



Pengembangan Sistem Instrumentasi dan Monitoring Berbasis Edge Menggunakan Multi-Parameter Spatial Decision Index untuk Pemantauan Tanah Multi-Node

Puteri Nurul Ma'rifah*, Puteri Nurul Magfirah, Achmad Zain Nur, Wildan Surya Wijaya

^{1,3} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Trunodjoyo Madura, Bangkalan, Indonesia

² Badan Intelijen Pertahanan, Kementerian Pertahanan Republik Indonesia, Jakarta, Indonesia

⁴ Program Studi Teknik Elektro, Universitas PGRI Adi Buana, Surabaya, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received April 20, 2026

Revised Mei 25, 2026

Accepted Juni 19, 2026

Available online Juli 21, 2026

Kata Kunci:

Pertanian presisi, Monitoring multi-node, Komunikasi LoRa, Sensor kelembapan tanah, Sensor pH tanah, Edge computing, Internet of Things, Multi-Parameter Spatial Decision Index (MSDI)

Keywords:

Precision agriculture, Multi-node monitoring, LoRa communication, Soil moisture sensor, Soil pH sensor, Edge computing, Internet of Things, Multi-Parameter Spatial Decision Index (MSDI)

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.

Copyright © 2022 by Author. Published by Universitas PGRI ADI BUANA SURABAYA.

ABSTRAK

Pemantauan tanah berbasis satu titik sering kali belum mampu menggambarkan kondisi lahan yang memiliki variasi spasial. Penelitian ini mengusulkan sistem monitoring tanah multi-node yang mengintegrasikan sensor kelembapan tanah kapasitif, sensor pH tanah, komunikasi LoRa, serta pendekatan Edge-Based Spatial Aggregation menggunakan Multi-Parameter Spatial Decision Index (MSDI). Empat node sensor mengirimkan data secara periodik ke gateway untuk dilakukan agregasi dan pengambilan keputusan sebelum ditampilkan pada dashboard. Evaluasi meliputi akurasi sensor, kinerja komunikasi, dan konsistensi keputusan. Hasil pengujian menunjukkan Packet Delivery Ratio sebesar 98,25% dengan rata-rata delay di bawah 135 ms, serta komunikasi yang stabil. Metode MSDI mampu mengklasifikasikan kondisi tanah ke dalam kategori Critical, Moderate, dan Optimal, sekaligus mengurangi pengaruh pembacaan ekstrem dari satu node. Pendekatan yang diusulkan menghasilkan informasi kondisi lahan yang lebih representatif dan mendukung pengambilan keputusan pada sistem pertanian presisi berbasis *Internet of Things*.

ABSTRACT

Single-point soil monitoring is often insufficient to characterize land conditions that exhibit spatial variation. This study proposes a multi-node soil monitoring system that integrates capacitive soil moisture sensors, soil pH sensors, LoRa communication, and an Edge-Based Spatial Aggregation approach using the Multi-Parameter Spatial Decision Index (MSDI). Four sensor nodes periodically transmit data to a gateway for aggregation and decision-making before the data is displayed on a dashboard. The evaluation covers sensor accuracy, communication performance, and decision consistency. Test results show a Packet Delivery Ratio of 98.25% with an average delay of less than 135 ms, as well as stable communication. The MSDI method is capable of classifying soil conditions into the categories of Critical, Moderate, and Optimal, while reducing the influence of extreme readings from a single node. The proposed approach produces more representative information on land conditions and supports decision-making in Internet of Things-based precision agriculture systems.

I. PENDAHULUAN

Sektor pertanian memainkan peran penting dalam menjaga ketahanan pangan nasional sekaligus menjadi sumber mata pencaharian bagi sebagian besar penduduk Indonesia [1]. Seiring meningkatnya permintaan pangan akibat pertumbuhan penduduk, produktivitas pertanian harus terus ditingkatkan

*Corresponding author.

tanpa mengorbankan pemanfaatan sumber daya alam yang efisien. Food and Agriculture Organization (FAO) Perserikatan Bangsa-Bangsa memperkirakan bahwa produksi pangan global perlu ditingkatkan sekitar 60–70% pada tahun 2050 untuk memenuhi kebutuhan populasi dunia yang terus bertambah [2]. Di sisi lain, perubahan iklim [3], keterbatasan ketersediaan air, dan degradasi tanah merupakan tantangan utama yang memengaruhi produktivitas pertanian [4]. Oleh karena itu, pengelolaan lahan berbasis data telah menjadi pendekatan yang semakin banyak diterapkan dalam konsep pertanian presisi [5], [6]. Dalam pendekatan ini, keputusan pertanian tidak lagi hanya bergantung pada pengalaman petani, tetapi didukung oleh informasi *real-time* mengenai kondisi lahan yang diperoleh melalui sistem pemantauan.

Kelembaban tanah dan pH merupakan dua parameter kunci yang menentukan keberhasilan pertumbuhan tanaman. Kelembaban tanah berhubungan langsung dengan ketersediaan air yang dibutuhkan oleh akar tanaman [7], sedangkan pH tanah memengaruhi kelarutan nutrisi dan kemampuan tanaman untuk menyerapnya [8]. Bahkan perubahan sekecil apa pun pada kedua parameter ini dapat memengaruhi efisiensi irigasi dan pemupukan [7], [8]. Namun, kondisi tanah di lahan pertanian umumnya heterogen [9], sehingga nilai kelembaban dan pH di satu titik tidak selalu mewakili kondisi seluruh petak lahan. Pengukuran yang dilakukan hanya di satu lokasi sering kali menghasilkan keputusan yang kurang akurat, terutama pada lahan dengan distribusi air yang tidak merata atau karakteristik tanah yang bervariasi [10]. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pemantauan yang mampu menggambarkan kondisi spasial lahan tetap menjadi kebutuhan yang sangat penting.

