocok; disarankan pemupukan & pengapuran	Cabai, Tomat, Terong, Buncis, Paprika, Bawang Merah	Bayam, Kangkung, Sawi, Mentimun, Wortel

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Tabel 5 menunjukkan bahwa sistem mampu membedakan karakteristik tanah secara presisi. Pada tanah pekarangan rumah dengan pH asam (5,2) dan kandungan NPK rendah, sistem secara tepat memberikan instruksi pengondisian tanah, sedangkan pada tanah kompos dan lahan pertanian yang memiliki kandungan hara seimbang, sistem berhasil merekomendasikan komoditas tanaman sayuran yang sesuai.

Pengujian Latensi Pengiriman Data

Pengujian latensi dilakukan sebanyak 5 kali siklus pengiriman data menggunakan koneksi WiFi hotspot.

Tabel 6. Hasil Pengujian Latensi Pengiriman Data

Pengujian ke-	Latensi HTTP POST ke MySQL (ms)	Latensi Pengiriman Telegram (detik)
1	420	1,2
2	380	1,1
3	450	1,5

Pengujian ke-	Latensi HTTP POST ke MySQL (ms)	Latensi Pengiriman Telegram (detik)
4	390	1,2
5	410	1,3
Rata-rata	400	1,26

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Rata-rata waktu penyimpanan data ke basis data MySQL adalah 400 ms, sedangkan rata-rata pengiriman notifikasi ke Telegram Bot adalah 1,26 detik, sehingga sistem tergolong responsif dan mendekati kategori real-time.

Pengujian Black Box System

Pengujian Black Box dilakukan untuk memverifikasi kesesuaian antara input dan output sistem tanpa meninjau struktur kode program, dengan cenario disusun berdasarkan hasil pengujian yang telah diperoleh pada tahap-tahap sebelumnya.

Tabel 7. Hasil Pengujian Black Box System

No	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Aktual	Kesimpulan
1	Sistem membaca data tanah yang memenuhi syarat tumbuh tanaman	Rekomendasi tanaman sesuai	Rekomendasi "Bayam, Kangkung" ditampilkan	Valid
2	Sistem membaca data tanah yang tidak memenuhi syarat tanaman manapun	Status "Tanah perlu dipupuk"	Status "Tanah perlu dipupuk" ditampilkan	Valid
3	Sistem mengirim notifikasi Telegram setelah pembacaan sensor	Notifikasi terkirim berkala	Notifikasi terkirim, rata-rata 1,26 detik	Valid
4	Sistem menyimpan data ke database MySQL	Data baru tersimpan	Data tersimpan, rata-rata 400 ms	Valid
5	Sistem memberikan lebih dari satu rekomendasi tanaman sekaligus	Seluruh tanaman sesuai ditampilkan	Rekomendasi "Bayam, Kangkung" ditampilkan bersamaan	Valid

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Berdasarkan Tabel 7, dari lima skenario yang telah diuji dan divalidasi, seluruhnya menunjukkan kesesuaian antara hasil yang diharapkan dan hasil aktual, sehingga tingkat keberhasilan pengujian Black Box pada skenario tersebut mencapai 100%. Beberapa skenario tambahan, seperti ketahanan sistem terhadap gangguan probe sensor dan pemutusan koneksi WiFi sementara, direkomendasikan untuk diuji lebih lanjut pada penelitian pengembangan berikutnya guna memperkuat validitas pengujian secara menyeluruh.

Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem cerdas berbasis IoT yang dibangun mampu bekerja secara optimal sesuai tujuan penelitian. Metode rule-based system dengan teknik inferensi forward chaining terbukti efektif memproses data parameter tanah dan menghasilkan rekomendasi yang relevan secara agronomis, dengan tingkat akurasi 100% pada seluruh skenario pengujian logika maupun pengujian lapangan yang dilakukan. Dibandingkan dengan penelitian terdahulu seperti Thoriq dkk. (2022) dan Arifin dkk. (2024) yang terbatas pada fungsi monitoring tanpa rekomendasi, sistem ini memiliki keunggulan berupa kemampuan pengambilan keputusan otomatis yang memberikan panduan pemupukan praktis kepada pengguna.

