

PERANCANGAN SISTEM MONITORING KESEHATAN TANAH BERBASIS IOT UNTUK IDENTIFIKASI FAKTOR PENYEBAB RENDAHNYA PRODUKTIVITAS LAHAN PERTANIAN

Matsna Nurul Kholidah^{1*}, Refdi Prayoga Saputra^{2*}, Geosha Vigisca^{3*}

^{1,2,3}Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nahdlatul Ulama Lampung; Jl. Raya Pantai Timur Sumatera, Kec. Purbolinggo, Kab. Lampung Timur; 0725-2202024

Keywords:

Internet of Things (IoT), soil health, soil monitoring, land productivity, smart agriculture.

Correspondent Email:

matsna@unulampung.ac.id

Abstrak. Produktivitas lahan pertanian merupakan faktor penting dalam keberhasilan usaha tani, namun masih banyak lahan yang menunjukkan produktivitas rendah akibat keterbatasan informasi mengenai kondisi kesehatan tanah secara real-time. Identifikasi faktor penyebab rendahnya produktivitas masih bergantung pada pengamatan manual dan analisis laboratorium yang memerlukan biaya serta waktu relatif besar. Penelitian ini bertujuan merancang sistem monitoring kesehatan tanah berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk mengintegrasikan berbagai parameter tanah sebagai dasar identifikasi faktor pembatas produktivitas lahan. Metode penelitian menggunakan pendekatan Design Science Research (DSR) yang meliputi identifikasi masalah, analisis kebutuhan, perancangan arsitektur sistem, pemilihan sensor, perancangan komunikasi data, dan desain dashboard monitoring. Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan sensor kelembapan tanah, pH, suhu, *Electrical Conductivity* (EC), dan NPK. Data dikirim ke basis data cloud melalui protokol MQTT dan divisualisasikan pada dashboard berbasis web. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi pemantauan multi-parameter kesehatan tanah dalam satu platform IoT untuk mendukung identifikasi faktor pembatas produktivitas lahan. Hasil penelitian berupa rancangan arsitektur sistem, perangkat keras, perangkat lunak, komunikasi data, dan dashboard yang menjadi dasar implementasi sistem monitoring kesehatan tanah berbasis data..

Abstract. Agricultural land productivity is a crucial factor in determining the success of farming activities. However, many agricultural areas continue to exhibit low productivity due to the limited availability of real-time information on soil health conditions. Identifying the factors responsible for low land productivity still relies on manual observation and laboratory analysis, which are relatively costly and time-consuming. This study aims to design an Internet of Things (IoT)-based soil health monitoring system that integrates multiple soil parameters to identify the limiting factors affecting agricultural land productivity. The research adopts the Design Science Research (DSR) approach, which includes problem identification, requirements analysis, system architecture design, sensor selection, data communication design, and monitoring dashboard development. The proposed system utilizes an ESP32 microcontroller integrated with soil moisture, pH, temperature, Electrical Conductivity (EC), and NPK sensors. Sensor data are transmitted to a cloud database via the MQTT protocol and visualized through a web-based dashboard. The novelty of this study lies in the integration of multi-parameter soil health monitoring within a single IoT platform to support the identification of factors limiting land productivity.



Copyright © 2026 The Author(s),
Published by Jurnal Informatika dan
Teknik Elektro Terapan. This is an
open-access article distributed under
the terms of the Creative Commons
Attribution-NonCommercial 4.0
International License (CC BY-NC
4.0).

The research results in a comprehensive system design, including hardware architecture, software architecture, data communication, and dashboard design, which serves as the foundation for the future implementation of a data-driven soil health monitoring system..

1. PENDAHULUAN

Sektor pertanian memiliki peran strategis dalam menjaga ketahanan pangan, meningkatkan kesejahteraan masyarakat, serta mendukung pertumbuhan ekonomi nasional. Salah satu faktor yang menentukan keberhasilan produksi pertanian adalah tingkat produktivitas lahan yang dipengaruhi oleh kondisi fisik, kimia, dan biologi tanah. Kesehatan tanah (*soil health*) yang baik memungkinkan tanaman memperoleh air, unsur hara, dan lingkungan tumbuh yang optimal sehingga mampu menghasilkan produktivitas yang tinggi. Sebaliknya, penurunan kualitas tanah dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman tidak optimal meskipun telah dilakukan berbagai upaya budidaya, seperti pengolahan tanah, pemupukan, maupun pengairan [1], [2].

Permasalahan produktivitas lahan masih menjadi tantangan di berbagai daerah pertanian. Pada beberapa lahan ditemukan kondisi di mana tanaman budidaya, seperti padi, jagung, singkong, maupun sayuran, mengalami pertumbuhan yang kurang optimal, sedangkan gulma atau rumput liar tetap tumbuh dengan baik. Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa lahan masih mampu mendukung kehidupan vegetasi, namun terdapat faktor pembatas yang memengaruhi pertumbuhan tanaman budidaya. Faktor-faktor tersebut dapat berupa ketidakseimbangan pH tanah, kelembapan yang tidak sesuai, perubahan suhu tanah, tingginya nilai *Electrical Conductivity* (EC), rendahnya kandungan unsur hara, maupun kombinasi beberapa parameter yang saling memengaruhi [2], [3].

Identifikasi kondisi kesehatan tanah umumnya masih dilakukan melalui pengamatan visual dan pengujian laboratorium secara berkala. Pendekatan tersebut memiliki beberapa keterbatasan, antara lain membutuhkan biaya yang relatif tinggi, waktu analisis yang cukup lama, serta tidak mampu menggambarkan perubahan kondisi tanah secara kontinu. Akibatnya, petani sering kali mengalami keterlambatan dalam menentukan

tindakan perbaikan lahan, sehingga keputusan pengelolaan lahan lebih banyak didasarkan pada pengalaman daripada data aktual [1], [4].