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) telah mendorong terciptanya berbagai sistem pemantauan pertanian berbasis sensor yang mampu mengirimkan data secara *real-time*. Berbagai penelitian telah memanfaatkan mikrokontroler ESP32 yang dipadukan dengan sensor kelembaban tanah dan pH untuk mendukung pemantauan kondisi tanah melalui jaringan *Wi-Fi* [11] atau LoRa [12], [13]. Penelitian lain telah mengintegrasikan sistem pemantauan dengan *platform cloud* seperti Blynk [14], *Firestore* [13], dan *Thing Speak* [12], sehingga pengguna dapat mengakses informasi melalui aplikasi seluler atau antarmuka berbasis web. Selain itu, beberapa penelitian telah mengembangkan sistem multi-node untuk memperluas cakupan area pengukuran [15], sementara penelitian lain berfokus pada efisiensi komunikasi data [16] menggunakan jaringan nirkabel berdaya rendah [17]. Hasil-hasil ini menunjukkan bahwa teknologi IoT telah memberikan kontribusi yang signifikan dalam mendukung digitalisasi sektor pertanian.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih memperlakukan node sensor sebagai pengirim data ke *cloud* [18], sementara pengambilan keputusan baru dilakukan setelah semua data diterima oleh server [19]. Selain itu, penelitian mengenai sistem multi-node umumnya hanya menampilkan pembacaan dari masing-masing sensor secara terpisah atau menggunakan rata-rata sederhana tanpa mempertimbangkan variasi spasial antar titik pengukuran [15], [16], [20]. Akibatnya, keputusan yang dihasilkan mungkin tidak secara akurat mencerminkan kondisi lahan yang sebenarnya.

Untuk mengatasi masalah ini, penelitian ini mengembangkan Sistem Instrumentasi dan Monitoring berbasis *edge computing* dengan memperkenalkan metode *Multi-Parameter Spatial Decision Index* (MSDI) sebagai mekanisme pengambilan keputusan dalam sistem pemantauan multi-node. Dengan pendekatan ini, gateway berfungsi sebagai pusat komputasi lokal (perangkat tepi) yang secara langsung melakukan akuisisi data, integrasi, evaluasi, dan pengambilan keputusan. Pendekatan ini diharapkan dapat mengurangi latensi komunikasi, meningkatkan efisiensi pemrosesan data, dan menghasilkan keputusan yang lebih stabil dibandingkan dengan sistem pemantauan konvensional.

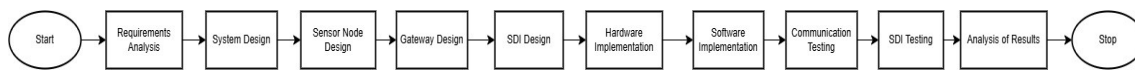
Kontribusi utama penelitian ini mencakup tiga aspek. Pertama, merancang sistem instrumentasi dan pemantauan terhubung yang didasarkan pada empat node sensor untuk mengukur kelembaban tanah dan pH menggunakan arsitektur *edge computing*. Kedua, mengembangkan metode *Multi-Parameter Spatial Decision Index* (MSDI) sebagai pendekatan baru untuk mengintegrasikan informasi spasial dari berbagai node guna menghasilkan keputusan yang lebih representatif terhadap kondisi lahan. Ketiga, mengevaluasi kinerja sistem melalui pengujian akurasi sensor, kinerja komunikasi jaringan, dan efektivitas metode MSDI pada berbagai skenario distribusi kondisi tanah. Keempat, penelitian ini membandingkan MSDI yang diusulkan dengan pendekatan agregasi konvensional (rata-rata, median, dan skenario terburuk) untuk menunjukkan ketahanannya di bawah kondisi tanah yang heterogen. Studi pemantauan multi-node yang ada umumnya melakukan agregasi menggunakan rata-rata aritmetika atau menampilkan pembacaan sensor secara individual. Namun, pendekatan-pendekatan ini sensitif terhadap heterogenitas spasial dan tidak secara eksplisit mempertimbangkan konsistensi spasial di antara node

sensor. Selain berkontribusi pada pengembangan bidang Sistem Instrumentasi & Pemantauan Terhubung, penelitian ini juga mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya SDG 2 (Nol Kelaparan), SDG 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur), serta SDG 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab).

II. MATERIAL DAN METODE

A. Kerangka Penelitian

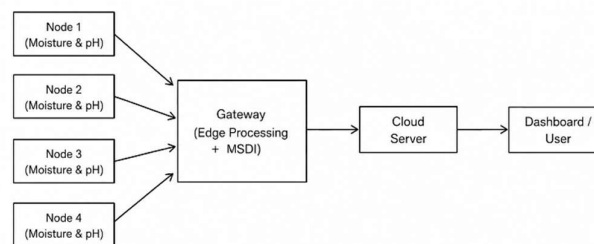
Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan merancang sistem instrumentasi terhubung yang terdiri dari empat *node* sensor dan satu gateway berbasis komputasi tepi. Setiap node secara berkala mengumpulkan data kelembaban tanah dan pH, kemudian mengirimkan hasil pengukuran tersebut ke *gateway* melalui jaringan nirkabel. Berbeda dengan sistem pemantauan konvensional yang langsung meneruskan semua data ke *cloud*, *gateway* dalam penelitian ini berfungsi sebagai pusat pemrosesan lokal yang mengagregasi data dan menghasilkan keputusan sebelum informasi tersebut dikirim ke platform pemantauan. Pendekatan ini memungkinkan proses analisis dilakukan lebih dekat dengan sumber data, sehingga mengurangi latensi komunikasi sekaligus meningkatkan efisiensi pertukaran data. Tahapan penelitian disusun secara sistematis, mulai dari identifikasi persyaratan sistem hingga evaluasi kinerja. Bagan alur penelitian yang diusulkan ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Bagan Alur Proses Riset

B. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem ini dikembangkan menggunakan konsep Sistem Instrumentasi dan Pemantauan Terhubung (*Connected Instrumentation and Monitoring System*), yang terdiri dari empat node sensor, satu *gateway* berbasis ESP32, jaringan komunikasi nirkabel, *cloud server*, dan antarmuka pemantauan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2**. Setiap node ditempatkan di lokasi pengukuran yang berbeda untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi tanah. Node-node tersebut secara bersamaan mengukur tingkat kelembaban tanah dan pH, kemudian mengirimkan data tersebut ke *gateway* melalui komunikasi nirkabel. *Gateway* menerima semua paket data, memvalidasinya, menghitung Indeks Keputusan Spasial Multi-Parameter MSDI, dan kemudian mengirimkan hasil agregat ke *cloud* sehingga pengguna menerima satu penilaian terpadu yang telah dianalisis mengenai kondisi lahan. Arsitektur sistem ini dapat dibagi menjadi empat lapisan utama: lapisan sensor, lapisan komunikasi, lapisan pemrosesan tepi, dan lapisan aplikasi. Pembagian ini memudahkan pengembangan dan evaluasi masing-masing komponen secara independen.

