

## IoT-Based Soil Monitoring System untuk Pemantauan Real-Time Kelembapan dan Hara Tanah Kopi dalam Pertanian Presisi

Hanif Fatur Rohman<sup>1</sup>, Aulia Brilliantina<sup>2</sup>, Irene Ratri Andia Sasmita<sup>3</sup>, Findi Citra Kusumasari<sup>4\*</sup>, Ahmad Haris Hasanuddin Slamet<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Produksi Tanaman Hortikultura, Jurusan Produksi Pertanian, Politeknik Negeri Jember

<sup>2,3,4</sup>Teknologi Industri Pangan, Jurusan Teknologi Pertanian, Politeknik Negeri Jember

<sup>5</sup>Manajemen Agroindustri, Jurusan Manajemen Agribisnis, Politeknik Negeri Jember

E-mail: [findi.citra@polije.ac.id](mailto:findi.citra@polije.ac.id)<sup>4\*</sup>

Article Info	Abstract
<b>Article History</b> Received: 2026-01-08 Revised: 2026-04-12 Published: 2026-04-18	<p><i>Accurate and continuous soil condition monitoring is a critical prerequisite for coffee crop management, particularly in smallholder farming systems that face variable soil and climate conditions. This study aims to develop an IoT-Based Soil Monitoring System for real-time monitoring of soil moisture and nutrients in coffee crops within the framework of precision agriculture. The system is designed with an integrated architecture consisting of ESP8266 microcontroller-based sensor nodes, which integrate the Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2, RS485 Soil NPK Sensor, E201-C pH sensor, and DS18B20 temperature sensor. Data is collected periodically, transmitted via a Wi-Fi network using the HTTP protocol to an XAMPP-based server with a MySQL database, and visualized through a web dashboard in real-time. Test results indicate that the system operates stably in transmitting and recording data, as evidenced by relatively low measurement variations: nitrogen at <math>43.7 \pm 1.5</math> mg/kg, phosphorus at <math>27.2 \pm 1.3</math> mg/kg, and potassium <math>32.5 \pm 1.2</math> mg/kg, as well as supporting parameters such as soil pH 6.6, moisture content 40.1%, and soil temperature <math>28.4^\circ\text{C}</math>. Consistency between real-time and time-stamped historical data indicates no data loss and good system integrity during the testing period. The contribution of this research lies in the development of an integrated, stable, and practical IoT-based multi-parameter soil monitoring system suitable for smallholder coffee plantations. This system is capable of providing real-time and documented soil condition data, thereby potentially supporting data-driven decision-making in water and nutrient management within precision agriculture systems.</i></p>
<b>Keywords:</b> <i>IoT; kopsisense; NPK; precision agriculture; soil sensor</i>	
<b>Artikel Info</b>	<b>Abstrak</b>
<b>Sejarah Artikel</b> Diterima: 2026-01-08 Direvisi: 2026-04-12 Dipublikasi: 2026-04-18	<p>Pemantauan kondisi tanah yang akurat dan berkelanjutan merupakan prasyarat penting dalam pengelolaan tanaman kopi, khususnya pada sistem budidaya skala rakyat yang menghadapi variabilitas kondisi tanah dan iklim. Penelitian ini bertujuan mengembangkan IoT-Based Soil Monitoring System untuk pemantauan real-time kelembapan dan hara tanah kopi dalam kerangka pertanian presisi. Sistem dirancang dengan arsitektur terintegrasi yang terdiri atas node sensor berbasis mikrokontroler ESP8266, yang mengintegrasikan <i>Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2</i>, <i>Soil NPK Sensor RS485</i>, sensor pH <i>E201-C</i>, serta sensor suhu <i>DS18B20</i>. Data dikumpulkan secara periodik, dikirim melalui jaringan Wi-Fi menggunakan protokol HTTP ke server berbasis XAMPP dengan basis data MySQL, dan divisualisasikan melalui dashboard web secara <i>real-time</i>. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja secara stabil dalam mengirimkan dan merekam data, ditunjukkan oleh variasi pengukuran yang relatif rendah, yaitu nitrogen sebesar <math>43,7 \pm 1,5</math> mg/kg, fosfor <math>27,2 \pm 1,3</math> mg/kg, dan kalium <math>32,5 \pm 1,2</math> mg/kg, serta parameter pendukung berupa pH tanah 6,6, kadar air 40,1%, dan suhu tanah <math>28,4^\circ\text{C}</math>. Konsistensi antara data <i>real-time</i> dan data historis berpenanda waktu menunjukkan tidak adanya kehilangan data (<i>data loss</i>) serta integritas sistem yang baik selama periode pengujian. Kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan sistem pemantauan tanah multi-parameter berbasis IoT yang terintegrasi, stabil, dan aplikatif untuk kondisi perkebunan kopi rakyat. Sistem ini mampu menyediakan data kondisi tanah secara <i>real-time</i> dan terdokumentasi, sehingga berpotensi mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam pengelolaan air dan hara pada sistem pertanian presisi.</p>
<b>Kata kunci:</b> IoT; kopsisense; NPK; pertanian presisi; sensor tanah	