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) membuka peluang baru dalam pengelolaan lahan pertanian melalui pemantauan kondisi lingkungan secara real-time. Integrasi sensor, mikrokontroler, komunikasi nirkabel, cloud computing, dan dashboard monitoring memungkinkan proses akuisisi, penyimpanan, serta visualisasi data dilakukan secara berkelanjutan. Informasi yang diperoleh dapat dimanfaatkan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan irigasi, pemupukan, maupun evaluasi kondisi lahan secara lebih cepat dan akurat [2], [5].

Berbagai penelitian telah mengembangkan sistem monitoring pertanian berbasis IoT. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada pemantauan satu atau dua parameter, seperti kelembapan tanah dan suhu, terutama untuk mendukung sistem irigasi otomatis [6], [7]. Penelitian lain telah mengembangkan sistem monitoring kelembapan tanah berbasis ESP32 yang mampu mengirimkan data secara real-time melalui platform IoT dengan waktu transmisi yang relatif singkat [8]. Meskipun demikian, pendekatan tersebut belum mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi kesehatan tanah karena belum mengintegrasikan parameter penting lainnya, seperti pH, *Electrical Conductivity* (EC), serta kandungan unsur hara (NPK), yang memiliki pengaruh langsung terhadap produktivitas lahan [3], [5].

Berdasarkan hasil telaah pustaka tersebut, masih terdapat research gap berupa belum tersedianya rancangan sistem monitoring yang mengintegrasikan berbagai parameter kesehatan tanah dalam satu platform IoT untuk mendukung identifikasi faktor pembatas produktivitas lahan. Sebagian besar penelitian lebih berorientasi pada otomatisasi irigasi atau pemantauan satu parameter tertentu, sedangkan analisis kesehatan tanah secara komprehensif sebagai dasar pengambilan keputusan pengelolaan lahan masih relatif terbatas [2], [3], [8].

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan merancang sistem monitoring kesehatan tanah berbasis IoT yang mampu mengintegrasikan sensor kelembapan tanah, pH, suhu tanah, *Electrical Conductivity* (EC), dan NPK menggunakan mikrokontroler ESP32. Data hasil pengukuran dikirimkan melalui protokol MQTT menuju basis data cloud dan ditampilkan pada dashboard berbasis web untuk memudahkan proses monitoring secara real-time. Kebaruan penelitian ini terletak pada rancangan sistem yang mengintegrasikan pemantauan multi-parameter kesehatan tanah dalam satu platform IoT sebagai dasar identifikasi faktor-faktor pembatas produktivitas lahan. Rancangan yang dihasilkan diharapkan menjadi landasan bagi implementasi sistem monitoring kesehatan tanah yang mendukung pengelolaan lahan pertanian berbasis data (*data-driven agriculture*) sehingga proses pengambilan keputusan dapat dilakukan secara lebih cepat, tepat, dan efisien.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Internet of Things (IoT) pada Smart Agriculture*

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma yang menghubungkan berbagai perangkat fisik melalui jaringan internet sehingga mampu melakukan proses akuisisi, pengiriman, penyimpanan, dan analisis data secara otomatis. Dalam bidang pertanian, IoT menjadi salah satu teknologi utama pada konsep *smart agriculture* karena memungkinkan proses monitoring kondisi lingkungan dilakukan secara real-time menggunakan berbagai sensor yang terintegrasi dengan sistem komputasi awan (*cloud computing*) [9], [10].

Penerapan IoT pada sektor pertanian telah berkembang pesat untuk mendukung pengelolaan irigasi, pemantauan kondisi lingkungan, pengendalian rumah kaca (*greenhouse*), hingga analisis produktivitas tanaman. Sistem IoT umumnya terdiri atas empat komponen utama, yaitu lapisan sensor (*perception layer*), lapisan komunikasi (*network layer*), lapisan pemrosesan data (*processing layer*), dan lapisan aplikasi (*application layer*). Integrasi keempat lapisan tersebut memungkinkan data sensor dikirim secara kontinu menuju *cloud server* dan

divisualisasikan melalui dashboard sehingga memudahkan pengguna dalam melakukan pengambilan keputusan [5], [9], [10].

Pada penelitian ini, arsitektur IoT dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat akuisisi data, protokol MQTT sebagai media komunikasi, cloud database sebagai penyimpanan data, serta dashboard berbasis web untuk visualisasi kondisi kesehatan tanah secara real-time. Pemilihan arsitektur tersebut mempertimbangkan kemudahan implementasi, biaya yang relatif rendah, serta kemampuan integrasi dengan berbagai jenis sensor.

2.2. *Kesehatan Tanah (Soil Health)*

Kesehatan tanah (*soil health*) merupakan kemampuan tanah dalam menjalankan fungsi biologis, kimia, dan fisik secara berkelanjutan untuk mendukung pertumbuhan tanaman, menjaga kualitas lingkungan, serta mempertahankan produktivitas lahan. Penurunan kualitas tanah dapat disebabkan oleh degradasi fisik, ketidakseimbangan unsur hara, perubahan pH, maupun rendahnya kandungan bahan organik yang pada akhirnya berdampak pada penurunan hasil pertanian [2], [11].

Beberapa parameter yang umum digunakan sebagai indikator kesehatan tanah meliputi kelembapan tanah, suhu tanah, derajat keasaman (pH), *Electrical Conductivity* (EC), serta kandungan unsur hara nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Kelembapan tanah berpengaruh terhadap kemampuan akar dalam menyerap air, sedangkan suhu tanah memengaruhi aktivitas mikroorganisme dan proses dekomposisi bahan organik. Nilai pH menentukan tingkat ketersediaan unsur hara bagi tanaman, sementara EC menggambarkan konsentrasi ion terlarut yang berkaitan dengan tingkat kesuburan maupun salinitas tanah. Di sisi lain, unsur NPK merupakan nutrisi esensial yang berperan dalam pertumbuhan vegetatif, perkembangan akar, serta pembentukan bunga dan buah [11], [12].