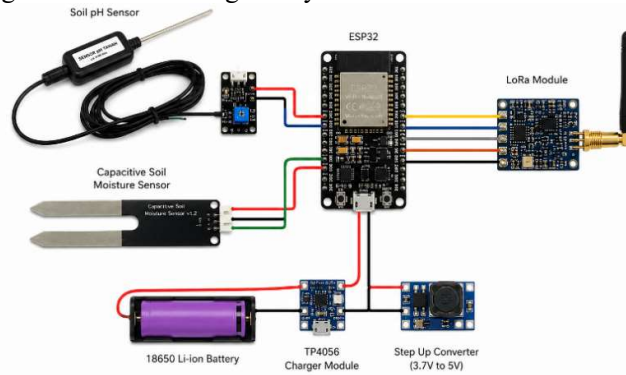


Gambar 2. Blok Diagram Sistem

C. Desain Hardware

Keempat node pemantauan tersebut menggunakan mikrokontroler ESP32 yang dipadukan dengan sensor kelembaban tanah dan pH, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3**, yang menggambarkan diagram pengkabelan salah satu node. Jarak antar node ditetapkan sebesar 5 meter secara relatif seragam agar distribusi pengukuran dapat mencerminkan variasi spasial di wilayah pengamatan. Setiap node

secara berkala membaca data dari sensor dengan interval pengumpulan data setiap 10 menit dan mengirimkan hasil pengukuran tersebut ke gateway.



Gambar 3. node wiring diagram

Gateway ini juga menggunakan ESP32 dengan konfigurasi yang berbeda, sehingga memungkinkan perangkat tersebut berfungsi baik sebagai penerima data dari semua node maupun sebagai perangkat komputasi tepi. Selain menerima paket data, gateway ini menjalankan algoritma *Multi-Parameter Spatial Decision Index* untuk menentukan kondisi tanah berdasarkan informasi yang diperoleh dari semua node.

D. Desain Software

Perangkat lunak sistem ini dikembangkan menggunakan Arduino IDE. Program pada node membaca data sensor, melakukan kalibrasi awal, menyusun paket data, dan mengirimkannya ke *gateway*. Sementara itu, perangkat lunak *gateway* menyinkronkan data, menghitung indeks keputusan, dan meneruskan hasil akhir ke dasbor pemantauan melalui internet. Dasbor pemantauan ini dikembangkan menggunakan platform Blynk, sehingga pengguna dapat memantau kondisi lahan secara real-time melalui perangkat seluler atau komputer.

E. Multi-Parameter Spatial Decision Index (MSDI)

Penelitian ini mengusulkan *Multi-Parameter Spatial Decision Index* (MSDI) sebagai metode pengambilan keputusan untuk sistem pemantauan multi-node berbasis *edge computing*. Berbeda dengan metode konvensional yang umumnya hanya menggunakan nilai rata-rata dari satu parameter, MSDI mengintegrasikan informasi mengenai kelembaban tanah, pH, dan keseragaman distribusi data di seluruh node untuk menghasilkan gambaran tunggal yang mewakili kondisi lahan. Seluruh proses perhitungan dilakukan di *gateway* sehingga keputusan dapat diambil secara lokal sebelum data dikirim ke *platform cloud*. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan representasi kondisi lahan sekaligus mengurangi ketergantungan pada pemrosesan berbasis *server*.

- Menghitung Rata-rata Kelembaban Tanah dan pH Tanah
Langkah pertama adalah menghitung nilai rata-rata kelembaban tanah dan nilai rata-rata pH tanah yang diperoleh dari semua node sensor. Nilai ini digunakan untuk menggambarkan kondisi umum terkait kelembaban tanah dan pH tanah.

$$\bar{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i \quad (1)$$

Kemudian, untuk pH,

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

dengan,

- $\bar{M}$: kelembaban tanah rata-rata (%)
- M_i : nilai kelembaban tanah di node ke- i
- $\bar{P}$: rata-rata pH tanah
- P_i : nilai pH tanah pada node ke- i
- n : jumlah node sensor
- i : indeks node sensor

- Analisis Homogenitas Spasial
Selain nilai rata-rata, sistem ini juga menganalisis tingkat homogenitas dalam distribusi data di seluruh node. Langkah ini bertujuan untuk menentukan apakah kondisi tanah relatif homogen atau

menunjukkan variabilitas yang tinggi. Standar deviasi kadar air dihitung menggunakan Persamaan.

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n}} \quad (3)$$

Sementara itu, simpangan baku pH dihitung menggunakan Persamaan.

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n}} \quad (4)$$

- Perhitungan Koefisien Variasi

Koefisien variasi digunakan untuk mengukur tingkat dispersi data relatif terhadap rata-ratanya.

Untuk kelembapan,

$$CV_M = \frac{\sigma_M}{\bar{M}} \quad (5)$$

$$CV_P = \frac{\sigma_P}{\bar{P}} \quad (6)$$

Semakin kecil koefisien variasi, semakin seragam kondisi pengukuran di seluruh node.

- *Spatial Uniformity Index*

Tingkat keseragaman spasial kemudian dihitung menggunakan *Spatial Uniformity Index* (SUI).

$$SUI = 1 - \frac{CV_M + CV_P}{2} \quad (7)$$

Nilai SUI berkisar dari 0 hingga 1. Semakin dekat nilainya dengan 1, semakin seragam kondisi tanahnya.