### PENDAHULUAN

Kesuburan tanah dan ketersediaan air merupakan faktor kunci dalam pengelolaan

tanaman kopi karena menentukan kondisi lingkungan perakaran yang memengaruhi penyerapan air dan hara. Berdasarkan data

Badan Pusat Statistik, produksi kopi nasional pada tahun 2025 tercatat sebesar 3.520 ton, mengalami penurunan dibandingkan tahun sebelumnya sebesar 3.610 ton (BPS, 2026). Kondisi ini menjadi perhatian mengingat sebagian besar produksi kopi di Indonesia berasal dari perkebunan rakyat yang umumnya memiliki keterbatasan dalam pengelolaan lahan. Pada sistem perkebunan kopi rakyat, kelembapan tanah dan status hara bersifat dinamis serta dipengaruhi oleh karakteristik tanah, topografi, dan variabilitas iklim (Silva, Silva, Wei, Souza, & Molin, 2025). Perubahan kondisi tersebut dapat terjadi dalam waktu relatif singkat, sehingga memerlukan informasi lapang yang kontinu dan representatif. Namun, dalam praktik budidaya konvensional, informasi kondisi tanah umumnya diperoleh secara tidak langsung dan tidak berkelanjutan, sehingga belum mampu mendukung pengambilan keputusan yang cepat dan berbasis data.

Pengelolaan air dan pemupukan pada perkebunan kopi rakyat umumnya masih berbasis jadwal atau indikator visual tanaman (Novita et al., 2025) yang kurang mampu menangkap variabilitas kondisi tanah. Kesalahan dalam pengelolaan air dan pemupukan dapat berdampak langsung pada pertumbuhan dan produktivitas tanaman kopi. Kelebihan air dapat menurunkan aerasi tanah dan memicu pencucian unsur hara, khususnya nitrogen, sedangkan kekurangan air menghambat difusi hara dan aktivitas fisiologis tanaman (Pais et al., 2022). Di sisi lain, pemupukan yang tidak berbasis kondisi tanah berpotensi menurunkan efisiensi

penggunaan hara, baik melalui kehilangan akibat pencucian maupun ketidakseimbangan unsur yang tersedia bagi tanaman. Kondisi ini umumnya terjadi akibat keterbatasan informasi kondisi tanah yang aktual dan berkelanjutan, sehingga pengelolaan input menjadi kurang tepat sasaran dan sulit dievaluasi secara objektif.

Perkembangan teknologi sensor dan *Internet of Things* (IoT) memberikan peluang untuk mengatasi keterbatasan tersebut melalui sistem pemantauan tanah yang terintegrasi. Dalam konteks pertanian presisi, IoT memungkinkan pengumpulan data kondisi lahan secara *real-time* melalui jaringan sensor yang saling terhubung, sehingga pengelolaan budidaya dapat dilakukan berdasarkan kondisi aktual di lapangan. Sensor kelembapan tanah memungkinkan pengukuran kadar air tanah secara kontinu, sedangkan sensor hara dan parameter pendukung seperti pH dan suhu tanah menyediakan informasi awal mengenai kondisi kimia dan fisik tanah (Margiwiyatno et al., 2025). Integrasi sensor-sensor ini dengan mikrokontroler dan sistem komunikasi nirkabel memungkinkan akuisisi data secara otomatis, penyimpanan data historis, serta visualisasi kondisi tanah melalui antarmuka berbasis web (Kushwaha, Joshi, Panigrahi, & Pandey, 2024). Dengan demikian, kondisi tanah dapat dipantau secara real-time tanpa ketergantungan pada pengamatan manual yang bersifat sporadis.

Meskipun berbagai sistem monitoring tanah berbasis IoT telah dikembangkan, sebagian besar masih berfokus pada skala eksperimental atau komoditas tertentu dan belum banyak diadaptasi untuk konteks

perkebunan kopi rakyat di Indonesia. Selain itu, pengembangan sistem umumnya masih menitikberatkan pada fungsionalitas dasar, dengan keterbatasan pada integrasi multi-parameter tanah dalam satu *platform* yang sederhana dan terjangkau, serta belum menekankan pada aspek kestabilan akuisisi dan kontinuitas data sebagai prasyarat penerapan pertanian presisi.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem pemantauan tanah berbasis IoT yang mengintegrasikan parameter kelembapan, hara N-P-K, pH, dan suhu tanah dalam satu arsitektur yang terintegrasi dan aplikatif untuk perkebunan kopi rakyat. Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan integrasi multi-parameter dalam sistem yang sederhana dan terjangkau, serta evaluasi yang tidak hanya berfokus pada fungsionalitas, tetapi juga pada kestabilan pembacaan sensor dan kontinuitas data sebagai dasar keandalan sistem monitoring. Sistem yang dikembangkan diharapkan mampu menyediakan data kondisi tanah secara *real-time* dan terdokumentasi, sehingga mendukung pengelolaan air dan hara berbasis data dalam kerangka pertanian presisi.