Pemantauan parameter-parameter tersebut secara simultan memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai kondisi lahan dibandingkan pemantauan satu parameter saja. Oleh karena itu, pendekatan multi-parameter menjadi salah satu konsep penting dalam pengembangan sistem monitoring kesehatan tanah berbasis IoT.

2.3. Sensor Monitoring Kesehatan Tanah

Keberhasilan sistem monitoring kesehatan tanah sangat dipengaruhi oleh pemilihan sensor yang memiliki akurasi, stabilitas, serta kompatibilitas dengan sistem IoT. Sensor kelembapan tanah tipe kapasitif banyak digunakan karena memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap korosi dibandingkan sensor resistif serta mampu menghasilkan pembacaan yang lebih stabil dalam penggunaan jangka panjang [8].

Pengukuran tingkat keasaman tanah dilakukan menggunakan sensor pH yang bekerja berdasarkan perubahan potensial listrik akibat konsentrasi ion hidrogen di dalam tanah. Sensor ini penting karena sebagian besar tanaman memiliki kisaran pH optimum antara 5,5–7,0. Untuk mengetahui kondisi suhu tanah digunakan sensor digital DS18B20 yang memiliki akurasi tinggi, tahan terhadap lingkungan lembap, serta mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32. Sementara itu, sensor *Electrical Conductivity* (EC) digunakan untuk mengukur kemampuan tanah menghantarkan arus listrik sebagai indikator konsentrasi ion terlarut dan tingkat salinitas [3], [11].

Selain parameter fisik dan kimia tersebut, penelitian ini juga mengintegrasikan sensor NPK berbasis komunikasi RS485 untuk memperoleh informasi kandungan nitrogen, fosfor, dan kalium secara langsung di lapangan. Integrasi berbagai sensor tersebut diharapkan mampu menghasilkan data kesehatan tanah yang lebih representatif sebagai dasar identifikasi faktor pembatas produktivitas lahan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Design Science Research* (DSR) yang berfokus pada perancangan artefak berupa sistem monitoring kesehatan tanah berbasis *Internet of Things* (IoT). Metode DSR dipilih karena sesuai untuk penelitian yang bertujuan menghasilkan rancangan sistem sebagai solusi terhadap suatu permasalahan nyata melalui tahapan identifikasi masalah, analisis kebutuhan, perancangan, dan evaluasi desain [13]. Pada penelitian ini, evaluasi difokuskan pada validasi rancangan sistem melalui analisis

kesesuaian arsitektur terhadap kebutuhan fungsional sehingga implementasi perangkat keras dan pengujian lapangan menjadi bagian dari penelitian lanjutan.

Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1 dan terdiri atas enam tahap, yaitu identifikasi permasalahan, analisis kebutuhan sistem, perancangan arsitektur IoT, pemilihan perangkat keras, perancangan perangkat lunak dan dashboard, serta penyusunan skenario implementasi.

3.1. Identifikasi Permasalahan

Tahap awal dilakukan melalui studi literatur dan observasi terhadap kondisi lahan pertanian yang memiliki produktivitas rendah. Permasalahan utama yang diidentifikasi adalah belum tersedianya sistem yang mampu memantau parameter kesehatan tanah secara *real-time* sebagai dasar identifikasi faktor pembatas produktivitas lahan. Selain itu, proses pemantauan masih mengandalkan pengamatan manual dan analisis laboratorium yang memerlukan biaya serta waktu relatif tinggi.

3.2. Analisis Kebutuhan Sistem

Tahap ini bertujuan untuk menentukan kebutuhan fungsional dan nonfungsional sistem berdasarkan karakteristik permasalahan yang telah diidentifikasi. Kebutuhan fungsional meliputi kemampuan sistem dalam membaca data dari sensor kelembapan tanah, pH, suhu tanah, *Electrical Conductivity* (EC), dan NPK, mengirimkan data ke *cloud server* menggunakan protokol MQTT, menyimpan data ke basis data, serta menampilkan informasi kondisi tanah melalui dashboard berbasis web. Adapun kebutuhan nonfungsional meliputi kemampuan sistem untuk melakukan monitoring secara real-time, memiliki konsumsi daya yang rendah, mudah dikembangkan, dan mampu beroperasi pada lingkungan pertanian.

3.3. Perancangan Arsitektur Sistem IoT

Berdasarkan hasil analisis kebutuhan, dilakukan perancangan arsitektur sistem yang terdiri atas empat lapisan, yaitu *perception layer*, *network layer*, *processing layer*, dan *application layer*. Pada *perception layer*, berbagai sensor digunakan untuk memperoleh

data kondisi tanah. Selanjutnya, data diproses oleh mikrokontroler ESP32 dan dikirim melalui jaringan Wi-Fi menggunakan protokol MQTT menuju *cloud database*. Data yang tersimpan kemudian divisualisasikan melalui dashboard berbasis web sehingga pengguna dapat memantau kondisi kesehatan tanah secara real-time.

3.4. Pemilihan Perangkat Keras

Pemilihan perangkat keras dilakukan berdasarkan kebutuhan sistem dan karakteristik lingkungan pertanian. Mikrokontroler ESP32 dipilih karena memiliki modul Wi-Fi terintegrasi, konsumsi daya yang rendah, serta mendukung komunikasi MQTT. Sensor yang digunakan meliputi sensor kelembapan tanah tipe kapasitif, sensor pH tanah, sensor suhu DS18B20, sensor *Electrical Conductivity* (EC), dan sensor NPK berbasis RS485. Kombinasi sensor tersebut dipilih untuk memperoleh informasi kesehatan tanah secara lebih komprehensif dibandingkan sistem yang hanya memantau satu parameter.

