

Integrasi ESP32 dan Multi-Soil Sensor RS485 dalam Monitoring Parameter Tanah Real-Time

Integration of ESP32 and an RS485 Multi-Soil Sensor in Real-Time Soil Parameter Monitoring

Mukhes Sri Muna^{1*}, Ardan Wiratmoko², Yohanes Setiyo¹, I Putu Surya Wirawan¹, I Nyoman Brama Hari Mahotama¹, I Gede Raditya Nanda Permadi¹

¹ Program Studi Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana, Bali, Indonesia.

² Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

Email*): mukhessrimuna@unud.ac.id

Received:
28 Juni 2026

Revised:
27 Juli 2026

Accepted:
23 September 2026

Published:
29 September 2026

DOI:
10.29303/jrpb.v14i2.1241

Available at:
<http://jrpb.unram.ac.id/>

Abstract: This study aimed to develop an ESP32-based portable multisensor integrated with an RS485 multi-soil sensor for real-time soil parameter monitoring. The system consists of a soil sensor, RS485-TTL module, ESP32, rechargeable battery, and Android application connected through a local Wi-Fi network, enabling operation without internet access. The device simultaneously measures soil temperature, moisture, pH, electrical conductivity (EC), nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K). Testing was conducted using five soil samples collected from several locations in Bali, with three measurements performed for each sample. Sensor measurements were compared with laboratory analysis and evaluated using R², RMSE, MAE, and MAPE. The results showed R² values ranging from 0.773 to 0.999 and MAPE values from 0.37% to 3.73%. All MAPE values were below 5%, indicating good agreement with laboratory measurements. The system has potential for rapid, real-time soil parameter monitoring.

Keywords: ESP32; real-time monitoring; RS485; soil parameter; wireless sensor

Abstrak: Penelitian ini bertujuan mengembangkan *portable multisensor* berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan *multi-soil sensor* RS485 untuk monitoring parameter tanah secara real-time. Sistem terdiri atas sensor tanah, modul RS485-TTL, ESP32, baterai isi ulang, dan aplikasi Android yang terhubung melalui Wi-Fi lokal sehingga dapat beroperasi tanpa internet. Perangkat mengukur suhu, kadar air, pH, *electrical conductivity* (EC), nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) secara simultan. Pengujian dilakukan menggunakan lima sampel tanah dari beberapa wilayah di Bali, dengan tiga kali pengukuran pada setiap sampel. Hasil pengukuran dibandingkan dengan analisis laboratorium dan dievaluasi menggunakan R², RMSE, MAE, dan MAPE. Hasil menunjukkan nilai R² sebesar 0,773–0,999 dan MAPE sebesar 0,37–3,73%. Nilai MAPE seluruh parameter berada di bawah 5%, menunjukkan kesesuaian pengukuran yang baik terhadap hasil laboratorium. Sistem berpotensi digunakan untuk monitoring parameter tanah secara cepat dan real-time.

Kata kunci: ESP32; monitoring real-time; parameter tanah; RS485; sensor tanah

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Informasi mengenai kondisi tanah merupakan salah satu faktor penting dalam mendukung pengelolaan lahan pertanian yang efisien. Parameter fisik dan kimia tanah, seperti suhu, kadar air, pH, *electrical conductivity* (EC), serta kandungan unsur hara nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), memiliki pengaruh langsung terhadap ketersediaan hara, aktivitas mikroorganisme, serta produktivitas tanaman (Sharma & Lishika, 2023). Selama ini, pengamatan parameter tersebut umumnya dilakukan melalui analisis laboratorium karena memiliki tingkat ketelitian yang tinggi. Namun demikian, metode tersebut memiliki beberapa keterbatasan, antara lain memerlukan proses pengambilan sampel, preparasi, pengujian laboratorium, serta waktu analisis yang relatif lama. Selain itu, biaya pengujian yang cukup tinggi menyebabkan proses monitoring secara berkala menjadi kurang efisien, terutama pada lahan dengan cakupan yang luas. Kondisi tersebut mengakibatkan informasi mengenai perubahan kondisi tanah tidak dapat diperoleh secara langsung di lapangan sehingga respons terhadap perubahan lingkungan menjadi kurang optimal (Ameer et al., 2024; Sobhy, 2025).

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah mendorong pengembangan berbagai sistem monitoring tanah yang mampu melakukan pengukuran parameter lingkungan secara *real-time*. Pada tahap awal pengembangannya, sebagian besar sistem monitoring tanah memanfaatkan mikrokontroler Arduino Uno sebagai pengendali utama karena memiliki arsitektur yang sederhana, mudah diprogram, serta didukung oleh berbagai modul sensor (Jawad et al., 2017; Kodali & Sahu, 2016). Arduino Uno telah banyak digunakan untuk mengintegrasikan sensor kelembapan tanah, suhu, pH, maupun *electrical conductivity* (EC) dalam berbagai aplikasi monitoring pertanian karena kemudahan implementasi dan biaya pengembangannya yang relatif rendah (Kumar et al., 2023). Namun, keterbatasan memori, kecepatan pemrosesan, serta tidak tersedianya modul komunikasi nirkabel secara bawaan menyebabkan sistem berbasis Arduino Uno memerlukan perangkat tambahan, seperti modul Wi-Fi atau Bluetooth, sehingga meningkatkan kompleksitas perangkat keras dan konsumsi daya (Farooq et al., 2020; Jawad et al., 2017).

Seiring berkembangnya teknologi mikrokontroler, berbagai penelitian mulai beralih menggunakan platform yang telah memiliki kemampuan komunikasi nirkabel terintegrasi, seperti NodeMCU ESP8266 dan ESP32. NodeMCU ESP8266 menawarkan kemudahan implementasi sistem IoT melalui konektivitas Wi-Fi bawaan, namun masih memiliki keterbatasan pada jumlah pin input/output (GPIO), kapasitas memori, serta tidak mendukung komunikasi Bluetooth, sehingga membatasi pengembangan sistem yang memerlukan akuisisi data dari banyak sensor dan komunikasi yang lebih kompleks (Mansoor et al., 2025; Pereira & Chaari, 2023). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai penelitian mulai mengadopsi ESP32 sebagai pengendali utama sistem monitoring. ESP32 memiliki prosesor dual-core berkecepatan hingga 240 MHz, kapasitas memori yang lebih besar, serta modul Wi-Fi dan Bluetooth yang terintegrasi dalam satu chip, sehingga mampu menjalankan proses akuisisi data, pemrosesan, dan komunikasi nirkabel secara bersamaan dengan konsumsi daya yang relatif rendah (Pereira & Chaari, 2023). Karakteristik tersebut menjadikan ESP32 lebih sesuai untuk pengembangan sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT), khususnya pada aplikasi pertanian yang membutuhkan pengukuran beberapa parameter secara *real-time* dan transmisi data yang stabil.