- Normalisasi Parameter

Karena kelembapan tanah, pH, dan SUI diukur pada skala yang berbeda, semua parameter dinormalisasi sebelum proses integrasi. Normalisasi kelembapan dilakukan menggunakan Persamaan.

$$M_n = \frac{\bar{M}}{100} \quad (8)$$

Normalisasi pH dihitung menggunakan Persamaan.

$$P_n = \frac{\bar{P}}{14} \quad (9)$$

- *Multi-Parameter Spatial Decision Index*

Nilai MSDI akhir diperoleh melalui kombinasi linear berbobot antara kelembapan, pH, dan keseragaman spasial.

$$MSDI = \alpha M_n + \beta P_n + \gamma SUI \quad (10)$$

dengan syarat

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (11)$$

Dalam studi ini, bobot ditetapkan sebagai berikut: $\alpha = 0.45$, $\beta = 0.30$, $\gamma = 0.25$

Nilai MSDI yang lebih tinggi menunjukkan kondisi lahan yang lebih baik berdasarkan kombinasi ketiga parameter ini.

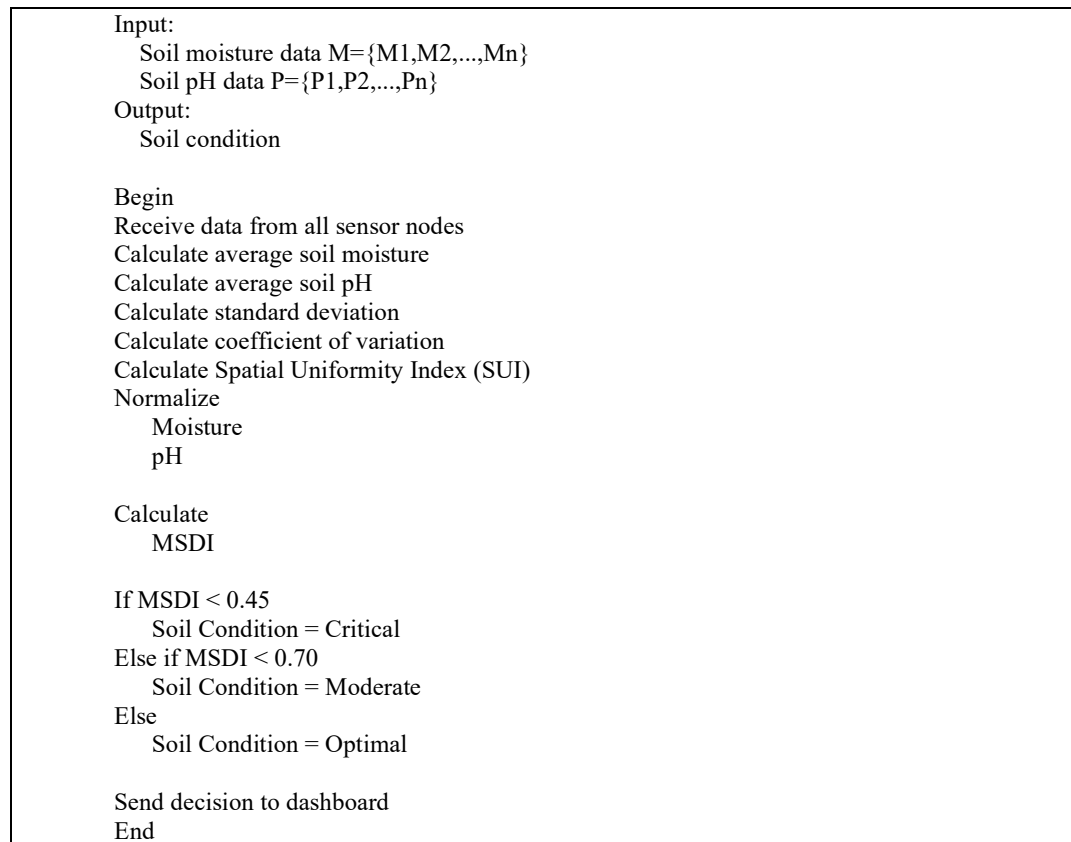
- Algoritma MSDI yang Diusulkan

Formulasi matematis yang disajikan pada subbagian sebelumnya menjelaskan cara perhitungan MSDI. Namun, untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai mekanisme pengambilan keputusan yang diterapkan di gateway, prosedur komputasi secara keseluruhan dirangkum dalam bentuk algoritma. Algoritma yang diusulkan melakukan semua perhitungan secara langsung di gateway tepi setelah menerima data pengukuran dari semua node sensor. Pendekatan ini memungkinkan gateway untuk menghasilkan keputusan akhir sebelum mengirimkan informasi yang telah dirangkum ke platform cloud, sehingga mengurangi beban komunikasi dan meningkatkan responsivitas sistem.

Algoritma dimulai dengan mengumpulkan pengukuran kelembapan tanah dan pH tanah yang dikirimkan dari setiap node sensor. Selanjutnya, nilai rata-rata kelembapan tanah dan pH tanah dihitung untuk mewakili kondisi keseluruhan area yang dipantau. Variabilitas pengukuran sensor kemudian dievaluasi menggunakan simpangan baku dan koefisien variasi, yang selanjutnya diubah menjadi SUI. Karena ketiga parameter tersebut memiliki rentang numerik yang berbeda, setiap parameter dinormalisasi sebelum diintegrasikan. Terakhir, parameter yang telah dinormalisasi digabungkan melalui persamaan MSDI tertimbang untuk menghasilkan satu indeks keputusan. Nilai MSDI yang dihasilkan dibandingkan dengan ambang batas keputusan yang telah

ditentukan sebelumnya untuk mengklasifikasikan lahan yang dipantau ke dalam kondisi Kritis, Sedang, atau Optimal.