3.5. Perancangan Perangkat Lunak dan Dashboard

Perangkat lunak dirancang untuk mengelola proses akuisisi data, komunikasi dengan cloud server, penyimpanan data, dan visualisasi informasi. Dashboard monitoring dirancang menggunakan antarmuka berbasis web yang menampilkan nilai setiap parameter, grafik historis pengukuran, status kesehatan tanah, serta informasi waktu pengambilan data. Dashboard juga dirancang agar mudah digunakan oleh petani maupun penyuluh pertanian dalam melakukan pemantauan kondisi lahan.

3.6. Penyusunan Skenario Implementasi

Tahap akhir penelitian adalah penyusunan skenario implementasi sebagai acuan penelitian lanjutan. Skenario implementasi meliputi proses pemasangan sensor pada lahan pertanian, konfigurasi jaringan komunikasi, kalibrasi sensor, pengambilan data secara periodik, penyimpanan data pada cloud database, serta visualisasi hasil pengukuran melalui dashboard. Skenario ini disusun untuk memastikan bahwa rancangan sistem dapat diimplementasikan secara sistematis pada

tahap pengembangan berikutnya. Alur tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan penelitian menggunakan metode Design Science Research (DSR).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Kebutuhan Sistem

Tahap awal dalam perancangan sistem monitoring kesehatan tanah berbasis *Internet of Things* (IoT) adalah melakukan analisis kebutuhan sistem. Analisis ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem yang dirancang mampu memenuhi kebutuhan pengguna dalam memantau kondisi kesehatan tanah secara *real-time* sekaligus menyediakan informasi yang dapat digunakan sebagai dasar identifikasi faktor pembatas produktivitas lahan.

Berdasarkan hasil identifikasi permasalahan, sistem harus mampu mengakuisisi beberapa parameter kesehatan tanah yang memiliki pengaruh terhadap pertumbuhan tanaman, yaitu kelembapan tanah, pH tanah, suhu tanah, *Electrical Conductivity* (EC), serta kandungan unsur hara nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Seluruh data hasil pengukuran selanjutnya dikirimkan menuju *cloud server* sehingga dapat diakses secara daring melalui dashboard monitoring.

Analisis kebutuhan menghasilkan dua kelompok kebutuhan sistem, yaitu kebutuhan fungsional dan kebutuhan nonfungsional.

4.1.1. Kebutuhan Fungsional

Kebutuhan fungsional mendeskripsikan fungsi utama yang harus dimiliki oleh sistem monitoring. Fungsi-fungsi tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kebutuhan Fungsional Sistem

No	Kebutuhan Fungsional	Deskripsi
1	Akuisisi data sensor	Membaca data kelembapan, pH, suhu, EC, dan NPK secara periodik.
2	Pengolahan data	Mengubah data sensor menjadi format digital yang siap dikirim.
3	Komunikasi data	Mengirim data menuju <i>cloud database</i> menggunakan protokol MQTT melalui jaringan Wi-Fi.
4	Penyimpanan data	Menyimpan seluruh hasil pengukuran ke dalam basis data.
5	Visualisasi data	Menampilkan nilai sensor dan grafik historis melalui dashboard berbasis web.
6	Monitoring real-time	Menampilkan perubahan kondisi tanah secara langsung.
7	Riwayat pengukuran	Menyimpan histori data sebagai bahan analisis kondisi lahan.

Berdasarkan Tabel 1, sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat pembaca sensor, tetapi juga mampu mengintegrasikan proses akuisisi data, komunikasi, penyimpanan, dan visualisasi informasi dalam satu platform monitoring.

4.1.2. Kebutuhan Nonfungsional

Selain kebutuhan fungsional, sistem juga harus memenuhi beberapa kebutuhan nonfungsional agar mampu beroperasi secara

optimal pada lingkungan pertanian. Kebutuhan tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kebutuhan Nonfungsional Sistem

Aspek	Kebutuhan
Kinerja	Monitoring dilakukan secara <i>real-time</i> .
Keandalan	Sistem mampu bekerja secara kontinu dalam lingkungan pertanian.
Efisiensi	Konsumsi daya rendah sehingga sesuai untuk implementasi lapangan.
Kompatibilitas	Mendukung berbagai sensor kesehatan tanah.
Skalabilitas	Mudah dikembangkan dengan penambahan sensor atau modul komunikasi lainnya.
Kemudahan penggunaan	Dashboard mudah dipahami oleh petani dan penyuluh pertanian.

Kebutuhan nonfungsional tersebut menjadi dasar dalam menentukan arsitektur sistem, pemilihan perangkat keras, serta teknologi komunikasi yang digunakan. ESP32 dipilih karena memiliki prosesor *dual-core*, modul Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n terintegrasi, konsumsi daya yang relatif rendah, serta mendukung berbagai antarmuka komunikasi sehingga banyak digunakan pada aplikasi *Internet of Things* [14],[15]. Selain itu, pendekatan berbasis *cloud* memungkinkan data tersimpan secara terpusat sehingga dapat diakses kapan saja melalui dashboard monitoring.

Hasil analisis kebutuhan menunjukkan bahwa sistem yang dirancang harus mampu menyediakan informasi kesehatan tanah secara komprehensif melalui integrasi beberapa parameter utama dalam satu platform IoT. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan informasi yang lebih representatif dibandingkan sistem monitoring yang hanya mengukur satu atau dua parameter tanah sehingga mendukung proses identifikasi faktor pembatas produktivitas lahan secara lebih akurat.

4.2. Perancangan Arsitektur Sistem IoT

Arsitektur sistem dirancang untuk mengintegrasikan proses akuisisi data, komunikasi, penyimpanan, dan visualisasi informasi kondisi kesehatan tanah dalam satu platform *Internet of Things* (IoT). Rancangan ini mengadopsi arsitektur empat lapis (*four-layer architecture*), yang terdiri atas *perception layer*, *network layer*, *processing layer*, dan *application layer*. Pendekatan tersebut dipilih karena mampu memisahkan fungsi setiap komponen sehingga sistem lebih mudah dikembangkan, dipelihara, dan diintegrasikan dengan perangkat lain pada masa mendatang.