Pemanfaatan ESP32 dalam monitoring tanah telah dikembangkan pada beberapa penelitian dengan jenis sensor dan konfigurasi sistem yang berbeda. Amir et al. (2024) misalnya, mengembangkan sistem monitoring parameter lingkungan tanah berbasis IoT menggunakan ESP32 dan sensor kelembapan serta pH. Penelitian lain menggunakan sensor berbasis RS485 yang terintegrasi dengan ESP32 untuk pengukuran parameter tanah, sedangkan Cahyadi (2024) mengembangkan sistem monitoring kelembapan tanah dan unsur hara NPK menggunakan ESP32 dan modul RS485. Hasil penelitian-penelitian tersebut

menunjukkan bahwa ESP32 dan komunikasi RS485 telah digunakan dalam sistem monitoring tanah, sehingga penggunaan ESP32 maupun RS485 secara individual bukan merupakan aspek kebaruan penelitian ini.

Kesenjangan penelitian terletak pada kebutuhan terhadap sistem portable yang mengintegrasikan multi-soil sensor dalam satu perangkat dengan unit pemrosesan dan komunikasi yang sederhana serta dapat beroperasi secara mandiri di lapangan. Multi-soil sensor memungkinkan beberapa parameter tanah diperoleh secara simultan melalui satu perangkat, sedangkan ESP32 digunakan sebagai unit akuisisi dan pemrosesan data. Dalam penelitian ini, komunikasi RS485 digunakan untuk menghubungkan multi-soil sensor dengan ESP32, sedangkan Wi-Fi lokal (*Access Point*) digunakan untuk mentransmisikan hasil pengukuran ke aplikasi pengguna tanpa bergantung pada koneksi internet atau layanan *cloud*. Arsitektur tersebut menghasilkan sistem monitoring yang ringkas dan portable untuk pengukuran parameter tanah secara *real-time*.

Kontribusi penelitian ini adalah pengembangan dan integrasi multi-soil sensor dengan ESP32 dalam satu sistem portable untuk mengukur suhu tanah, kadar air, *pH*, EC, nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) secara simultan dan *real-time*. Kinerja sistem selanjutnya dievaluasi dengan membandingkan hasil pengukuran *portable multisensor* terhadap hasil analisis laboratorium menggunakan koefisien determinasi (R^2), RMSE, MAE, dan MAPE. Pendekatan tersebut digunakan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pengukuran sistem terhadap metode analisis laboratorium sebagai data acuan.

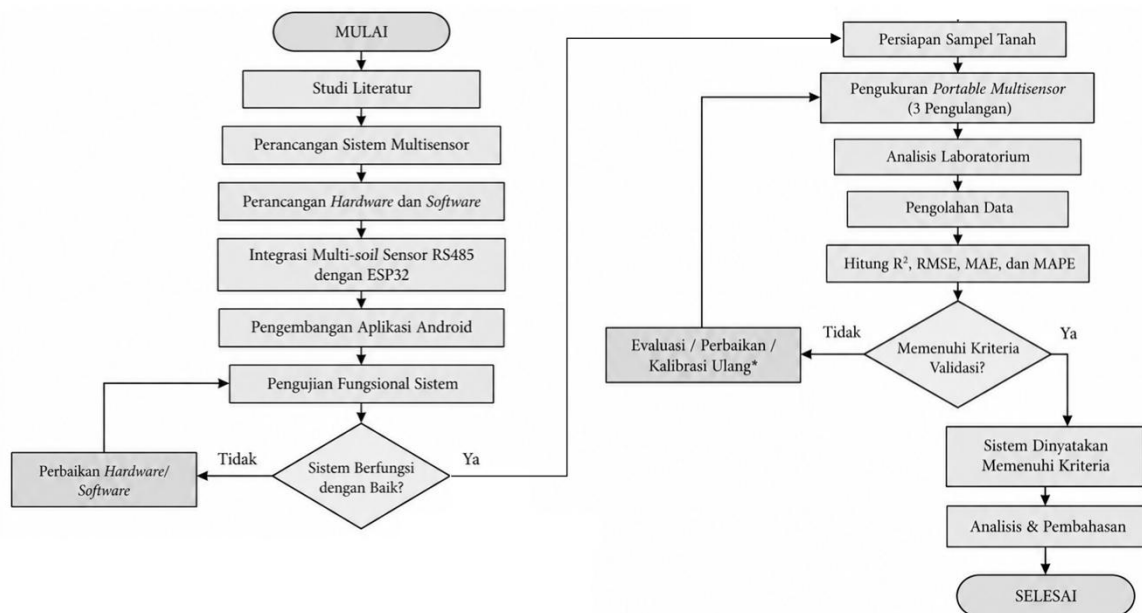
Tujuan

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan sebuah *portable multisensor* berbasis ESP32 yang mengintegrasikan multi soil sensor RS485 untuk melakukan pengukuran suhu tanah, kadar air, *pH*, *electrical conductivity* (EC), nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) secara *real-time*. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya menggunakan beberapa sensor secara terpisah atau bergantung pada koneksi internet, sistem yang dikembangkan pada penelitian ini menggunakan satu sensor multifungsi yang terintegrasi dengan komunikasi Wi-Fi lokal sehingga menghasilkan perangkat yang lebih ringkas, portabel, dan mudah dioperasikan di lapangan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengikuti tahapan yang disajikan pada Gambar 1, yang meliputi studi literatur, perancangan dan pengembangan *portable multisensor*, integrasi *multi-soil sensor* RS485 dengan ESP32, serta pengembangan aplikasi Android. Sistem yang telah terintegrasi kemudian diuji secara fungsional. Apabila sistem belum berfungsi dengan baik, dilakukan perbaikan *hardware* dan/atau *software* hingga memenuhi persyaratan fungsional.

Selanjutnya dilakukan persiapan dan pengukuran sampel tanah menggunakan *portable multisensor* sebanyak tiga kali pengulangan serta analisis laboratorium sebagai *reference measurement*. Data hasil pengukuran dianalisis menggunakan R^2 , RMSE, MAE, dan MAPE untuk mengevaluasi kesesuaian sistem. Hasil evaluasi kemudian dibandingkan dengan kriteria validasi; apabila belum memenuhi kriteria dilakukan evaluasi dan perbaikan atau kalibrasi ulang, sedangkan apabila memenuhi kriteria dilanjutkan ke tahap analisis dan pembahasan.



* Kalibrasi ulang dilakukan apabila hasil evaluasi menunjukkan bahwa keluaran sensor belum memenuhi kriteria validasi.

Gambar 1. Alur Penelitian

Lokasi penelitian dibagi menjadi dua bagian. Perancangan perangkat keras dan perangkat lunak dilaksanakan di Laboratorium Rekayasa Alat dan Energi (RAE), Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana, sedangkan pengujian dan analisis laboratorium dilaksanakan di Laboratorium Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana. Pengujian *portable multisensor* dilakukan menggunakan lima sampel tanah yang berasal dari beberapa wilayah di Provinsi Bali, yaitu sampel A dari Kecamatan Pupuan, Kabupaten Tabanan; sampel B dari kawasan Bedugul, Kabupaten Tabanan; sampel C dari Desa Catur, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli; sampel D dari Kecamatan Payangan, Kabupaten Gianyar; dan sampel E dari Kabupaten Karangasem.