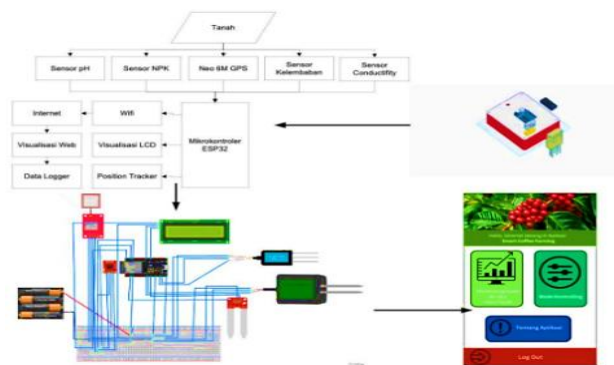
## METODE

Penelitian ini merupakan studi pengembangan sistem yang bertujuan merancang dan mengevaluasi prototipe sistem pemantauan *real-time* kelembapan dan hara tanah tanaman kopi berbasis *Internet of Things* (IoT). Fokus penelitian diarahkan pada perancangan arsitektur sistem, integrasi sensor tanah multi-parameter, serta evaluasi awal kinerja

sistem dalam melakukan akuisisi dan visualisasi data secara berkelanjutan. Penelitian dilaksanakan pada periode Agustus–November 2025 di Laboratorium Logam Politeknik Negeri Jember.

## Arsitektur Sistem IoT

Sistem yang dikembangkan terdiri atas node sensor, unit pemrosesan, dan sistem visualisasi data. Node sensor mengintegrasikan sensor kelembapan tanah, sensor hara N-P-K, serta sensor pH dan suhu tanah yang terhubung ke mikrokontroler ESP8266. Data sensor dibaca secara periodik, diproses secara lokal, kemudian dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi ke server lokal berbasis XAMPP. Data yang diterima disimpan dalam basis data MySQL dan divisualisasikan secara *real-time* melalui *dashboard web*. Diagram arsitektur sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain sistem smart soil sensor

## Perangkat Keras dan Sensor

Sensor yang digunakan dalam sistem ini meliputi sensor kelembapan tanah untuk mengukur kadar air sebagai indikator kondisi fisik tanah, sensor hara N-P-K untuk mengestimasi kandungan nitrogen, fosfor, dan kalium, serta sensor pH dan suhu tanah sebagai parameter pendukung dalam interpretasi kondisi kimia dan fisik

tanah. Seluruh sensor terintegrasi dengan mikrokontroler untuk proses pengukuran dan pengiriman data. Spesifikasi lengkap sensor yang digunakan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Spesifikasi sensor kopisense

Sensor	Type/Model	Output	Akurasi
Sensor kelembaban tana	Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2	Analog (0-3.3V)	±5%
Sensor hara tanah (N, P, K)	Soil NPK Sensor RS485	Digital (RS485/Modbus)	±2-5%
Sensor pH tanah	pH probe E201-C dengan modul interface	Analog (0-3V)	±0.1-0.2
Sensor suhu tanah	DS18B20	Digital	±0.5°C

Seluruh sensor terhubung dengan mikrokontroler ESP8266 sebagai unit pemrosesan yang menangani pembacaan data, pengolahan awal, dan komunikasi data. Sistem diprogram menggunakan bahasa C++ pada platform Arduino IDE. Data sensor dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi menggunakan protokol HTTP ke server lokal untuk proses penyimpanan dan visualisasi. Seluruh komponen dirangkai dalam satu panel sistem untuk memastikan kestabilan operasional dan kemudahan pengujian.

### Akuisisi dan Manajemen Data

Akuisisi data dilakukan secara otomatis dengan interval pengukuran setiap 1 menit. Data yang dihasilkan meliputi parameter kelembapan tanah, kandungan nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), pH, dan suhu tanah yang disusun dalam format data terstruktur (JSON) sebelum dikirimkan ke server. Pengiriman data dilakukan melalui jaringan Wi-Fi menggunakan protokol HTTP. Setiap data yang diterima disimpan

dalam basis data dengan penanda waktu (*timestamp*). Sistem *dashboard web* dirancang untuk menampilkan nilai parameter tanah secara *real-time* serta menyediakan data historis yang dapat diakses kembali untuk keperluan analisis. Sistem ini memungkinkan pemantauan kondisi tanah secara kontinu tanpa intervensi manual.

### Prosedur Pengujian dan Evaluasi Sistem

Pengujian sistem difokuskan pada evaluasi kinerja fungsional dan kestabilan sistem monitoring. Parameter yang dievaluasi meliputi: (1) keberhasilan integrasi sensor dan mikrokontroler, (2) kestabilan pembacaan data sensor dalam pengukuran berulang, (3) keandalan transmisi data dari node sensor ke server, serta (4) konsistensi tampilan data pada dashboard web.