Pada *perception layer*, sistem terdiri atas beberapa sensor yang berfungsi mengukur parameter kesehatan tanah, yaitu sensor kelembapan tanah (*Capacitive Soil Moisture Sensor*), sensor pH tanah, sensor suhu tanah DS18B20, sensor *Electrical Conductivity* (EC), serta sensor NPK berbasis RS485. Kombinasi sensor tersebut dipilih agar sistem mampu memperoleh informasi kondisi fisik dan kimia tanah secara lebih komprehensif dibandingkan sistem monitoring yang hanya menggunakan satu jenis sensor.

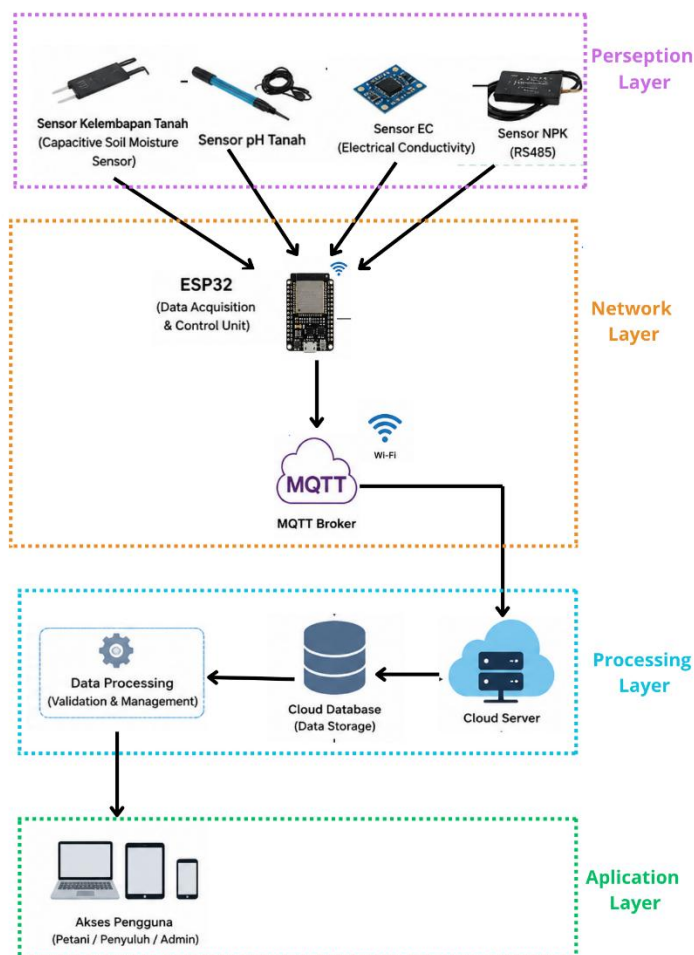
Data hasil pengukuran dari seluruh sensor selanjutnya diterima oleh mikrokontroler ESP32 yang berperan sebagai pusat pengendali sistem. ESP32 melakukan proses pembacaan data sensor, konversi data analog menjadi data digital, validasi nilai hasil pengukuran, serta pengemasan data (*data packaging*) sebelum dikirim menuju *cloud server*. Selain memiliki kemampuan pemrosesan yang memadai, ESP32 dipilih karena telah dilengkapi modul Wi-Fi terintegrasi sehingga mampu mendukung komunikasi data secara nirkabel tanpa memerlukan perangkat tambahan.

Pada *network layer*, komunikasi data dilakukan melalui jaringan Wi-Fi menggunakan protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). MQTT digunakan sebagai media komunikasi karena memiliki mekanisme *publish-subscribe*, kebutuhan bandwidth yang rendah, dan cocok diterapkan pada perangkat IoT dengan sumber daya terbatas [5], [17]. Setiap data hasil pengukuran dikirim oleh ESP32 sebagai *publisher* menuju MQTT Broker, kemudian diteruskan kepada aplikasi yang berperan sebagai *subscriber*. Pendekatan ini

memungkinkan proses pengiriman data berlangsung secara efisien dengan latensi yang rendah.

Selanjutnya, pada *processing layer*, data yang diterima dari MQTT Broker disimpan ke dalam basis data *cloud*. Lapisan ini bertanggung jawab terhadap proses penyimpanan data historis, pengelolaan basis data, serta penyediaan layanan antarmuka (*Application Programming Interface* atau API) yang digunakan oleh aplikasi monitoring. Penyimpanan data secara terpusat memungkinkan pengguna mengakses riwayat kondisi kesehatan tanah untuk berbagai periode pengamatan sehingga dapat digunakan sebagai dasar analisis perubahan kondisi lahan.

Lapisan terakhir adalah *application layer*, yaitu dashboard monitoring berbasis web yang berfungsi menampilkan seluruh informasi hasil pengukuran sensor secara *real-time*. Dashboard dirancang untuk menyajikan nilai setiap parameter kesehatan tanah, grafik historis pengukuran, status kondisi tanah, serta informasi waktu pengambilan data. Melalui antarmuka tersebut, pengguna dapat memantau kondisi lahan dari berbagai lokasi selama perangkat terhubung dengan jaringan internet. Arsitektur sistem ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Arsitektur Sistem Monitoring Kesehatan Tanah Berbasis IoT