Pemilihan sampel dari lokasi yang berbeda dilakukan untuk memperoleh variasi karakteristik tanah dalam pengujian sistem. Berdasarkan penelitian karakteristik tanah di Desa Batungsel, Kecamatan Pupuan, tanah pada wilayah Pupuan memiliki karakteristik Andisol, dengan klasifikasi *Typic Hapludands*, solum yang dalam (>100 cm), warna tanah coklat gelap, serta kapasitas tukar kation dan kejenuhan basa yang relatif tinggi. Kawasan Bedugul memiliki beberapa jenis tanah, yaitu Andosol coklat kelabu, Latosol coklat kekuningan, dan Regosol kelabu, dengan Andosol coklat kelabu merupakan jenis yang dominan pada wilayah kajian, yaitu sekitar 67,51%.

Sampel C dari Desa Catur, Kecamatan Kintamani, memiliki karakteristik wilayah yang berkaitan dengan material vulkanik. Data karakteristik tanah Kintamani menunjukkan bahwa sampel dari Desa Catur memiliki tekstur *sandy loam* (geluh berpasir) dengan pH rata-rata 6,5. Studi lain pada kawasan Catur juga melaporkan tanah bertekstur *sandy loam* yang berasal dari material vulkanik dengan pH sekitar 6–7. Sementara itu, wilayah Payangan memiliki variasi kondisi tanah sehingga jenis dan tekstur spesifik sampel D tidak ditetapkan berdasarkan lokasi administratif saja. Demikian pula Kabupaten Karangasem memiliki keragaman jenis tanah, terutama Regosol dan Latosol, dengan sebagian wilayah dataran tinggi memiliki Andosol. Oleh karena itu, karakteristik jenis dan tekstur tanah tersebut digunakan sebagai gambaran karakteristik wilayah berdasarkan literatur, sedangkan karakteristik aktual masing-masing sampel ditentukan berdasarkan hasil pengukuran dan analisis laboratorium.

Sampel tanah dari masing-masing lokasi diambil pada kedalaman 15 cm dengan jumlah sekitar 1 kg per sampel, sehingga diperoleh lima sampel dengan total massa sekitar 5 kg. Setelah pengambilan, sampel ditempatkan dalam wadah dan dibawa ke laboratorium untuk proses persiapan pengujian. Sampel kemudian dihomogenisasi sebelum dilakukan pengukuran. Setiap sampel yang telah homogen dibagi menjadi dua bagian, yaitu bagian pertama digunakan untuk pengukuran menggunakan *portable multisensor* dan bagian kedua digunakan untuk analisis laboratorium sebagai *reference measurement*. Pembagian dilakukan dari sampel tanah yang sama setelah homogenisasi sehingga hasil pengukuran *portable multisensor* dan analisis laboratorium berasal dari material yang setara. Dengan prosedur tersebut, perbedaan hasil pengukuran dapat dievaluasi berdasarkan karakteristik sampel yang sama.

Perancangan Portable Multisensor

Penelitian diawali dengan proses perancangan dan pengembangan *portable multisensor* untuk mengukur beberapa parameter tanah secara *real-time*. Sistem terdiri atas *multi-soil sensor* dengan antarmuka komunikasi RS485, modul konverter RS485-TTL, mikrokontroler ESP32, baterai isi ulang, dan aplikasi Android sebagai antarmuka pengguna. *Multi-soil sensor* digunakan untuk mengukur tujuh parameter tanah, yaitu suhu tanah, kadar air (*soil moisture*), *electrical conductivity* (EC), pH, nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Data hasil pengukuran dikirimkan dari sensor ke ESP32 melalui komunikasi RS485, kemudian diproses dan ditransmisikan melalui jaringan Wi-Fi lokal (*Access Point*) ke aplikasi pengguna.

Perangkat *portable multisensor* menggunakan mikrokontroler ESP32 yang dilengkapi dengan *expansion board* untuk mempermudah koneksi antara mikrokontroler, sensor, dan komponen pendukung. Sistem catu daya menggunakan baterai lithium-ion (Li-ion) tipe 18650 yang dapat diisi ulang. Tegangan baterai diatur menggunakan *buck converter* untuk menyesuaikan kebutuhan tegangan rangkaian elektronik. Unit utama perangkat ditempatkan dalam *enclosure* portabel dengan ukuran sekitar 200 × 100 × 45 mm. Sensor dihubungkan ke ESP32 melalui antarmuka RS485-TTL, sedangkan komunikasi antara ESP32 dan aplikasi monitoring dilakukan melalui jaringan Wi-Fi lokal. Konfigurasi tersebut memungkinkan proses pembacaan, pemrosesan, dan pengiriman data sensor dilakukan dalam satu sistem terintegrasi yang bersifat portabel.

Multi-soil sensor yang digunakan dalam penelitian ini merupakan sensor tanah terintegrasi CWT (ComWinTop) dengan antarmuka komunikasi RS485. Sensor digunakan untuk mengukur tujuh parameter tanah secara simultan, yaitu suhu tanah, pH, *electrical conductivity* (EC), kadar air (*soil moisture*), nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Berdasarkan spesifikasi sensor, suhu tanah memiliki rentang pengukuran -40-80 °C dengan akurasi ±5 °C pada 25 °C dan waktu respons ≤15 s. Parameter pH memiliki rentang 3-9 dengan akurasi ±0,3 pH dan waktu respons ≤10 s. EC memiliki rentang 0-20.000 µS/cm dengan akurasi ±3% pada rentang 0-10.000 µS/cm dan ±5% pada rentang 10.000-20.000 µS/cm, serta waktu respons ≤1 s. Kadar air memiliki rentang 0-100% dengan akurasi ±2% pada rentang 0-50% dan ±3% pada rentang 50-100%, serta waktu respons ≤4 s.

Untuk parameter nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), sensor memiliki rentang pengukuran 1-1.999 mg/kg (mg/L) dengan resolusi 1 mg/kg (mg/L). Data hasil pengukuran dikirimkan melalui komunikasi RS485 ke mikrokontroler ESP32 untuk diproses dan selanjutnya ditransmisikan melalui jaringan Wi-Fi lokal ke aplikasi pengguna. Konfigurasi sistem tersebut mendukung proses akuisisi, pemrosesan, dan visualisasi data secara terintegrasi tanpa bergantung pada koneksi internet atau layanan *cloud*.

Pengembangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE untuk pemrograman mikrokontroler ESP32, sedangkan aplikasi Android dikembangkan sebagai antarmuka visualisasi hasil pengukuran. Program pada ESP32 berfungsi membaca data dari multi-soil sensor melalui protokol Modbus RS485, melakukan validasi paket data dan konversi satuan sesuai keluaran sensor, serta mengirimkan hasil pengukuran ke aplikasi melalui jaringan Wi-Fi lokal (*Access Point*). Aplikasi Android digunakan untuk menampilkan parameter suhu tanah, kadar air, pH, *electrical conductivity* (EC), nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) secara *real-time* serta menyimpan hasil pengukuran untuk analisis lebih lanjut.

Arsitektur sistem dirancang dalam tiga unit utama, yaitu unit akuisisi, unit pemrosesan dan komunikasi, serta unit antarmuka pengguna. Unit akuisisi terdiri atas multi-soil sensor dengan komunikasi RS485 yang melakukan pengukuran parameter tanah. Data sensor diteruskan melalui RS485-TTL menuju ESP32 sebagai unit pemrosesan. ESP32 melakukan pembacaan dan pengolahan data, kemudian mentransmisikan hasil pengukuran melalui Wi-Fi lokal ke aplikasi Android. Arsitektur ini memungkinkan proses akuisisi, pemrosesan, dan visualisasi data dilakukan secara terintegrasi dalam satu sistem portable tanpa bergantung pada koneksi internet atau layanan *cloud*.

Pengujian Kinerja Portable Multisensor

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja *portable multisensor* dalam mengukur tujuh parameter tanah, yaitu suhu tanah, pH, *electrical conductivity* (EC), kadar air (*soil moisture*), nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Pengujian menggunakan lima sampel tanah (A-E) yang berasal dari lokasi berbeda di Provinsi Bali, dengan sampel diambil pada kedalaman 15 cm. Setiap sampel telah dihomogenisasi sebelum dilakukan pengukuran. Untuk menjaga keterbandingan hasil, pengukuran menggunakan *portable multisensor* dan analisis laboratorium dilakukan terhadap material yang berasal dari sampel tanah yang sama.

Sebelum pengujian validasi, *multi-soil sensor* digunakan berdasarkan konfigurasi dan kalibrasi bawaan (*factory calibration*) dari produsen. Dalam penelitian ini tidak dilakukan kalibrasi ulang (*recalibration*) secara khusus terhadap masing-masing parameter. Nilai keluaran sensor digunakan sebagai hasil pengukuran langsung dan selanjutnya dibandingkan dengan hasil analisis laboratorium sebagai *reference measurement*. Dengan demikian, pengujian ini merupakan evaluasi kesesuaian keluaran sensor terhadap metode acuan, bukan proses kalibrasi sensor.

Pada setiap pengujian, sampel ditempatkan pada kondisi pengukuran yang seragam. *Multi-soil sensor* ditempatkan pada sampel hingga elektroda berada dalam kontak dengan tanah. Data hasil pengukuran dibaca oleh ESP32 melalui komunikasi RS485 dan ditransmisikan melalui jaringan Wi-Fi lokal untuk ditampilkan pada aplikasi Android. Pengukuran setiap sampel dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan dengan prosedur dan kondisi pengukuran yang sama. Pengukuran dilakukan secara berurutan dari sampel A hingga E, dengan sensor dibersihkan dan dipersiapkan kembali sebelum digunakan pada sampel berikutnya untuk meminimalkan pengaruh pengukuran sebelumnya. Setiap pengulangan menghasilkan satu set data untuk tujuh parameter tanah.

Nilai yang digunakan dalam analisis merupakan nilai rata-rata dari tiga pengulangan, sedangkan simpangan baku digunakan untuk menggambarkan variasi hasil pengukuran. Hasil rata-rata pengukuran *portable multisensor* kemudian dibandingkan dengan hasil analisis laboratorium pada sampel yang sama dan kondisi pengujian yang setara untuk meminimalkan pengaruh perbedaan kondisi sampel terhadap hasil pengukuran.

Kinerja sistem dievaluasi menggunakan koefisien determinasi (R^2), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Parameter tersebut digunakan untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara hasil pengukuran *portable multisensor* dan hasil analisis laboratorium sebagai data acuan.

2.5 Analisis Data

Data hasil pengukuran *portable multisensor* dibandingkan dengan hasil analisis laboratorium menggunakan empat parameter evaluasi, yaitu koefisien determinasi (R^2), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Keempat parameter tersebut banyak digunakan untuk mengevaluasi tingkat akurasi dan kesesuaian hasil prediksi maupun hasil pengukuran terhadap data referensi (Chai et al., 2014; Chicco et al., 2021; Hyndman & Koehler, 2006). Koefisien determinasi digunakan untuk mengetahui tingkat hubungan antara hasil pembacaan *portable multisensor* dengan hasil analisis laboratorium dan dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \dots (1)$$

Dimana:

Y_i = nilai hasil analisis laboratorium

$\hat{Y}_i$ = nilai hasil pengukuran *portable multisensor*

$\bar{Y}$ = rata-rata hasil analisis laboratorium

n = jumlah data pengamatan

Tingkat kesalahan pengukuran dievaluasi menggunakan RMSE yang dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \dots (2)$$

Nilai rata-rata kesalahan absolut dihitung menggunakan MAE sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \dots (3)$$

Sedangkan tingkat kesalahan relatif dihitung menggunakan MAPE pada Persamaan (4).

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right| \dots (4)$$

Semakin tinggi nilai R^2 serta semakin rendah nilai RMSE, MAE, dan MAPE menunjukkan bahwa hasil pengukuran *portable multisensor* semakin mendekati hasil analisis laboratorium (Chai et al., 2014; Chicco et al., 2021).

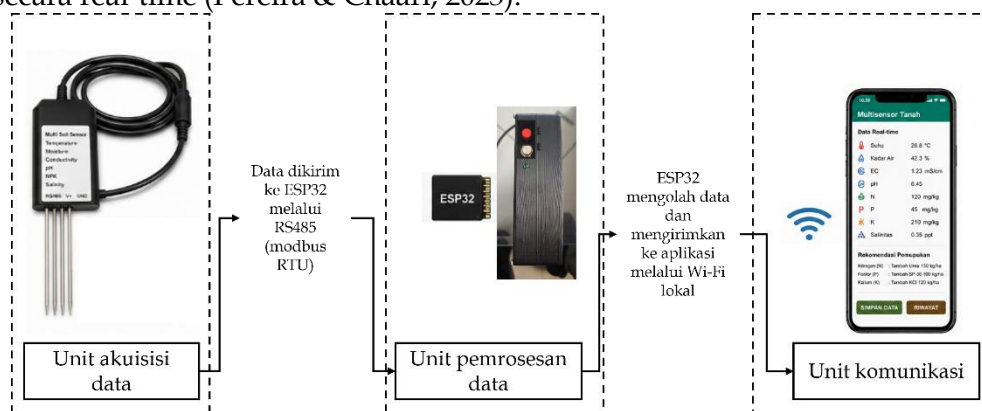
HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancang Bangun *Portable Multisensor* Berbasis ESP32