Kestabilan pembacaan sensor dievaluasi menggunakan analisis statistik sederhana berupa nilai rata-rata dan simpangan standar dari pengukuran berulang untuk mengidentifikasi variasi data (Astolfi, Rispoli, Gherardi, Zonta, & Malagù, 2023). Selain itu, keandalan transmisi data dianalisis berdasarkan persentase keberhasilan pengiriman data (*packet delivery rate*) yang dihitung dari jumlah data yang berhasil diterima server dibandingkan dengan jumlah data yang dikirimkan.

*Latency data* diidentifikasi secara deskriptif berdasarkan selisih waktu antara data yang dikirim dari node sensor dan waktu penerimaan pada server yang ditunjukkan melalui *timestamp*. Sementara itu, *error sensor* dalam penelitian ini dievaluasi secara relatif melalui konsistensi

hasil pengukuran berulang, mengingat pengujian belum melibatkan pembandingan terhadap metode standar laboratorium.

### Analisis Data

Data hasil pengukuran dianalisis secara deskriptif untuk mengevaluasi kestabilan dan konsistensi pembacaan sensor. Analisis dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata dan standar deviasi dari pengukuran berulang. Standar deviasi digunakan untuk menggambarkan tingkat penyebaran data terhadap nilai rata-rata sebagai indikator kestabilan sistem monitoring. Analisis ini digunakan sebagai evaluasi awal keandalan sistem sebelum dilakukan tahap kalibrasi laboratorium dan validasi lapangan yang lebih komprehensif.

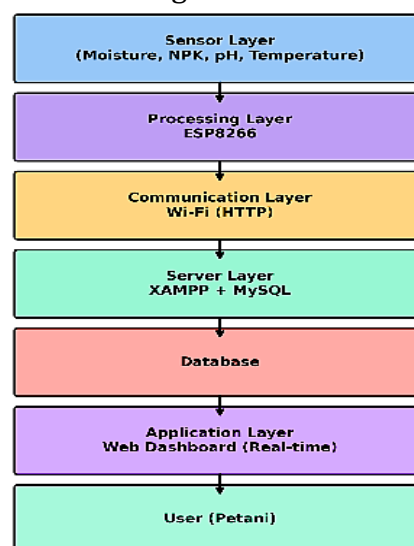
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem pemantauan tanah berbasis *Internet of Things* yang dikembangkan dalam penelitian ini ditujukan untuk merekam dinamika kelembapan dan ketersediaan hara tanah kopi yang bersifat spasial dan temporal. Integrasi sensor kelembapan tanah dan sensor hara N-P-K memungkinkan akuisisi data kondisi lapang secara *real-time*, sehingga menyediakan dasar pengelolaan air dan hara yang tidak lagi bergantung pada jadwal tetap, melainkan pada informasi kondisi tanah aktual.

### Arsitektur Sistem dan Integrasi Awal

Arsitektur sistem KopiSense dirancang sebagai sistem pemantauan tanah berbasis *Internet of Things* yang mengintegrasikan node sensor, unit pemrosesan data, dan antarmuka visualisasi dalam satu alur akuisisi data yang berkesinambungan. Node sensor terdiri

atas sensor kelembapan tanah, sensor hara N-P-K, serta sensor pH dan suhu tanah yang terhubung ke mikrokontroler ESP8266 sebagai pusat kendali. Mikrokontroler berfungsi membaca data sensor secara periodik, melakukan pemrosesan awal, dan mengirimkan data melalui jaringan Wi-Fi ke server lokal (Fakhrudin, Hakim, & Budi, 2023; Khalid, Jamil, Khan, & Awais, 2024). Diagram alur data sistem pemantauan tanah berbasis IoT ditunjukkan pada Gambar 2, yang menggambarkan proses pengumpulan, transmisi, penyimpanan, dan visualisasi data secara terintegrasi.

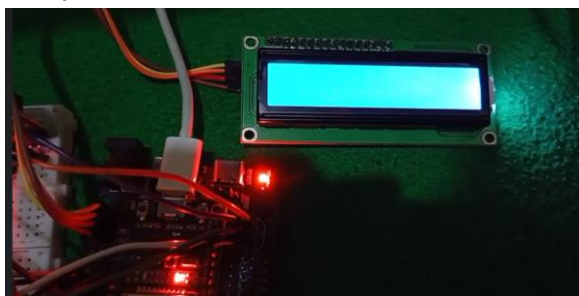


Gambar 2. Diagram alur data Kopisense

Komunikasi data pada sistem berlangsung melalui transmisi nirkabel yang menghubungkan node sensor dengan server secara *real-time*. Data yang dihasilkan sensor dibaca dan diproses oleh mikrokontroler ESP8266, kemudian dikemas dalam format terstruktur yang mencakup parameter kelembapan tanah, kandungan nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), pH, suhu tanah, serta penanda waktu (*timestamp*).