Perlu dicatat bahwa nilai Nitrogen, Fosfor, dan Kalium yang dihasilkan sensor bersifat estimasi berdasarkan korelasi terhadap konduktivitas listrik (EC) tanah, bukan hasil analisis kimia laboratorium langsung, sehingga akurasinya dapat bervariasi tergantung parameter

(Hadiputra dkk., 2025). Selain itu, data pengukuran pada setiap lokasi diperoleh dari satu titik tancapan sensor yang mewakili kondisi tanah di sekitar area tersebut, sehingga hasil pengukuran dapat bervariasi apabila diambil pada titik lain dalam lahan yang sama, terutama pada lahan dengan tingkat homogenitas rendah. Kedua keterbatasan ini penting untuk dipertimbangkan dalam interpretasi hasil maupun pengembangan sistem selanjutnya.

Pemilihan pendekatan rule-based system dibandingkan Machine Learning maupun Fuzzy Logic pada penelitian ini juga perlu dipahami dalam konteks ketersediaan data. Pendekatan Machine Learning, meskipun mampu mencapai akurasi tinggi pada penelitian crop recommendation serupa (Malik dkk., 2025), mensyaratkan ketersediaan dataset riwayat pertumbuhan tanaman berskala besar sebagai data pelatihan, yang belum tersedia pada konteks penelitian ini. Rule-based system menjadi pilihan yang lebih realistis karena aturan dapat langsung disusun dari standar syarat tumbuh tanaman yang telah tersedia pada literatur agronomi, tanpa memerlukan proses pelatihan model maupun data historis. Di sisi lain, karena seluruh parameter input pada penelitian ini merupakan hasil pengukuran numerik presisi dari sensor dan bukan data linguistik yang bersifat ambigu, penerapan Fuzzy Logic dinilai akan menambah kompleksitas komputasi tanpa memberikan manfaat akurasi yang signifikan pada kasus ini. Dengan demikian, pemilihan metode pada penelitian ini didasarkan pada kesesuaian antara karakteristik data yang tersedia, keterbatasan sumber daya komputasi mikrokontroler, dan kebutuhan akan transparansi hasil keputusan yang dapat dipertanggungjawabkan terhadap standar agronomi rujukan.

Sistem yang dikembangkan pada penelitian ini juga telah diujicobakan secara langsung kepada mitra pengguna, yaitu Kelompok Wanita Tani (KWT) setempat, melalui kegiatan wawancara untuk menggali kebutuhan riil pengguna terhadap sistem rekomendasi tanaman berbasis IoT. Hasil wawancara menunjukkan bahwa notifikasi berbasis aplikasi pesan seperti Telegram dinilai mudah dipahami dan digunakan oleh anggota kelompok tani dalam kegiatan sehari-hari, serta terdapat kebutuhan nyata terhadap alat ukur tanah yang terjangkau sebagai pengganti metode penentuan tanaman yang selama ini masih mengandalkan pengalaman dan intuisi semata. Temuan ini memperkuat urgensi dan relevansi praktis dari sistem yang dikembangkan pada penelitian ini.

Ditinjau dari sisi kontribusi keilmuan, penelitian ini memperluas cakupan penelitian IoT pertanian sebelumnya yang umumnya hanya mengukur satu hingga tiga parameter tanah (Thoriq dkk., 2022; Unik & Mualfah, 2024) menjadi tujuh parameter sekaligus dalam satu probe pengukuran, sehingga memberikan gambaran kondisi tanah yang lebih komprehensif kepada pengguna. Integrasi sistem pakar berbasis aturan ke dalam perangkat IoT berbiaya rendah juga menunjukkan bahwa pengambilan keputusan otomatis tidak selalu memerlukan infrastruktur komputasi yang kompleks maupun konektivitas komputasi awan (cloud computing) berskala besar, melainkan dapat diimplementasikan langsung pada mikrokontroler dengan sumber daya terbatas selama basis aturan disusun secara tepat dan efisien. Hal ini membuka peluang penerapan yang lebih luas bagi petani skala kecil dan menengah yang selama ini kesulitan mengakses teknologi pertanian presisi karena keterbatasan biaya.