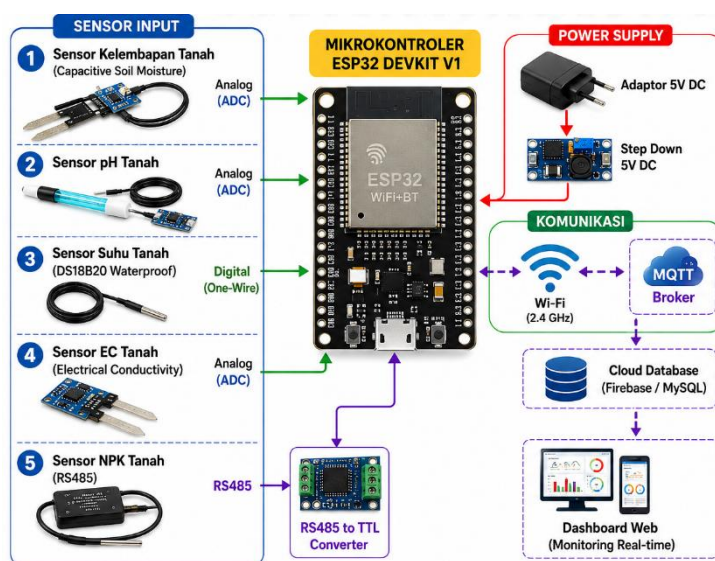
Berdasarkan Gambar 2, aliran data dimulai dari proses akuisisi data oleh sensor, kemudian diproses oleh ESP32 sebelum dikirim menuju MQTT Broker melalui jaringan Wi-Fi. Selanjutnya data disimpan pada *cloud database* dan ditampilkan melalui dashboard berbasis web. Dengan arsitektur tersebut, seluruh parameter kesehatan tanah dapat dipantau secara terintegrasi sehingga mendukung proses identifikasi faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas lahan secara lebih efektif.

Keunggulan utama dari arsitektur yang diusulkan adalah kemampuan integrasi berbagai sensor kesehatan tanah dalam satu platform IoT, penggunaan protokol komunikasi MQTT yang ringan untuk mendukung pengiriman data secara *real-time*, serta pemanfaatan *cloud database* yang memungkinkan penyimpanan data historis dalam jangka panjang. Selain itu, desain modular pada setiap lapisan memudahkan pengembangan sistem, misalnya dengan menambahkan sensor cuaca, sensor intensitas cahaya, maupun algoritma kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) untuk analisis prediktif pada penelitian selanjutnya.

4.3. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras bertujuan untuk menghasilkan sistem monitoring kesehatan tanah yang mampu melakukan akuisisi data berbagai parameter secara *real-time*. Sistem dirancang menggunakan pendekatan modular sehingga setiap komponen memiliki fungsi yang spesifik serta mudah dikembangkan pada tahap implementasi berikutnya. Rancangan perangkat keras terdiri atas lima sensor utama sebagai perangkat masukan (input), satu mikrokontroler sebagai pusat pengendali, serta modul komunikasi nirkabel yang terintegrasi pada ESP32.

Secara umum, konfigurasi perangkat keras yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 3. Pada rancangan tersebut, seluruh sensor dihubungkan ke mikrokontroler ESP32 sebagai pusat akuisisi data. Data hasil pembacaan sensor diproses terlebih dahulu sebelum dikirim melalui jaringan Wi-Fi menuju MQTT Broker dan *cloud database*. Selanjutnya data dapat diakses oleh pengguna melalui dashboard berbasis web.



Gambar 3. Diagram Blok Perangkat Keras Sistem

Pemilihan setiap komponen dilakukan berdasarkan kebutuhan sistem, tingkat akurasi pengukuran, kemudahan integrasi, konsumsi daya, serta biaya implementasi. Spesifikasi perangkat keras yang digunakan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi Perangkat Keras yang Diusulkan

No	Komponen	Fungsi	Alasan Pemilihan
1	ESP32 DevKit V1	Mikrokontroler utama	Memiliki prosesor dual-core, Wi-Fi terintegrasi, konsumsi daya rendah, serta mendukung komunikasi MQTT.
2	Capacitive Soil Moisture Sensor	Mengukur kelembapan tanah	Lebih baik terhadap korosi dibandingkan sensor resistif

No	Komponen	Fungsi	Alasan Pemilihan
			serta menghasilkan pembacaan yang lebih stabil untuk penggunaan jangka panjang
3	Soil pH Sensor	Mengukur tingkat keasaman tanah	Memberikan informasi mengenai kondisi kimia tanah yang memengaruhi ketersediaan unsur hara.
4	DS18B20 Waterproof	Mengukur suhu tanah	Memiliki akurasi tinggi, tahan air, serta mudah diintegrasikan menggunakan komunikasi One-Wire.
5	Soil EC Sensor	Mengukur <i>Electrical Conductivity</i>	Digunakan untuk mengetahui konsentrasi ion terlarut dan tingkat salinitas tanah.
6	NPK Soil Sensor (RS485)	Mengukur kandungan Nitrogen, Fosfor, dan Kalium	Mampu mengukur tiga unsur hara utama secara langsung dengan komunikasi digital RS485.
7	Catu Daya 5 VDC	Sumber tegangan sistem	Menyuplai kebutuhan daya seluruh perangkat keras secara stabil.

4.3.1. Mikrokontroler ESP32

ESP32 berfungsi sebagai pusat pengendali (*main controller*) yang mengoordinasikan seluruh proses akuisisi data sensor, pemrosesan data, dan komunikasi dengan server. Mikrokontroler ini dipilih karena telah dilengkapi modul Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n, memiliki prosesor dual-core hingga 240 MHz, memori yang cukup besar, serta mendukung berbagai antarmuka komunikasi seperti UART, I²C, SPI, ADC, dan GPIO. Dengan spesifikasi tersebut, ESP32 mampu membaca beberapa sensor secara bersamaan tanpa memerlukan perangkat komunikasi tambahan.

4.3.2. Sensor Kelembapan Tanah

Sensor kelembapan tanah yang digunakan adalah *Capacitive Soil Moisture Sensor*. Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan kapasitansi akibat perubahan kadar air di dalam tanah. Dibandingkan sensor resistif, sensor kapasitif memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap korosi karena tidak terjadi kontak langsung antara elektroda dan media tanah. Data kelembapan digunakan sebagai indikator ketersediaan air yang berpengaruh terhadap proses penyerapan unsur hara oleh tanaman.