Pengiriman data dilakukan melalui jaringan Wi-Fi menggunakan protokol HTTP, di mana mikrokontroler berperan sebagai klien yang mengirimkan data ke server lokal. Data yang diterima selanjutnya disimpan dalam basis data dan divisualisasikan melalui *dashboard web* secara *real-time*. Mekanisme ini memungkinkan sinkronisasi antara data *real-time* dan data historis, serta menunjukkan bahwa proses transmisi dan penyimpanan data berlangsung secara stabil tanpa kehilangan informasi selama periode pengujian.

Arsitektur komunikasi ini mendukung pemisahan fungsi antara akuisisi data di lapangan dan pengelolaan data di sisi server, sehingga memungkinkan pemantauan kondisi tanah secara kontinu, terstruktur, dan mudah diakses, serta membuka peluang pengembangan lebih lanjut menuju sistem pengambilan keputusan berbasis data (Mora-Delgado, Pablo Serrano-Rubio, Rodríguez-Vidal, Herrera-Guzmán, & Oropeza-Guzmán, 2024).



**Gambar 3.** Desain Sistem dan Integrasi Perangkat Keras Kopisense

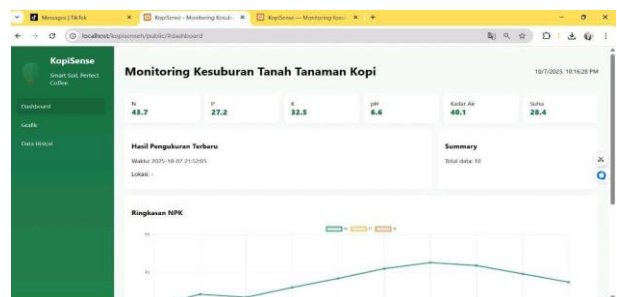
Hasil integrasi awal menunjukkan bahwa seluruh komponen utama sistem node sensor, mikrokontroler, dan server dapat beroperasi secara sinkron. Indikator operasional pada mikrokontroler

mengonfirmasi bahwa *firmware* dan siklus pembacaan sensor berjalan stabil, sementara komunikasi data antara node sensor dan server berlangsung tanpa gangguan signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa arsitektur sistem telah memenuhi prasyarat fungsional sebagai platform pemantauan tanah berbasis IoT (Placidi et al., 2021).

Integrasi awal ini tidak ditujukan untuk mengevaluasi akurasi absolut sensor, melainkan untuk memastikan kesiapan sistem dalam melakukan akuisisi dan transmisi data secara *real-time*. Dengan demikian, hasil ini menjadi dasar penting untuk tahapan kalibrasi sensor dan pengujian lapangan yang lebih komprehensif pada penelitian selanjutnya.

### Tampilan Sistem dan Akuisisi Data Awal

Tampilan sistem Kopisense berfungsi sebagai antarmuka pemantauan yang menyajikan parameter utama kondisi tanah secara *real-time*, meliputi kadar nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), pH tanah, kelembapan tanah, dan suhu tanah. Seluruh parameter diperbarui secara otomatis mengikuti proses akuisisi data dari node sensor, sehingga perubahan kondisi tanah dapat diamati secara langsung melalui *dashboard web*.



**Gambar 4.** Tampilan dashboard kopisense  
Dashboard sistem tidak hanya menampilkan nilai parameter tanah secara

numerik, tetapi juga dapat dikembangkan untuk menyajikan visualisasi data dalam bentuk grafik tren waktu. Visualisasi ini memungkinkan pengguna untuk mengamati dinamika perubahan kelembapan dan kandungan hara tanah secara lebih intuitif, sehingga memudahkan interpretasi kondisi tanah dalam jangka waktu tertentu.

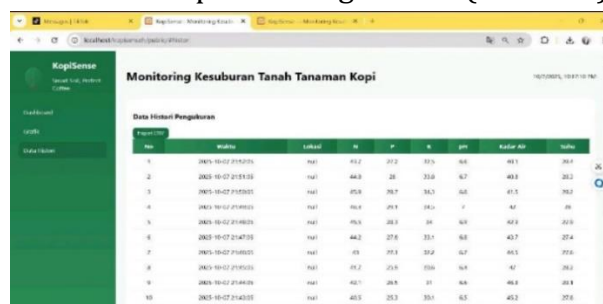
Hasil pengujian menunjukkan bahwa data yang dibaca oleh sensor dapat ditransmisikan dan divisualisasikan secara konsisten tanpa jeda yang berarti. Setiap nilai parameter yang ditampilkan pada dashboard tercatat secara simultan dalam basis data dengan penanda waktu (*timestamp*), yang menandakan bahwa proses akuisisi data, transmisi, dan penyimpanan berjalan secara sinkron. Rata-rata hasil sepuluh kali pengukuran berturut-turut menunjukkan nilai N sebesar  $43,7 \pm 1,5$  mg/kg, P sebesar  $27,2 \pm 1,3$  mg/kg, dan K sebesar  $32,5 \pm 1,2$  mg/kg, dengan pH tanah 6,6, kadar air 40,1%, dan suhu tanah  $28,4^{\circ}\text{C}$ . Kisaran ini berada dalam rentang kondisi fisiologis yang mendukung pertumbuhan tanaman kopi, khususnya pada fase vegetatif awal, sebagaimana dilaporkan oleh Francisco et al., (2022) dan DaMatta et al., (2019).