Penelitian ini berhasil mengembangkan sebuah *portable multisensor* berbasis ESP32 yang dirancang untuk melakukan pengukuran berbagai parameter sifat fisik dan kimia tanah secara *real-time*. Sistem memanfaatkan multi-soil sensor berbasis komunikasi RS485 yang mampu mengukur beberapa parameter tanah secara simultan, meliputi suhu tanah, kadar air (*soil moisture*), *electrical conductivity* (EC), pH, nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Penggunaan sensor multifungsi dipilih untuk menyederhanakan konstruksi perangkat, mengurangi jumlah komponen elektronik, serta meningkatkan efisiensi proses akuisisi data dibandingkan penggunaan beberapa sensor tunggal yang bekerja secara terpisah. Pendekatan ini memungkinkan seluruh parameter diperoleh melalui satu antarmuka komunikasi sehingga proses integrasi perangkat dan akuisisi data menjadi lebih sederhana (Ameer et al.,

2024; Sobhy, 2025). Meskipun demikian, setiap parameter pengukuran tetap memiliki karakteristik respons, ketidakpastian, dan kebutuhan kalibrasi yang berbeda sehingga penggunaan sensor multifungsi tidak secara otomatis menghilangkan kebutuhan kalibrasi.

Unit pemrosesan data menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali sistem. Mikrokontroler ini bertugas melakukan pembacaan data sensor, validasi paket komunikasi, konversi satuan pengukuran, serta pengolahan data sebelum dikirimkan kepada pengguna. Pemilihan ESP32 didasarkan pada kemampuan komputasi yang lebih tinggi dibandingkan mikrokontroler generasi sebelumnya, karena telah dilengkapi prosesor dual-core berkecepatan hingga 240 MHz, kapasitas memori yang lebih besar, serta modul Wi-Fi dan Bluetooth yang terintegrasi dalam satu chip (Espressif Systems, 2023). Integrasi tersebut memungkinkan proses akuisisi data, pemrosesan, dan komunikasi nirkabel dilakukan dalam satu platform tanpa memerlukan modul komunikasi tambahan. Kemampuan Wi-Fi dan Bluetooth yang terintegrasi menjadikan ESP32 sesuai untuk pengembangan sistem *Internet of Things* (IoT), termasuk aplikasi pertanian yang membutuhkan akuisisi dan transmisi data sensor secara real-time (Pereira & Chaari, 2023).



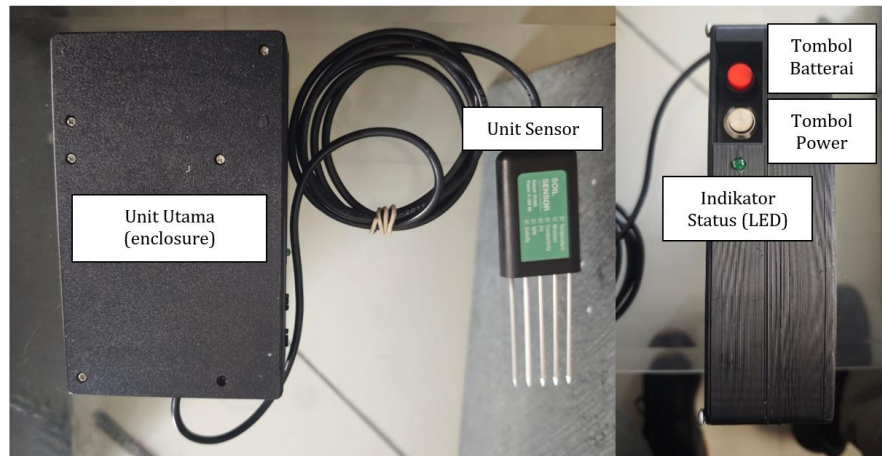
Gambar 2. Diagram arsitektur *portable multisensor* berbasis ESP32.

Sebagai unit komunikasi, ESP32 membangun jaringan Wi-Fi lokal (**Access Point**) yang memungkinkan aplikasi Android menerima hasil pengukuran secara *real-time* tanpa memerlukan koneksi internet maupun layanan *cloud*. Pendekatan ini berbeda dengan sebagian besar sistem monitoring IoT yang mengandalkan jaringan internet untuk proses komunikasi data. Penggunaan komunikasi lokal memberikan beberapa keuntungan, antara lain waktu respons yang lebih cepat, konsumsi bandwidth yang rendah, keamanan data yang lebih baik karena komunikasi berlangsung pada jaringan lokal, serta kemampuan sistem untuk tetap beroperasi pada lokasi yang tidak memiliki akses internet. Dengan demikian, perangkat dapat digunakan secara *stand-alone* sebagai sistem monitoring lapangan tanpa bergantung pada infrastruktur jaringan eksternal (Jawad et al., 2017; Pereira & Chaari, 2023).

Hasil rancang bangun menunjukkan bahwa ketiga unit sistem telah terintegrasi dengan baik sehingga membentuk alur kerja yang sederhana namun efektif. Proses diawali dari pengukuran parameter tanah oleh unit akuisisi data, dilanjutkan dengan pemrosesan menggunakan ESP32, kemudian hasil pengukuran dikirimkan melalui Wi-Fi lokal menuju aplikasi Android sebagai unit komunikasi untuk ditampilkan kepada pengguna secara *real-time*. Integrasi tersebut menghasilkan perangkat monitoring yang ringkas, portabel, dan mudah dioperasikan di lapangan, sekaligus mendukung konsep *precision agriculture* yang menekankan akuisisi data secara cepat, akurat, dan berkelanjutan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan lahan (Chlingaryan et al., 2018).

Setelah proses integrasi perangkat keras dan perangkat lunak selesai dilakukan, seluruh komponen sistem dikemas dalam bentuk *portable multisensor* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Perangkat terdiri atas unit utama sebagai pusat pemrosesan data dan multi-soil sensor RS485 yang terhubung melalui kabel komunikasi. Seluruh komponen

elektronik ditempatkan di dalam casing portabel sehingga terlindungi selama proses pengukuran di lapangan sekaligus memudahkan mobilitas pengguna. Pengemasan perangkat dalam satu unit yang ringkas mendukung penerapan sistem monitoring tanah yang praktis dan mudah dioperasikan pada berbagai kondisi lapangan (Lin, 2025; Shamshiri et al., 2018).



Gambar 3. Portable multisensor berbasis ESP32 yang dikembangkan.

Untuk memudahkan proses pemantauan, sistem dilengkapi dengan aplikasi berbasis Android yang menampilkan seluruh hasil pengukuran secara real-time, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Antarmuka aplikasi menampilkan suhu tanah, kadar air, EC, pH, nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) dalam satu tampilan sehingga memudahkan pengguna dalam memantau kondisi tanah secara langsung. Selain itu, aplikasi juga menyediakan fasilitas penyimpanan dan riwayat data sehingga hasil pengukuran dapat didokumentasikan untuk analisis lebih lanjut (Wolfert et al., 2017).