Algoritma 1. Multi-Parameter Spatial Decision Index (MSDI) yang diusulkan



- **Klasifikasi Keputusan**
 Nilai MSDI kemudian digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan di gateway sebelum hasilnya dikirim ke cloud. Kategori keputusan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Klasifikasi Keputusan

Nilai MSDI	Kondisi Tanah	Rekomendasi
$MSDI < 0.45$	Kritis	Diperlukan tindakan segera (irigasi dan evaluasi pH)
$0.45 \leq MSDI < 0.70$	Sedang	Kondisinya cukup baik; Pemantauan diperlukan
$MSDI \geq 0.70$	Optimal	Kondisi tanah yang optimal

F. Parameter Evaluasi Kinerja Sistem

Kinerja sistem dievaluasi untuk menentukan keandalan instrumentasi dan komunikasi data, serta efisiensi konsumsi daya pada sistem pemantauan multi-node yang dikembangkan. Pengujian dilakukan pada tiga aspek utama: akurasi sensor, dan kinerja komunikasi. Kedua parameter ini dipilih karena mewakili karakteristik utama dari Sistem Instrumentasi dan Pemantauan Terhubung, khususnya untuk aplikasi pemantauan lahan secara *real-time*.

- **Akurasi Sensor**
 Akurasi sensor dievaluasi dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi. Dua parameter statistik digunakan dalam penelitian ini:
Mean Absolute Error (MAE)

MAE digunakan untuk menentukan selisih absolut rata-rata antara pembacaan sensor dan nilai referensi. Nilai MAE yang lebih kecil menunjukkan bahwa pembacaan sensor lebih mendekati nilai referensi.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (12)$$

Dengan,

n : Jumlah titik data uji

i : Indeks data uji

x_i : Nilai pembacaan sensor

y_i : Nilai pengukuran referensi

Root Mean Square Error (RMSE)

RMSE digunakan untuk mengukur besarnya penyimpangan pengukuran sensor dari nilai referensi. Nilai RMSE yang lebih rendah menunjukkan akurasi sensor yang lebih baik.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (13)$$

- Kinerja Komunikasi

Evaluasi komunikasi dilakukan untuk menentukan kemampuan sistem dalam mentransmisikan data dari node ke *gateway*.

Packet Delivery Ratio (PDR)

Packet Delivery Ratio digunakan untuk menentukan tingkat keberhasilan pengiriman paket data.

Nilai PDR yang lebih tinggi menunjukkan komunikasi yang lebih andal.

$$PDR = \frac{N_r}{N_s} \times 100\% \quad (14)$$

Dengan,

N_r : Jumlah paket yang diterima

N_s : Jumlah paket yang dikirim

Rata-rata *Delay*

Delay mengacu pada waktu yang dibutuhkan paket data untuk bergerak dari node ke *gateway*.

Nilai *delay* rendah menunjukkan bahwa proses komunikasi berjalan lebih cepat.

$$Delay = t_r - t_s \quad (15)$$

Dengan,

t_r : Waktu paket diterima

t_s : Waktu paket dikirim

Received Signal Strength Indicator (RSSI)

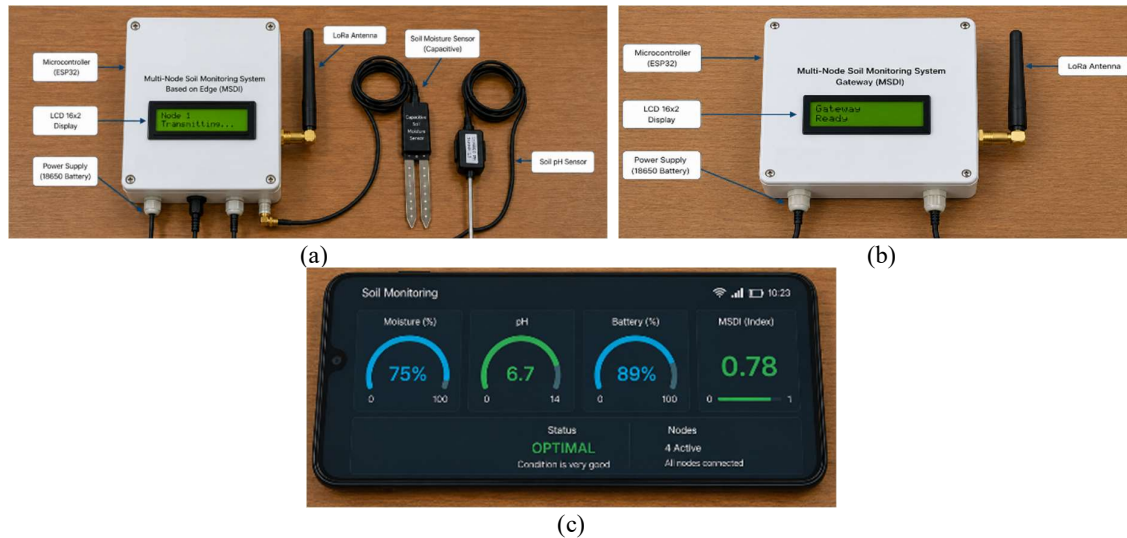
RSSI digunakan untuk menentukan kualitas sinyal komunikasi nirkabel yang diterima oleh *gateway* dari setiap node. Dalam studi ini, nilai RSSI diperoleh langsung dari modul komunikasi.

Semakin dekat nilainya dengan -30 dBm, semakin baik kualitas sinyalnya.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Hasil Implementasi Sistem

Sistem instrumentasi dan pemantauan berbasis tepi yang terhubung, yang menggunakan indeks keputusan spasial multiparameter untuk pemantauan tanah multi-node, telah berhasil diimplementasikan dengan tiga komponen utama: empat unit node, satu unit *gateway*, dan sistem pemantauan. Unit-unit node ini mampu mengukur dua parameter kualitas tanah rata-rata (pH dan kelembaban) secara real-time menggunakan mikrokontroler ESP32 (lihat Gambar 4a). Data yang diperoleh dikirimkan melalui LoRa ke *gateway*. *Gateway* tersebut juga menggunakan ESP32 dengan konfigurasi yang berbeda, sehingga memungkinkan *gateway* berfungsi baik sebagai penerima data dari semua node maupun sebagai perangkat komputasi tepi (lihat Gambar 4b). Selain menerima paket data, *gateway* menjalankan algoritma Indeks Keputusan Spasial Multiparameter untuk menentukan kondisi tanah berdasarkan informasi yang diperoleh dari semua node. Data dari *gateway* dikirimkan melalui Wi-Fi dan ditampilkan pada dasbor Blynk (lihat Gambar 4c).