KESIMPULAN

Sistem cerdas berbasis IoT untuk rekomendasi tanaman hortikultura sayuran telah berhasil dirancang dan dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor NPK 7 in 1 melalui modul konverter MAX485, mampu mengukur tujuh parameter tanah secara real-time dengan nilai yang konsisten dan stabil. Metode rule-based system dengan teknik inferensi forward chaining berhasil diimplementasikan dengan basis aturan untuk 15 jenis tanaman hortikultura sayuran, dan hasil pengujian logika sistem menggunakan data simulasi maupun data lapangan menunjukkan tingkat akurasi 100% dalam menghasilkan rekomendasi yang sesuai dengan kondisi tanah yang diberikan. Sistem notifikasi otomatis berbasis Telegram Bot dan penyimpanan data pada basis data MySQL turut berhasil diimplementasikan dengan latensi rata-rata 400 ms untuk penyimpanan data dan 1,26 detik untuk pengiriman notifikasi, sehingga sistem tergolong responsif.

Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan dilakukan pengujian pada berbagai jenis tanah yang lebih beragam dengan pengambilan sampel pada beberapa titik (multi-point sampling) guna meningkatkan representativitas hasil pengukuran, perluasan basis aturan dengan menambahkan lebih banyak jenis tanaman hortikultura, validasi silang nilai NPK hasil sensor dengan uji laboratorium tanah, serta pertimbangan penggunaan sumber energi alternatif seperti panel surya agar alat dapat beroperasi secara mandiri di lapangan. Selain itu, pengujian Black Box System perlu dilengkapi dengan skenario tambahan, seperti ketahanan sistem terhadap gangguan probe sensor dan gangguan konektivitas jaringan, guna memperkuat validitas pengujian secara menyeluruh sebelum sistem diterapkan pada skala yang lebih luas di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Arifin, S., Kurniawati, N., Agustiani, R., & Elsandika, G. (2025). Sistem monitoring kesuburan lahan pertanian menggunakan sensor pH, sensor suhu, intensitas cahaya, dan kelembapan tanah berbasis Internet of Things. Jurnal Riset Fisika Indonesia, 5(2).

BGT Hydromet. (2026). 7 in 1 soil integrated sensor: Comprehensive guide to measurement principles & applications. https://www.bgt-hydromet.com/

Direktorat Perbenihan Hortikultura. (2013). Pedoman teknis pemurnian varietas hortikultura. Direktorat Jenderal Hortikultura, Kementerian Pertanian.

GeeksforGeeks. (2025). Rule based system vs machine learning system. https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/rule-based-system-vs-machine-learning-system/

Hadiputra, M. F., Sulastri, N. N., Wijaya, I. M. A. S., & Budisanjaya, I. P. G. (2025). Evaluasi konduktivitas listrik tanah dan kaitannya dengan pH, nitrogen total, karbon total dan bahan organik di lahan sawah. Jurnal BETA (Biosistem dan Teknik Pertanian), 13(2).

Kementerian Pertanian RI. (2022). Statistik pertanian hortikultura Indonesia 2022. Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian.

Malik, A., dkk. (2025). AI-based smart crop recommendation system for sustainable agricultural production: A data-driven approach to minimize resource use and maximize yield. Journal of Agricultural Sustainability.

Nganji, dkk. (2018). Analisis kesesuaian lahan untuk pengembangan tanaman. Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan, 9(1), 93-98.

Priyonggo, B. (2023). Kalibrasi silang pengukur EC tanah (RS-485) dengan WET-2 sensor di Rumpin, Bogor. Sultra Journal of Mechanical Engineering, 2(2), 100-106.

Prominent Indonesia. (2024). Memahami peran sensor pH: Panduan lengkap untuk pengukuran akurat dan optimal. https://www.ptdsak.com/

Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian. (2021). Data impor hortikultura Indonesia. Kementerian Pertanian RI.

Sari, M. A. W., Ivansyah, O., & Nurhasanah, N. (2019). Hubungan konduktivitas listrik tanah dengan unsur hara NPK dan pH pada lahan pertanian gambut. PRISMA FISIKA, 7(2), 55-62.

Thoriq, A., Hasta Pratopo, L., Mulya Sampurno, R., & Hisyam Shafiyullah, S. (2022). Rancang bangun sistem monitoring suhu dan kelembaban tanah berbasis Internet of Things. Jurnal Keteknikan Pertanian, 10(3), 268-280.

Unik, M., & Mualfah, D. (2024). Sistem monitoring pH dan kelembaban tanah berbasis IoT untuk optimasi pertumbuhan tanaman terong. CoSciTech (Computer Science and Information Technology), 5(3), 680-686.