Variasi yang relatif kecil antar waktu pengukuran mengindikasikan stabilitas sinyal sensor dan konsistensi akuisisi data, yang merupakan prasyarat penting sebelum sistem diterapkan pada kondisi kebun yang lebih heterogen (RuiPeng, Jianbu, Jianrui, Aridas, & Talip, 2024). Meskipun demikian, akurasi absolut nilai NPK masih memerlukan kalibrasi laboratorium terhadap metode analitik standar untuk memastikan kesesuaian dengan kandungan

hara aktual tanah. Stabilitas awal ini tetap menjadi indikator positif bagi keandalan sistem sebagai alat monitoring kontinu (Abdullah et al., 2025).

### Rekaman Historis dan Ketertelusuran Data

Panel data histori menampilkan seluruh catatan pengukuran yang disertai timestamp otomatis, memungkinkan analisis dinamika temporal parameter tanah. Pola variasi unsur N, P, dan K yang terekam pada interval menit menunjukkan bahwa fungsi data logging sistem berjalan konsisten tanpa kehilangan data (*data loss*).



No	Waktu	Urea	P	K	pH	Kadar Air	Suhu
1	2025-10-02 21:05:55	44.2	27.2	32.5	6.6	40.1	28.4
2	2025-10-02 21:05:55	44.2	27.2	32.5	6.6	40.1	28.4
3	2025-10-02 21:05:55	44.2	27.2	32.5	6.6	40.1	28.4
4	2025-10-02 21:05:55	44.2	27.2	32.5	6.6	40.1	28.4
5	2025-10-02 21:05:55	44.2	27.2	32.5	6.6	40.1	28.4
6	2025-10-02 21:05:55	44.2	27.2	32.5	6.6	40.1	28.4
7	2025-10-02 21:05:55	44.2	27.2	32.5	6.6	40.1	28.4
8	2025-10-02 21:05:55	44.2	27.2	32.5	6.6	40.1	28.4
9	2025-10-02 21:05:55	44.2	27.2	32.5	6.6	40.1	28.4
10	2025-10-02 21:05:55	44.2	27.2	32.5	6.6	40.1	28.4

**Gambar 5.** Tampilan tabel data histori pengukuran di web Kopisense

Ketersediaan fitur ekspor data dalam format CSV memperluas potensi analisis lanjutan, seperti pemodelan regresi, analisis tren, dan evaluasi respons tanah terhadap perlakuan irigasi atau pemupukan. Ketertelusuran data (*traceability*) ini merupakan elemen kunci dalam sistem pertanian presisi berbasis IoT, karena memungkinkan identifikasi dini terhadap anomali akibat gangguan sensor, fluktuasi lingkungan, atau kesalahan transmisi data (Pramartaningthyas, Ma'shumah, & Al Hannan, 2025). Dengan adanya log digital, dinamika unsur hara dapat dianalisis seiring waktu, sehingga anomali akibat kesalahan sensor, gangguan sinyal, atau faktor lingkungan dapat diidentifikasi lebih cepat.

## Interpretasi Parameter Tanah dan Implikasi Fisiologis

Analisis sepuluh kali pengukuran menunjukkan rentang variasi N antara 41,1–45,6 mg/kg, P antara 25,3–29,1 mg/kg, dan K antara 30,1–34,5 mg/kg. Rentang variasi yang relatif sempit ini menunjukkan bahwa sensor NPK memiliki sensitivitas yang memadai untuk mendeteksi fluktuasi ion tanah dalam skala kecil, yang relevan untuk pemantauan kesuburan secara presisi. Secara agronomis, kisaran nilai tersebut mencerminkan tingkat kesuburan tanah yang cukup untuk mendukung pertumbuhan tanaman kopi, khususnya pada fase vegetatif, di mana nitrogen berperan dalam pembentukan biomassa, fosfor dalam perkembangan akar, dan kalium dalam regulasi keseimbangan air tanaman (Abdelaty, Abd-El-Hady, & Shehata, 2023). Kadar air tanah berada pada kisaran 40–45%, yang mencerminkan kondisi lembap dan mendukung difusi hara serta aktivitas akar tanaman kopi. Nilai pH tanah antara 6,1–7,0 menunjukkan kondisi netral hingga sedikit asam, yang mendukung ketersediaan fosfat dalam bentuk  $H_2PO_4^-$  yang mudah diserap akar. Interaksi antara kelembapan tanah, bentuk nitrogen, dan ketersediaan fosfor diketahui berperan penting dalam menentukan efisiensi penggunaan hara (NUE) dan laju fotosintesis tanaman kopi (Ramirez-Builes, Küsters, Thiele, & Lopez-Ruiz, 2024).