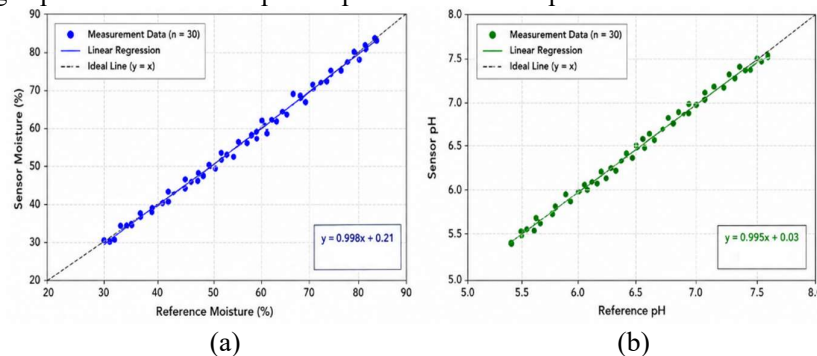
Gambar 4. Unit node, gateway, dan pemantauan untuk sistem instrumentasi dan pemantauan berbasis tepi menggunakan Multi-Parameter Spatial Decision Index untuk penginderaan tanah multi-node

B. Evaluasi Akurasi Sensor

Evaluasi akurasi sensor dilakukan untuk menentukan keandalan sistem pemantauan sebelum data tersebut digunakan sebagai masukan untuk metode *Multi-Parameter Spatial Decision Index* (MSDI). Pengujian dilakukan pada sensor kelembaban tanah kapasitif dan sensor pH tanah dengan membandingkan pembacaan sensor tersebut dengan pembacaan dari instrumen referensi yang telah dikalibrasi. Setiap sensor diuji sebanyak 30 kali dalam berbagai kondisi tanah untuk memperoleh karakteristik kinerja yang lebih representatif. Data pengukuran kemudian dianalisis menggunakan parameter *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE).

Perbandingan pembacaan dari sensor kelembaban tanah dan sensor pH tanah dengan instrumen referensi ditunjukkan pada Gambar 5a dan 5b. Secara umum, nilai yang dihasilkan oleh sensor mengikuti tren yang konsisten dengan nilai dari instrumen referensi

. Perbedaan pembacaan hanya terjadi pada beberapa titik pengamatan dan tetap berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi pemantauan lahan pertanian.



Gambar 5. a) Akurasi Sensor Kelembaban Tanah, b) Akurasi Sensor pH Tanah

Alih-alih menyajikan semua 30 hasil tes, studi ini menyediakan ringkasan statistik untuk memberikan gambaran yang lebih ringkas dan mudah dipahami tentang kinerja sensor. Ringkasan hasil uji sensor kelembaban tanah ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan Statistik Akurasi Sensor (n=30)

Statistik	Sensor Kelembaban Tanah	Sensor pH Tanah
Jumlah sampel (n)	30	30
Nilai Minimum	28.6%	5.42
Nilai Maksimum	81.3%	7.41
Nilai Mean	54.82%	6.53
Standard deviation	15.47	0.58

Mean Absolute Error (MAE)	0.53%	0.05
Root Mean Square Error (RMSE)	0.61%	0.07

C. Evaluasi Kinerja Komunikasi

Dalam penelitian ini, dilakukan evaluasi komunikasi untuk menentukan kualitas pertukaran data yang dihasilkan oleh empat node sensor yang ditempatkan di beberapa titik pengamatan, dengan jarak 5 meter antar node. Sementara itu, jarak dari node ke gateway divariasikan untuk mensimulasikan kondisi implementasi di lapangan pertanian pada dunia nyata. Setiap node mengirimkan data pengukuran kelembaban tanah dan pH tanah setiap 10 menit menggunakan modul komunikasi LoRa ke gateway. Selama proses pengujian, gateway secara otomatis mencatat waktu penerimaan paket, identitas node, kekuatan sinyal, dan status keberhasilan penerimaan paket. Parameter komunikasi yang dianalisis meliputi *Packet Delivery Ratio* (PDR), penundaan komunikasi, dan *Received Signal Strength Indicator* (RSSI). Evaluasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa data yang digunakan dalam perhitungan *Multi-Parameter Spatial Decision Index* (MSDI) diperoleh melalui komunikasi yang stabil dengan tingkat kehilangan paket yang rendah. Hasil pengujian untuk PDR, penundaan, dan RSSI ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil tes untuk PDR, delay, dan RSSI

Node	PDR			Delay			RSSI	
	Paket Dikirim	Paket Diterima	PDR %	Min (ms)	Max (ms)	Rata-rata (ms)	Jarak Dari gateway (m)	RSSI (dbm)
1	100	99	99.0	118	152	132	20	-61
2	100	98	98.0	121	149	135	40	-69
3	100	99	99.0	116	145	130	60	-76
4	100	97	97.0	120	151	134	80	-84

Dalam hasil pengujian PDR, semua node mampu mempertahankan tingkat keberhasilan pengiriman paket di atas 97%, dengan nilai rata-rata sebesar 98,25%. Hasil ini menunjukkan bahwa komunikasi LoRa yang digunakan masih mampu mempertahankan kualitas transmisi data meskipun setiap node berada di lokasi yang berbeda. Kehilangan paket yang terjadi selama pengujian relatif kecil dan tidak berdampak signifikan terhadap proses agregasi data di gateway. Hasil uji penundaan menunjukkan bahwa penundaan komunikasi rata-rata berada pada kisaran 130–135 ms. Nilai ini masih tergolong rendah, sehingga proses transmisi data dapat berlangsung hampir secara real-time. Perbedaan penundaan antar node dipengaruhi oleh kondisi propagasi sinyal selama proses pengujian. Untuk pengujian RSSI, diamati bahwa nilai RSSI menurun seiring bertambahnya jarak antara node dan gateway. Meskipun demikian, semua node masih menghasilkan nilai RSSI yang berada dalam rentang operasional LoRa, sehingga memastikan komunikasi tetap stabil tanpa gangguan yang signifikan.