Gambar 4. Antarmuka aplikasi Android untuk monitoring parameter tanah.

Sistem bekerja dengan cara mengirimkan hasil pembacaan multi-soil sensor ke mikrokontroler ESP32 melalui komunikasi RS485 untuk dilakukan proses pembacaan dan pengolahan data. Selanjutnya, data ditransmisikan ke aplikasi Android menggunakan jaringan Wi-Fi lokal (*Access Point*), sehingga pengguna dapat memperoleh informasi kondisi tanah secara langsung tanpa memerlukan koneksi internet. Mekanisme komunikasi ini

memungkinkan perangkat beroperasi secara *stand-alone*, sehingga lebih fleksibel digunakan pada lokasi dengan keterbatasan infrastruktur jaringan (Liakos et al., 2018).

Kinerja *Portable Multisensor* dalam Pengukuran Parameter Tanah

Setelah proses rancang bangun selesai dilakukan, tahap berikutnya adalah pengujian kinerja *portable multisensor* untuk mengevaluasi tingkat akurasi alat dalam mengukur beberapa parameter tanah. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan *portable multisensor* terhadap hasil analisis laboratorium sebagai data acuan (*reference measurement*). Parameter yang dievaluasi meliputi suhu tanah, pH, *electrical conductivity* (EC), kadar air, nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Tingkat kesesuaian hasil pengukuran dianalisis menggunakan koefisien determinasi (R^2), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), yang merupakan parameter evaluasi yang umum digunakan untuk menilai akurasi sistem pengukuran dan model prediksi (Chai et al., 2014; Hyndman & Koehler, 2006).

Pengujian dilakukan terhadap lima sampel tanah (A–E) yang memiliki karakteristik berbeda untuk mengetahui kemampuan *portable multisensor* dalam mendeteksi variasi parameter tanah. Seluruh parameter diukur secara simultan menggunakan *multi-soil sensor* dengan komunikasi RS485. Setiap sampel diukur sebanyak tiga kali pengulangan dengan prosedur dan kondisi pengukuran yang sama. Nilai yang disajikan pada Tabel 1 merupakan nilai rata-rata dari tiga kali pengukuran untuk masing-masing parameter dan sampel. Penggunaan nilai rata-rata dilakukan untuk mengurangi pengaruh variasi pembacaan antar-pengulangan dan memperoleh nilai representatif dari setiap sampel.

Tabel 1. Hasil pengukuran *portable multisensor*

Sampel	Suhu (°C)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Kadar Air (%)	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)
A	27,4 $\pm$ 0,08	6,7 $\pm$ 0,10	304 $\pm$ 4,58	48,0 $\pm$ 0,52	35,7 $\pm$ 1,53	161 $\pm$ 5,51	151,7 $\pm$ 2,52
B	26,1 $\pm$ 0,04	6,8 $\pm$ 0,06	354 $\pm$ 6,08	34,6 $\pm$ 0,76	46,0 $\pm$ 1,00	182,8 $\pm$ 3,61	186,5 $\pm$ 5,03
C	27,2 $\pm$ 0,12	6,9 $\pm$ 0,10	477 $\pm$ 7,00	58,3 $\pm$ 1,15	75,3 $\pm$ 2,52	339,3 $\pm$ 6,03	323,7 $\pm$ 4,51
D	27,2 $\pm$ 0,07	7,0 $\pm$ 0,00	536 $\pm$ 5,57	58,3 $\pm$ 0,76	96,0 $\pm$ 1,53	423,7 $\pm$ 7,64	428,0 $\pm$ 8,19
E	27,6 $\pm$ 0,11	6,5 $\pm$ 0,10	544 $\pm$ 8,54	55,0 $\pm$ 1,00	298,0 $\pm$ 4,36	1123 $\pm$ 18,52	1222 $\pm$ 27,54

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa *portable multisensor* mampu mengidentifikasi variasi kondisi tanah pada setiap sampel. Nilai *electrical conductivity* (EC) berkisar antara 304–544 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sedangkan kandungan nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) menunjukkan variasi yang lebih besar antar sampel. Peningkatan nilai EC pada beberapa sampel juga diikuti oleh peningkatan nilai N, P, dan K yang terbaca oleh sensor. Namun, pola tersebut hanya menunjukkan kecenderungan pada lima sampel yang diuji dan tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan adanya hubungan langsung antara EC dan kandungan unsur hara. EC tanah pada dasarnya dipengaruhi oleh konsentrasi ion atau garam terlarut serta faktor kadar air dan karakteristik fisik tanah lainnya (Corwin & Lesch, 2005; Friedman, 2005). Hubungan antara EC dan kandungan N, P, dan K dapat bersifat spesifik terhadap karakteristik tanah, sehingga interpretasinya memerlukan perbandingan dengan hasil analisis laboratorium.

Sebaliknya, parameter suhu tanah dan pH menunjukkan variasi yang relatif kecil antar sampel, sedangkan kadar air menunjukkan variasi yang lebih besar. Variasi tersebut menunjukkan adanya perbedaan kondisi tanah antar sampel yang dapat terdeteksi oleh *portable multisensor*. Hasil pengukuran N, P, dan K dalam penelitian ini diperlakukan sebagai keluaran sensor dan selanjutnya dievaluasi terhadap hasil analisis laboratorium sebagai *reference measurement*.

Untuk mengevaluasi kinerja pengukuran *portable multisensor*, dilakukan analisis laboratorium terhadap sampel tanah yang sama dengan sampel yang digunakan pada

pengujian alat. Hasil analisis laboratorium digunakan sebagai *reference measurement* untuk membandingkan tingkat kesesuaian hasil pengukuran *portable multisensor*. Penggunaan pengukuran acuan diperlukan untuk mengevaluasi kinerja sensor melalui perbandingan hasil pengukuran lapangan dengan hasil pengukuran menggunakan metode analisis yang menjadi rujukan (Adamchuk et al., 2018). Hasil analisis laboratorium untuk masing-masing sampel disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil analisis laboratorium

Sampel	Suhu (°C)	pH	EC (µS/cm)	Kadar Air (%)	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)
A	27,3 ± 0,06	6,8 ± 0,06	311 ± 3,61	47,0 ± 0,58	37,2 ± 1,15	168 ± 4,58	156 ± 3,00
B	26,2 ± 0,08	6,8 ± 0,00	362 ± 5,51	35,0 ± 0,50	47,8 ± 1,32	190 ± 5,00	191 ± 4,36
C	27,3 ± 0,10	6,9 ± 0,06	486 ± 6,56	56,0 ± 0,87	79,1 ± 1,70	351 ± 5,57	333 ± 7,00
D	27,1 ± 0,06	7,0 ± 0,00	542 ± 7,21	58,0 ± 0,58	99,4 ± 2,08	436 ± 6,56	441 ± 8,54
E	27,5 ± 0,10	6,6 ± 0,10	552 ± 9,17	56,0 ± 0,76	306 ± 5,57	1148 ± 16,52	1241 ± 29,02