**Tabel 2.** Hasil pengamatan parameter tanah

Waktu	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	pH	Kadar air (%)	Suhu (OC)
2025-10-07 21:52:05	43.7	27.2	32.5	6.6	40.1	28.4
2025-10-07 21:52:05	44.8	28.0	33.8	6.7	40.0	28.3

2025-10-07 21:53:05	41.5	26.7	30.3	6.5	41.5	28.2
2025-10-07 21:54:05	45.2	26.7	34.5	6.7	40.3	28.0
2025-10-07 21:55:05	43.5	28.3	32.1	6.5	42.9	27.9
2025-10-07 21:56:05	44.2	27.8	33.1	6.7	40.7	27.8
2025-10-07 21:57:05	42.1	27.1	30.2	6.5	40.5	27.6
2025-10-07 21:58:05	41.7	27.3	31.0	6.6	40.0	27.4
2025-10-07 21:59:05	42.1	26.5	30.1	6.5	42.0	28.1
2025-10-07 22:00:05	43.5	27.2	32.1	6.5	42.1	27.8
2025-10-07 22:01:05						

Suhu tanah yang stabil pada kisaran 27–29°C menunjukkan bahwa sistem sensor relatif bebas dari thermal drift, suatu faktor yang penting karena fluktuasi suhu dapat memengaruhi konduktivitas listrik tanah dan pembacaan ionik (Abdullah et al., 2025). Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa KopiSense mampu merekam kondisi tanah yang representatif secara temporal, meskipun validasi kuantitatif terhadap metode laboratorium masih diperlukan untuk menentukan error margin aktual sensor.

### Relevansi Agronomis dan Signifikansi Teknologi

Sistem KopiSense mampu menyediakan informasi kondisi tanah secara langsung dan kontinu, sehingga merepresentasikan dinamika lingkungan perakaran tanaman kopi secara lebih akurat dibandingkan pengamatan konvensional.

Integrasi sensor kelembapan tanah dan hara N-P-K dalam arsitektur IoT memungkinkan pemantauan multi-parameter yang sinkron, terdokumentasi, dan dapat diakses secara real-time, dengan kestabilan data yang mendukung penerapan sistem monitoring berbasis pertanian presisi.

Implikasi praktis dari sistem ini terlihat pada potensi peningkatan efisiensi pengelolaan budidaya kopi. Data kelembapan tanah secara real-time memungkinkan penentuan waktu irigasi yang lebih tepat, sehingga mengurangi risiko kelebihan maupun kekurangan air. Selain itu, informasi kandungan hara tanah (N, P, K) dapat digunakan sebagai dasar penentuan dosis dan waktu pemupukan yang lebih terukur, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk.

Bagi petani, sistem ini memberikan kemudahan dalam memantau kondisi lahan secara langsung dan mengambil keputusan pengelolaan air dan pemupukan secara lebih tepat tanpa bergantung pada perkiraan visual. Integrasi dengan dashboard berbasis web juga memungkinkan monitoring dilakukan secara jarak jauh, sehingga pengelolaan lahan dapat dilakukan secara lebih responsif, efisien, dan berbasis data.

## KESIMPULAN

Sistem KopiSense mampu memantau kelembapan dan hara tanah secara *real-time* dan kontinu melalui integrasi multi-parameter berbasis IoT. Sistem menunjukkan kinerja yang stabil dengan variasi data yang rendah (N 43,7±1,5 mg/kg; P 27,2±1,3 mg/kg; K 32,5±1,2

mg/kg; pH 6,6; kadar air ±40%) serta konsistensi data tanpa kehilangan selama pengujian, sehingga mampu merepresentasikan kondisi tanah secara andal. Secara praktis, sistem ini berpotensi meningkatkan efisiensi pengelolaan air dan pemupukan serta mendukung monitoring lahan secara jarak jauh berbasis data. Pengembangan selanjutnya perlu diarahkan pada kalibrasi sensor, integrasi sistem rekomendasi pemupukan dan irigasi, serta pengujian skala lapang untuk meningkatkan akurasi dan keberterapan sistem.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai melalui program Dana Padanan (*Matching Fund*), Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi tahun 2025 dengan nomor kontrak 15748/PL17/PG/2025. Tim pelaksana juga mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Jember dan Perusahaan Umum Daerah Perkebunan Kahyangan Jember.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdelaty, E., Abd-El-Hady, A., & Shehata, E. (2023). Soil Fertility Evaluation and Fertilizer Requirements of Nitrogen, Phosphorus and Potassium for Wheat Production (Sharq El-Owainat – Western South Egypt). *Alexandria Science Exchange Journal*, 44(3), 419–431.  
<https://doi.org/10.21608/asejaiqjsae.2023.315235>
- Asrul Abdullah, Eka Indah Raharjo, Muhammad Iwan, Rizki Faizal, & Maryogi. (2025). Development of an IoT-based Soil Nutrient Monitoring and GIS Mapping System for Precision Agriculture. *Advance Sustainable*