D. Evaluasi Multi-Parameter Spatial Decision Index (MSDI)

Bagian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan metode *Multi-Parameter Spatial Decision Index* (MSDI) dalam menghasilkan keputusan berdasarkan hasil pengukuran dari empat node sensor. Skenario pengujian dimulai setelah gateway menerima seluruh data; nilai kelembaban tanah dan pH tanah dari setiap node diproses menggunakan algoritma *Edge-Based Spatial Aggregation*. Gateway menghitung nilai indeks berdasarkan persamaan MSDI yang dijelaskan dalam Subbagian II F. Nilai indeks tersebut kemudian digunakan sebagai dasar untuk menentukan kategori kondisi lahan sebelum informasi dikirim ke dasbor pemantauan. Tabel 4 menunjukkan satu set hasil pengukuran yang diperoleh dari empat node sensor pada waktu pengamatan yang sama.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Multi-Node dan Perhitungan MSDI

Node	Kelembapan Tanah (%)	pH Tanah	Kondisi Lokal
1	73.8	6.71	Lembap
2	70.5	6.63	Lembap
3	72.4	6.68	Lembap
4	38.6	6.55	Kering
Rata-rata	63.83	6.64	

Hasil pengukuran pada Tabel 4 menunjukkan bahwa tiga node mendeteksi kondisi tanah yang relatif lembap, sementara satu node menunjukkan kondisi tanah yang lebih kering. Selain itu, data pada Tabel 4 mengungkapkan kadar kelembapan tanah rata-rata sebesar 63,83% dan nilai pH tanah rata-rata sebesar 6,64. Setelah proses normalisasi dilakukan, diperoleh nilai MSDI sebesar 0,78. Nilai ini menunjukkan bahwa kondisi lahan masih berada dalam kategori “Optimal”, meskipun satu node menunjukkan kondisi tanah yang lebih kering. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan agregasi spasial mampu mengurangi pengaruh pembacaan lokal yang ekstrem, sehingga keputusan akhir menjadi lebih representatif terhadap kondisi lahan secara keseluruhan.

Untuk mengevaluasi konsistensi metode yang diusulkan, simulasi dilakukan untuk beberapa skenario kondisi lahan dengan hasil pengukuran yang bervariasi di setiap titik (lihat Tabel 5). Tujuan pengujian ini adalah untuk menentukan respons metode MSDI terhadap perubahan distribusi kelembapan tanah di dalam wilayah pengamatan.

Tabel 5. Evaluasi Skenario Keputusan Menggunakan MSDI

Skenario	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	MSDI	Decision
S1	Lembap	Lembap	Lembap	Lembap	0.91	Optimal
S2	Lembap	Lembap	Lembap	Kering	0.78	Optimal
S3	Lembap	Lembap	Kering	Kering	0.63	Sedang
S4	Lembap	Kering	Kering	Kering	0.49	Sedang
S5	Kering	Kering	Kering	Kering	0.28	Kritis

Hasil evaluasi pada Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai MSDI berubah secara bertahap sebagai respons terhadap perubahan kondisi pada setiap simpul. Ketika semua simpul menunjukkan kondisi tanah yang baik, nilai indeks tersebut masuk ke dalam kategori “Optimal”. Sebaliknya, ketika sebagian besar simpul menunjukkan kondisi kering, nilai indeks tersebut turun ke dalam kategori “Sedang” hingga “Kritis”. Karakteristik ini menunjukkan bahwa metode MSDI mampu menghasilkan keputusan yang lebih stabil dibandingkan dengan pendekatan satu simpul, karena keputusan tidak dipengaruhi oleh satu titik pengamatan saja.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan menerapkan sistem pemantauan tanah multi-node yang mampu mengukur kelembapan tanah dan pH tanah secara terdistribusi menggunakan empat node sensor. Setiap node mengirimkan data pengukuran ke *gateway* melalui komunikasi LoRa, *gateway* kemudian melakukan Agregasi Spasial Berbasis Edge menggunakan metode *Multi-Parameter Spatial Decision Index* (MSDI) untuk menghasilkan satu keputusan yang mewakili kondisi tanah secara keseluruhan. Pendekatan ini memungkinkan pengambilan keputusan dilakukan lebih dekat ke sumber data, sehingga menghasilkan waktu respons sistem yang lebih cepat dan mengurangi ketergantungan pada pemrosesan di sisi server.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mempertahankan kualitas komunikasi yang baik dengan tingkat keberhasilan pengiriman paket yang tinggi, sementara nilai penundaan dan RSSI tetap berada dalam rentang stabil yang umum pada komunikasi LoRa. Evaluasi terhadap metode MSDI juga mengungkapkan bahwa keputusan yang dihasilkan lebih representatif dibandingkan dengan pendekatan satu node, terutama ketika terdapat kondisi yang berbeda di salah satu titik pengamatan. Melalui proses agregasi spasial, sistem mampu memitigasi pengaruh pembacaan ekstrem, memastikan bahwa keputusan akhir tidak hanya bergantung pada satu sensor saja.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi arsitektur multi-node, komunikasi LoRa, dan mekanisme Agregasi Spasial Berbasis Edge untuk mendukung pengambilan keputusan dalam sistem pemantauan pertanian presisi. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan representasi kondisi lahan, tetapi juga memberikan landasan untuk mengembangkan sistem pemantauan yang lebih efisien di kawasan pertanian yang lebih luas.

Penelitian di masa depan dapat diperluas dengan meningkatkan jumlah node, mengintegrasikan parameter lingkungan tambahan seperti suhu tanah, konduktivitas listrik, dan kandungan nutrisi, serta menerapkan metode pembobotan adaptif atau algoritma kecerdasan buatan untuk meningkatkan akurasi proses pengambilan keputusan terkait berbagai karakteristik lahan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DPPM) melalui Program Pengabdian kepada Masyarakat Tahun 2025. Penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada DPPM atas dukungan keuangan yang diberikan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu dalam implementasi sistem, pengujian perangkat, dan validasi hasil penelitian.