4.3.3. Sensor pH Tanah

Sensor pH digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan tanah pada rentang pH 0–14. Informasi pH sangat penting karena memengaruhi kelarutan unsur hara dan aktivitas mikroorganisme di dalam tanah. Nilai pH yang terlalu rendah maupun terlalu tinggi dapat menghambat pertumbuhan tanaman meskipun kandungan unsur hara tersedia dalam jumlah yang cukup.

4.3.4. Sensor Suhu Tanah

Pengukuran suhu tanah dilakukan menggunakan sensor digital *DS18B20 Waterproof*. Sensor ini memiliki akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pada rentang pengukuran -10°C hingga 85°C serta menggunakan komunikasi One-Wire sehingga hanya memerlukan satu jalur data. Parameter suhu digunakan untuk memantau kondisi lingkungan perakaran yang berpengaruh terhadap aktivitas biologis tanah dan laju pertumbuhan tanaman.

4.3.5. Sensor Electrical Conductivity (EC)

Sensor EC berfungsi mengukur kemampuan tanah menghantarkan arus listrik yang dipengaruhi oleh konsentrasi ion terlarut. Nilai EC dapat digunakan sebagai indikator tingkat kesuburan maupun salinitas tanah. Apabila nilai EC terlalu tinggi, tanaman berpotensi mengalami kesulitan dalam menyerap air akibat meningkatnya tekanan osmotik.

4.3.6. Sensor NPK

Sensor NPK berbasis RS485 digunakan untuk memperoleh informasi kandungan Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K) yang merupakan unsur hara makro utama bagi pertumbuhan tanaman [11], [18]. Ketiga unsur tersebut merupakan makronutrien utama yang

berperan dalam pertumbuhan vegetatif, perkembangan akar, pembentukan bunga, serta produksi buah. Integrasi sensor NPK dengan parameter lainnya memungkinkan sistem memperoleh gambaran kondisi kesehatan tanah secara lebih komprehensif.

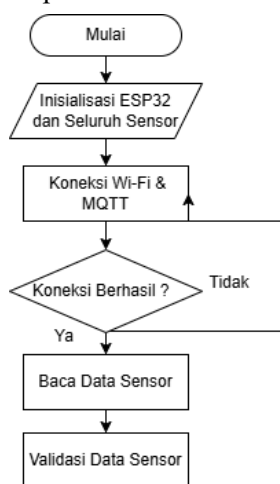
Berdasarkan rancangan yang diusulkan, seluruh komponen perangkat keras saling terintegrasi melalui ESP32 sehingga membentuk sistem monitoring kesehatan tanah yang modular dan mudah dikembangkan. Pendekatan ini memungkinkan penambahan sensor lain, seperti sensor curah hujan, intensitas cahaya, atau kualitas udara, tanpa mengubah arsitektur utama sistem.

4.4. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak dirancang untuk mengendalikan seluruh proses akuisisi data sensor, pemrosesan data, komunikasi dengan *cloud server*, penyimpanan data, serta penyajian informasi melalui dashboard monitoring. Perangkat lunak pada penelitian ini dibangun menggunakan bahasa pemrograman C++ pada lingkungan pengembangan Arduino IDE yang berjalan pada mikrokontroler ESP32. Pemilihan Arduino IDE didasarkan pada kemudahan pengembangan, dukungan pustaka (*library*) yang lengkap, serta kompatibilitas dengan berbagai modul sensor dan protokol komunikasi IoT [14], [15].

Secara umum, perangkat lunak terdiri atas beberapa modul utama, yaitu modul inisialisasi sistem, modul pembacaan sensor, modul validasi data, modul komunikasi MQTT, modul penyimpanan data, dan modul visualisasi informasi. Pembagian fungsi ke dalam beberapa modul bertujuan agar perangkat lunak lebih mudah dikembangkan, dipelihara, serta mendukung penambahan fitur pada tahap implementasi berikutnya.

Alur kerja perangkat lunak yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Flowchart Perangkat Lunak

Berdasarkan Gambar 4, proses perangkat lunak diawali dengan inisialisasi mikrokontroler ESP32 beserta seluruh sensor yang digunakan. Pada tahap ini dilakukan konfigurasi pin masukan (*input*), parameter komunikasi serial, serta inisialisasi pustaka (*library*) yang diperlukan untuk masing-masing sensor. Setelah proses inisialisasi selesai, ESP32 melakukan koneksi ke jaringan Wi-Fi dan MQTT Broker sebagai media komunikasi data. Penggunaan protokol MQTT dipilih karena memiliki mekanisme *publish-subscribe* yang ringan dan efisien untuk aplikasi IoT dengan keterbatasan sumber daya [5].

Apabila koneksi berhasil dilakukan, perangkat lunak mulai membaca data dari sensor kelembapan tanah, sensor pH, sensor suhu DS18B20, sensor EC, dan sensor NPK secara periodik. Data hasil pembacaan kemudian divalidasi untuk memastikan setiap parameter berada pada rentang pengukuran yang logis sehingga dapat meminimalkan kesalahan akibat gangguan komunikasi maupun kegagalan pembacaan sensor. [16].

Setelah proses validasi selesai, seluruh data dikemas dalam format JavaScript Object Notation (JSON). Penggunaan format JSON dipilih karena memiliki struktur yang sederhana, mudah diproses oleh berbagai platform, serta mendukung pertukaran data secara efisien antara perangkat IoT dan layanan *cloud* [17]. Contoh struktur data yang dikirimkan ditunjukkan pada Tabel 4.

Parameter	Tipe Data	Keterangan
timestamp	DateTime	Waktu pengukuran

moisture	Float	Kelembapan tanah (%)
temperature	Float	Suhu tanah (°C)
pH	Float	Derajat keasaman tanah
EC	Float	Electrical Conductivity (dS/m)
nitrogen	Float	Kandungan Nitrogen (mg/kg)
phosphorus	Float	Kandungan Fosfor (mg/kg)
potassium	Float	Kandungan Kalium (mg/kg)

Selanjutnya data dipublikasikan (*publish*) menuju MQTT Broker melalui jaringan Wi-Fi. MQTT Broker bertugas menerima setiap paket data dari ESP32 dan meneruskannya ke layanan *cloud database* untuk disimpan sebagai data historis. Penyimpanan data secara terpusat memungkinkan pengguna melakukan analisis perubahan kondisi kesehatan tanah berdasarkan waktu pengamatan, sehingga informasi yang diperoleh tidak hanya bersifat sesaat tetapi juga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi kondisi lahan dalam jangka panjang.