- Science Engineering and Technology*, 7(4), 02504037.  
<https://doi.org/10.26877/asset.v7i4.2191>
- Astolfi, M., Rispoli, G., Gherardi, S., Zonta, G., & Malagù, C. (2023). Reproducibility and Repeatability Tests on (SnTiNb)O<sub>2</sub> Sensors in Detecting ppm-Concentrations of CO and Up to 40% of Humidity: A Statistical Approach. *Sensors*, 23(4), 1983.  
<https://doi.org/10.3390/s23041983>
- BPS. (2026). *Produksi Perkebunan Besar Bulanan Menurut Jenis Tanaman (Ribu Ton)*, 2025. Jakarta.
- DaMatta, F. M., Rahn, E., Läderach, P., Ghini, R., & Ramalho, J. C. (2019). Why could the coffee crop endure climate change and global warming to a greater extent than previously estimated? *Climatic Change*, 152(1), 167–178.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-018-2346-4>
- Fakhrudin, A. D., Hakim, N. F. A., & Budi, A. H. S. (2023). Implementasi Protokol TCP dan UDP pada Sistem Monitoring dan Otomasi Rumah Jamur Berorientasi WSN. *TELKA - Telekomunikasi Elektronika Komputasi Dan Kontrol*, 9(2), 130–144.  
<https://doi.org/10.15575/telka.v9n2.130-144>
- Francisco, J. M. S., Labajo, J. R. N., & Ebuna, R. M. (2022). Soil quality assessment on coffee (*Coffea* spp.) farms in Pigtauranan, Bukidnon, Philippines. *International Journal of Tropical Drylands*, 6(2).  
<https://doi.org/10.13057/tropdrylands/t060202>
- Khalid, W., Jamil, M., Khan, A. A., & Awais, Q. (2024). Open-Source Internet of Things-Based Supervisory Control and Data Acquisition System for Photovoltaic Monitoring and Control Using HTTP and TCP/IP Protocols. *Energies*, 17(16), 4083.  
<https://doi.org/10.3390/en17164083>
- Kushwaha, Y. K., Joshi, A., Panigrahi, R. K., & Pandey, A. (2024). Development of a smart irrigation monitoring system employing the wireless sensor network for agricultural water management. *Journal of Hydroinformatics*, 26(12), 3224–3243.  
<https://doi.org/10.2166/hydro.2024.241>
- Margiwiyatno, A., Sudarmaji, A., Siswantoro, Masrukhi, Irawadi, Wijaya, K., ... Furqon. (2025). Use of Capacitive Sensors for Measuring Soil Water Content in Irrigation Systems: A Review. *BIO Web of Conferences*, 158, 01001.  
<https://doi.org/10.1051/bioconf/202515801001>
- Mora-Delgado, C. Á., Pablo Serrano-Rubio, J., Rodríguez-Vidal, L. M., Herrera-Guzmán, R., & Oropeza-Guzmán, M. T. (2024). Develop of a Low Cost IoT System for the Moisture and Nutrient Soil Monitoring. *2024 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 1–6. IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/ROPEC62734.2024.10877060>
- Pais, I. P., Moreira, R., Semedo, J. N., Ramalho, J. C., Lidon, F. C., Coutinho, J., ... Scotti-Campos, P. (2022). Wheat Crop under Waterlogging: Potential Soil and Plant Effects. *Plants*, 12(1), 149.  
<https://doi.org/10.3390/plants12010149>
- Placidi, P., Morbidelli, R., Fortunati, D., Papini, N., Gobbi, F., & Scorzoni, A. (2021). Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors. *Sensors*, 21(15), 5110.  
<https://doi.org/10.3390/s21155110>
- Pramartaningthya, E. K., Ma'shumah, S., & Al Hannan, A. (2025). Design and

- Implementation of an IoT-Based Automatic Irrigation and Monitoring System for Bird's Eye Chili Plants with Telegram and Blynk Platform Integration. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 9(3), 1248–1257.  
<https://doi.org/10.70609/g-tech.v9i3.7160>
- Ramirez-Builes, V. H., Küsters, J., Thiele, E., & Lopez-Ruiz, J. C. (2024). Physiological and Agronomical Response of Coffee to Different Nitrogen Forms with and without Water Stress. *Plants*, 13(10).  
<https://doi.org/10.3390/plants13101387>
- Ruipeng, T., Jianbu, Y., Jianrui, T., Aridas, N. K., & Talip, M. S. A. (2024). Design of agricultural wireless sensor network node optimization method based on improved data fusion algorithm. *PLoS ONE*, 19(11 November).  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308845>
- Silva, E. R. O. da, Silva, T. L. da, Wei, M. C. F., Souza, R. A. de, & Molin, J. P. (2025). Spatial and Temporal Variability Management for All Farmers: A Cell-Size Approach to Enhance Coffee Yields and Optimize Inputs. *Plants*, 14(2), 169.  
<https://doi.org/10.3390/plants14020169>
- Tanti Novita, Venti Novita Sari, Risa Oktaria, & Lisa Malinda. (2025). Utilizing Mathematical Models as a Basis for Coffee Cultivation Techniques. *International Journal of Education, Vocational and Social Science*, 4(01), 383–395.  
<https://doi.org/10.63922/ijevss.v4i01.1624>