REFERENCES

- [1] D. Sukmawati, R. Rivaldi, and D. Mahmiludin, "Analisis Ketahanan Pangan Indonesia: Tantangan Dan Strategi Berkelanjutan Dalam Era Transformasi Sosial-Ekonomi," *J. Innov. Res. Agric.*, vol. 04, no. 1, pp. 23–29, 2025, doi: <https://doi.org/10.56916/jira.v4i1.1811>.
- [2] FAO Global Perspectives Studies (GPS), *The future of food and agriculture Alternative pathways to 2050*, 2nd ed. Rome: FAO, 2018.
- [3] A. Ortiz-Bobea, T. R. Ault, C. M. Carrillo, R. G. Chambers, and D. B. Lobell, "Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth," *Nat. Clim. Chang.*, vol. 11, no. 4, pp. 306–312, 2021, doi: [10.1038/s41558-021-01000-1](https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1).
- [4] A. M. Abdallah, H. S. Jat, M. Choudhary, E. F. Abdelaty, P. C. Sharma, and M. L. Jat, "Conservation Agriculture Effects on Soil Water Holding Capacity and Water-Saving Varied with Management Practices and Agroecological Conditions: A Review," *Agronomy*, vol. 11, no. 9, pp. 1–27, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy11091681>.
- [5] G. Saha, F. Shahrin, F. H. Khan, M. M. Meshkat, and A. A. M. Azad, "Smart IoT-driven precision agriculture : Land mapping , crop prediction , and irrigation system," *PLoS One*, vol. 20, no. 3, pp. 1–33, 2025, doi: [10.1371/journal.pone.0319268](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319268).
- [6] A. Cravero, S. Sepúlveda, F. Gutiérrez, and L. Muñoz, "From Precision Agriculture to Intelligent Agricultural Ecosystems : A Systematic Review of Machine Learning and Big Data Applications," *Agronomy*, vol. 16, no. 5, pp. 1–45, 2026, doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy16050516>.
- [7] R. K. Soothar, A. Singha, S. A. Soomro, A. Chachar, F. Kalhor, and M. A. Rahaman, "Effect of different soil moisture regimes on plant growth and water use efficiency of Sunflower : experimental study and modeling," *Bull. Natl. Res. Cent.*, 2021, doi: [10.1186/s42269-021-00580-4](https://doi.org/10.1186/s42269-021-00580-4).
- [8] S. O. Kennedy, "Soil pH and its impact on nutrient availability and crop growth," *Int. J. Geogr. Geol. Environ.*, vol. 4, no. 2, pp. 236–238, 2022.
- [9] J. Lloret, S. Sendra, L. Garcia, and J. M. Jimenez, "A Wireless Sensor Network Deployment for Soil Moisture Monitoring in Precision Agriculture," *Sensors*, vol. 21, no. 21, p. 7243, 2021.
- [10] H. Yin, Y. Cao, B. Marelli, X. Zeng, A. J. Mason, and C. Cao, "Soil Sensors and Plant Wearables for Smart and Precision Agriculture," *Adv. Mater.*, vol. 33, no. 20, p. e2007764, May 2021, doi: [10.1002/adma.202007764](https://doi.org/10.1002/adma.202007764).
- [11] F. Nuryadi, N. Wayan, P. Septiani, M. Lestari, and P. Tanah, "IMPLEMENTASI ESP32 UNTUK SISTEM PEMANTAUAN KESUBURAN TANAH BERBASIS IOT," in *Seminar Nasional Riset dan Inovasi Teknologi (SEMNAS RISTEK) 2025*, 2025, pp. 79–86.
- [12] A. A. Ruslan and S. M. Salleh, "IoT Soil Monitoring based on LoRa Module for Oil Palm Plantation," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 12, no. 5, pp. 215–220, 2021.
- [13] A. B. A. Mohlisin and S. F. S. Adnan, "Palm, Rubber Plantation and Paddy Field Soil Monitoring System Using LoRa," in *2022 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference (IEACon)*, 2022, pp. 223–228. doi: [10.1109/IEACon55029.2022.9951833](https://doi.org/10.1109/IEACon55029.2022.9951833).
- [14] A. A. Muti, P. Nurul, and S. E. S. Muaziyah, "Penerapan sistem pemantauan cerdas kelembapan dan derajat keasaman tanah untuk optimalisasi produksi padi berkelanjutan," *J. Pembelajaran Pemberdaya. Masy.*, vol. 6, no. 4, pp. 1411–1422, 2025, doi: [10.33474/jp2m.v6i4.24275](https://doi.org/10.33474/jp2m.v6i4.24275).
- [15] P. Placidi, R. Morbidelli, D. Fortunati, N. Papini, F. Gobbi, and A. Scorzoni, "Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario : An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors," *Sensors*, vol. 21, no. 15, p. 5110, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21155110>.
- [16] P. Kanupuru, U. Reddy, and N. Vijayendra, "Instrumentation Mesure Métrologie Multi Node Based Smart Monitoring System with Motor Dry Run Avoidance for Sustainable Agriculture," *Int. Inf. Eng. Technol. Association*, vol. 20, no. 1, pp. 39–47, 2021, doi: <https://doi.org/10.18280/i2m.200106> Received:
- [17] F. Maita and L. Maiolo, "Low power Wireless Sensor Network for precision agriculture: a battery-less operation scenario," in *2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, 2021, pp. 75–79. doi: [10.1109/MetroAgriFor52389.2021.9628772](https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor52389.2021.9628772).
- [18] S. Omar, "Internet of Things (IoT) for Smart Farming : A Systematic Review," *Int. J. Comput. Appl.*,

- vol. 174, no. 27, pp. 47–54, 2021.
- [19] J. Nandhini, A. S. Narmadha, and G. Kalaiarasi, “Intelligent Farming using Internet of Things and Cloud Computing,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 183, no. 8, pp. 22–26, 2021.
- [20] Y. Wu, Z. Yang, and Y. Liu, “Internet-of-Things-Based Multiple-Sensor Monitoring System for Soil Information Diagnosis Using a Smartphone,” *micromachines Artic.*, vol. 14, no. 7, p. 1395, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/mi14071395> Academic.