Hasil analisis laboratorium menunjukkan adanya variasi karakteristik tanah antar sampel. Nilai EC berkisar antara 311–552 µS/cm, sedangkan kadar N, P, dan K masing-masing berkisar antara 37,2–306,0 mg/kg, 168–1148 mg/kg, dan 156–1241 mg/kg. Sampel E menunjukkan nilai EC, N, P, dan K tertinggi, sedangkan sampel A menunjukkan nilai yang relatif rendah untuk parameter tersebut. Pola peningkatan EC yang diikuti oleh peningkatan nilai N, P, dan K pada beberapa sampel menunjukkan adanya kecenderungan yang sama pada data pengukuran, tetapi tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan hubungan langsung antara EC dan kandungan unsur hara. Nilai EC tanah dipengaruhi oleh konsentrasi ion terlarut serta berbagai faktor tanah, termasuk kadar air dan karakteristik fisik tanah (Corwin & Lesch, 2005; Friedman, 2005). Oleh karena itu, hubungan antara EC dan kandungan N, P, dan K dalam penelitian ini tidak diinterpretasikan sebagai hubungan kausal.

Parameter suhu tanah dan pH menunjukkan variasi yang relatif kecil antar sampel. Suhu berkisar antara 26,2–27,5 °C, sedangkan pH berkisar antara 6,6–7,0, yang menunjukkan kondisi pengujian relatif seragam untuk kedua parameter tersebut. Kadar air menunjukkan kisaran yang lebih besar, yaitu 35,0–58,0%, sehingga mencerminkan adanya perbedaan kondisi air pada masing-masing sampel.

Apabila dibandingkan dengan hasil pengukuran *portable multisensor* pada Tabel 1, pola perubahan sebagian besar parameter menunjukkan kecenderungan yang serupa antar sampel. Sebagai contoh, nilai EC hasil *portable multisensor* meningkat dari 304 µS/cm pada sampel A menjadi 544 µS/cm pada sampel E, sedangkan hasil analisis laboratorium meningkat dari 311 menjadi 552 µS/cm. Pola serupa juga terlihat pada N, P, dan K, dengan sampel E menunjukkan nilai tertinggi pada kedua metode. Pada parameter pH dan suhu, perbedaan antar sampel relatif kecil pada kedua metode.

Meskipun terdapat perbedaan nilai antara hasil *portable multisensor* dan analisis laboratorium, kesamaan pola perubahan antar sampel menunjukkan bahwa sistem mampu menangkap variasi relatif parameter tanah. Perbedaan nilai dapat dipengaruhi oleh heterogenitas sampel, distribusi kadar air dan unsur hara yang tidak sepenuhnya homogen, serta perbedaan prinsip dan kondisi pengukuran antara sensor dan metode laboratorium. Oleh karena itu, kesesuaian hasil pengukuran tidak hanya dinilai berdasarkan kemiripan pola, tetapi selanjutnya dianalisis secara kuantitatif menggunakan R², RMSE, MAE, dan MAPE.

Kinerja *portable multisensor* selanjutnya dievaluasi menggunakan empat parameter statistik, yaitu koefisien determinasi (R²), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error

(MAE), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Keempat parameter tersebut digunakan untuk menilai tingkat kesesuaian antara hasil pengukuran *portable multisensor* dan hasil analisis laboratorium sebagai data acuan. Hasil evaluasi kinerja disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil evaluasi kinerja portable multisensor

Parameter	R ²	RMSE	MAE	MAPE (%)
Suhu	0,952	0,10	0,10	0,37
pH	0,773	0,06	0,04	0,60
EC	0,994	7,67	7,60	1,77
Kadar Air	0,980	1,23	1,00	1,94
Nitrogen (N)	0,998	4,37	3,70	3,73
Fosfor (P)	0,998	14,24	12,64	3,26
Kalium (K)	0,999	11,45	10,02	2,48

Kinerja *portable multisensor* selanjutnya dievaluasi menggunakan empat parameter statistik, yaitu koefisien determinasi (R²), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Keempat parameter tersebut digunakan untuk menilai tingkat kesesuaian antara hasil pengukuran *portable multisensor* dan hasil analisis laboratorium sebagai *reference measurement*. Semakin tinggi nilai R² serta semakin rendah nilai RMSE, MAE, dan MAPE menunjukkan bahwa hasil pengukuran *portable multisensor* semakin mendekati hasil analisis laboratorium (Chai et al., 2014; Chicco et al., 2021).

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa nilai R² berada pada kisaran 0,773–0,999, dengan nilai tertinggi pada parameter kalium (K) sebesar 0,999 dan terendah pada pH sebesar 0,773. Nilai R² yang tinggi pada sebagian besar parameter menunjukkan adanya hubungan linier yang kuat antara hasil pengukuran sensor dan hasil analisis laboratorium. Namun, nilai R² perlu diinterpretasikan bersama metrik kesalahan karena R² menggambarkan kekuatan hubungan linier, bukan besarnya kesalahan pengukuran secara langsung. Pada parameter pH, nilai R² yang lebih rendah dapat berkaitan dengan rentang nilai pH yang relatif sempit, yaitu 6,6–7,0, sehingga variasi data yang kecil dapat memengaruhi nilai koefisien determinasi (Chicco et al., 2021).

Nilai RMSE dan MAE menunjukkan besarnya penyimpangan hasil pengukuran *portable multisensor* terhadap hasil analisis laboratorium. Nilai MAE terendah diperoleh pada pH sebesar 0,04, sedangkan nilai MAE untuk suhu, EC, kadar air, N, P, dan K masing-masing sebesar 0,10 °C, 7,60 µS/cm, 1,00%, 3,70 mg/kg, 12,64 mg/kg, dan 10,02 mg/kg. Perbedaan hasil pengukuran dapat dipengaruhi oleh heterogenitas sifat tanah, distribusi kadar air dan unsur hara, serta respons sensor terhadap kondisi fisik dan kimia tanah (Adamchuk et al., 2018).

Berdasarkan nilai MAPE, seluruh parameter memiliki kesalahan relatif di bawah 5%, dengan kisaran 0,37–3,73%. Nilai MAPE terendah diperoleh pada suhu (0,37%) dan tertinggi pada nitrogen (3,73%). Nilai MAPE yang rendah menunjukkan bahwa penyimpangan relatif hasil pengukuran sensor terhadap hasil analisis laboratorium relatif kecil pada sampel yang diuji. Namun, nilai MAPE tidak digunakan sebagai satu-satunya dasar untuk menyatakan tingkat akurasi perangkat karena interpretasinya dipengaruhi oleh karakteristik dan rentang nilai data yang digunakan (Hyndman & Koehler, 2006). Untuk parameter suhu dan pH yang memiliki rentang nilai relatif sempit, besarnya kesalahan dalam satuan asli lebih informatif untuk menggambarkan deviasi hasil pengukuran. Pada parameter suhu, nilai RMSE dan MAE masing-masing sebesar 0,10 °C dan 0,10 °C, sedangkan pada parameter pH diperoleh RMSE sebesar 0,06 pH dan MAE sebesar 0,04 pH. Nilai tersebut menunjukkan bahwa perbedaan hasil pengukuran sensor terhadap hasil analisis laboratorium relatif kecil pada kondisi pengujian yang dilakukan. Dengan demikian, interpretasi kinerja *portable*

multisensor dilakukan berdasarkan kombinasi R^2 , RMSE, MAE, dan MAPE, bukan hanya berdasarkan nilai MAPE.

Secara keseluruhan, kombinasi nilai R^2 yang relatif tinggi serta nilai RMSE, MAE, dan MAPE yang relatif rendah menunjukkan bahwa *portable multisensor* memiliki kesesuaian yang baik terhadap hasil analisis laboratorium pada lima sampel yang diuji. Hasil ini menunjukkan kemampuan sistem dalam mengikuti variasi parameter tanah pada kondisi pengujian penelitian. Namun, nilai tersebut tidak secara langsung menunjukkan akurasi yang sangat tinggi, karena hasil evaluasi dipengaruhi oleh jumlah sampel, rentang nilai, dan karakteristik tanah yang diuji. Oleh karena itu, hasil penelitian ini diposisikan sebagai evaluasi awal kesesuaian keluaran sensor terhadap metode acuan, bukan sebagai bukti bahwa perangkat memiliki akurasi yang sama pada seluruh jenis dan kondisi tanah. Pengujian dengan jumlah sampel yang lebih banyak dan karakteristik tanah yang lebih beragam diperlukan untuk memperkuat validasi kinerja sistem.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan *portable multisensor* berbasis ESP32 yang mengintegrasikan *multi-soil sensor* RS485 untuk mengukur tujuh parameter tanah secara *real-time*, yaitu suhu, kadar air, pH, EC, N, P, dan K. Sistem terintegrasi dengan aplikasi Android melalui jaringan Wi-Fi lokal sehingga dapat beroperasi secara *stand-alone*. Pengujian pada lima sampel tanah menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik terhadap hasil analisis laboratorium, dengan nilai R^2 sebesar 0,773–0,999 dan MAPE 0,37–3,73%. Namun, hasil tersebut masih terbatas pada kondisi dan jumlah sampel yang diuji sehingga belum dapat digeneralisasi untuk seluruh kondisi tanah. Sistem menunjukkan potensi sebagai perangkat monitoring tanah secara cepat dan *real-time*.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan jumlah sampel dan jenis tanah yang lebih beragam, melakukan kalibrasi dan validasi lanjutan terhadap metode laboratorium, serta menguji sistem dalam kondisi lapangan dan periode pengamatan yang lebih panjang. Pengembangan selanjutnya dapat diarahkan pada integrasi *cloud*, GIS, dan kecerdasan buatan untuk mendukung monitoring tanah yang lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Udayana sehingga penelitian dapat terlaksana melalui dana Hibah Penelitian Dana PNBP Tahun Anggaran 2026 berdasarkan Perjanjian Pelaksanaan Kegiatan Hibah Penelitian Nomor B/324.256/UN14.4.A/PT.01.03/2026. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana atas dukungan fasilitas penelitian, serta pihak-pihak yang telah berkontribusi dalam pengumpulan data dan evaluasi sistem.

CONFLICT OF INTEREST

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian ini. Penulis juga memastikan bahwa penelitian ini dilakukan secara independen tanpa adanya pengaruh dari pihak manapun dalam perancangan, pengumpulan data, analisis, maupun penulisan naskah.

DAFTAR REFERENSI

- Adamchuk, V., Ji, W., Rossel, R. V., Gebbers, R., & Tremblay, N. (2018). *Proximal soil and plant sensing*. Online: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Ameer, S., Ibrahim, H., Gulraiz, F. N. U. K., & Mazhar, A. (2024). Real-time detection and measurements of nitrogen, phosphorous & potassium from soil samples: A comprehensive review. *Journal of Soils and Sediments*, 24, 2565–2583. <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03827-5>
- Amir, A., Suwardoyo, U., & Irwan, I. N. P. (2024). Sistem pengukuran dan pemantauan parameter lingkungan tanah pertanian berbasis Internet of Things. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 7(1), 18–23. <https://doi.org/10.37905/jjee.v7i1.27691>
- Cahyadi, R. (2024). *Sistem Monitoring Kelembapan Tanah dan Unsur Hara NPK Berbasis Iot dengan Analisis Regresi Linear Berganda pada Tanaman Pakcoy*. Diakses dari: <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/156996>
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?–Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7, 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, 623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
- Chlingaryan, A., Sukkarieh, S., & Whelan, B. (2018). Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012>
- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1–3), 11–43. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005>
- Espressif Systems. (2023). *ESP32 series datasheet*. Diakses dari: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf
- Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Umer, T., & Zikria, Y. B. (2020). Role of IoT technology in agriculture: A systematic literature review. *Electronics*, 9(2), 319. <https://doi.org/10.3390/electronics9020319>
- Friedman, S. P. (2005). Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1–3), 45–70. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.001>
- Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679–688. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>

- Jawad, H. M., Nordin, R., & Gharghan, S. K. (2017). Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. *Sensors*, 17(8), 1781. <https://doi.org/10.3390/s17081781>
- Kodali, R. K., & Sahu, A. (2016). An IoT based soil moisture monitoring on Losant platform. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*, 764–768. Greater Noida: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IC3I.2016.7918063>
- Kumar, R. T., Padmashini, R. K., Ramani, R., Varsha, B., Ragul, S., & Daniel, J. (2023). IoT based smart irrigation tracking and management system using Arduino UNO microcontroller. *International Journal of Advanced Trends in Engineering and Management*, 2(8), 34–43. <https://doi.org/10.59544/YJSC3391/IJATEMV02I06P4>
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., & Pearson, S. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Lin, J. (2025). Recent advances in agricultural sensors: Towards precision and sustainable farming. *Chemosensors*, 13(11), 399. <https://doi.org/10.3390/chemosensors13110399>
- Mansoor, S., Iqbal, S., & Popescu, S. M. (2025). Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: Trends, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1587869. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869>
- Pereira, G. P., & Chaari, M. Z. (2023). IoT-enabled smart drip irrigation system using ESP32. *IoT*, 4(3), 221–243. <https://doi.org/10.3390/iot4030012>
- Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. M. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(1), 1–22. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210>
- Sharma, S., & Lishika, B. (2023). Soil quality indicators: A comprehensive review. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(22), 315–325. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2023/v35i224139>
- Sobhy, D. M. (2025). Soil nutrient monitoring technologies for sustainable agriculture: A systematic review. *Sustainability*, 17(18), 8477. <https://doi.org/10.3390/su17188477>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. (2017). Big data in smart farming: A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>