Tahap terakhir dari perangkat lunak adalah proses pembaruan (*update*) dashboard monitoring. Dashboard secara otomatis mengambil data terbaru dari *cloud database* melalui *Application Programming Interface* (API) dan menampilkan nilai masing-masing parameter, grafik tren pengukuran, status kesehatan tanah, serta waktu pembaruan terakhir. Setelah seluruh proses selesai, sistem melakukan *delay sampling* sesuai interval yang telah ditentukan, kemudian mengulangi proses pembacaan sensor secara terus-menerus sehingga monitoring dapat berlangsung secara *real-time*.

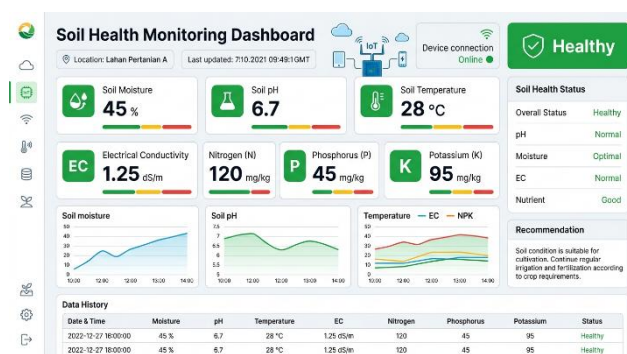
Berdasarkan rancangan tersebut, perangkat lunak mampu mengintegrasikan seluruh proses akuisisi data, komunikasi, penyimpanan, dan visualisasi informasi dalam satu alur kerja yang sistematis. Desain modular yang diterapkan juga memberikan fleksibilitas untuk pengembangan lebih lanjut, seperti penambahan algoritma identifikasi kondisi tanah, sistem notifikasi dini (*early warning system*), maupun integrasi dengan metode kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*)

untuk mendukung pengambilan keputusan pada pengelolaan lahan pertanian.

4.5. Perancangan Dashboard

Dashboard monitoring dirancang sebagai antarmuka utama (*user interface*) yang berfungsi menyajikan informasi kondisi kesehatan tanah secara real-time berdasarkan data yang dikirimkan oleh perangkat IoT. Dashboard dikembangkan berbasis web sehingga dapat diakses melalui komputer maupun perangkat bergerak (*mobile device*) selama terhubung dengan jaringan internet. Pendekatan ini memberikan fleksibilitas bagi pengguna untuk memantau kondisi lahan tanpa harus berada di lokasi pertanian. Selain itu, visualisasi data secara grafis dapat membantu pengguna memahami perubahan kondisi tanah dengan lebih cepat dibandingkan penyajian data dalam bentuk numerik [18], [19].

Perancangan dashboard mengutamakan aspek kemudahan penggunaan (*usability*) dan keterbacaan informasi (*readability*). Oleh karena itu, informasi yang ditampilkan dikelompokkan berdasarkan fungsi monitoring sehingga pengguna dapat dengan mudah mengidentifikasi kondisi kesehatan tanah, parameter yang mengalami perubahan, serta riwayat pengukuran pada periode tertentu. Rancangan dashboard yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Rancangan Dashboard Monitoring Kesehatan Tanah

Dashboard terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu panel ringkasan kondisi tanah, indikator parameter sensor, grafik historis pengukuran, status kesehatan tanah, dan tabel riwayat data. Pembagian komponen tersebut bertujuan agar informasi dapat disajikan secara

sistematis sehingga memudahkan proses interpretasi data oleh pengguna.

4.5.1. Panel Ringkasan Kondisi Tanah

Panel ringkasan (*summary panel*) ditempatkan pada bagian atas dashboard dan berfungsi menampilkan informasi umum mengenai kondisi lahan yang sedang dipantau. Informasi yang ditampilkan meliputi nama lokasi, waktu pembaruan terakhir (*last update*), status koneksi perangkat, serta status kesehatan tanah secara keseluruhan. Penyajian informasi ringkas pada bagian awal memudahkan pengguna memperoleh gambaran umum mengenai kondisi lahan tanpa harus membaca seluruh parameter satu per satu.

4.5.2. Indikator Parameter Sensor

Bagian ini menampilkan nilai setiap parameter kesehatan tanah dalam bentuk kartu informasi (*information card*) yang diperbarui secara otomatis setiap kali data baru diterima dari perangkat IoT. Parameter yang ditampilkan meliputi:

- Kelembapan tanah (%)
- pH tanah
- Suhu tanah (°C)
- *Electrical Conductivity* (dS/m)
- Kandungan Nitrogen (N)
- Kandungan Fosfor (P)
- Kandungan Kalium (K)

Setiap kartu informasi dilengkapi indikator warna (*color indicator*) untuk mempermudah interpretasi kondisi parameter. Sebagai contoh, warna hijau menunjukkan kondisi berada pada rentang optimal, kuning menunjukkan kondisi yang perlu diperhatikan, sedangkan merah menunjukkan kondisi di luar batas yang direkomendasikan. Pendekatan visual tersebut memungkinkan pengguna mengidentifikasi kondisi kritis secara cepat tanpa harus melakukan analisis numerik secara manual [18].

4.5.3. Grafik Historis Pengukuran

Selain menampilkan nilai pengukuran terkini, dashboard juga menyajikan grafik historis untuk setiap parameter. Grafik digunakan untuk memperlihatkan perubahan kondisi tanah berdasarkan waktu sehingga pengguna dapat mengamati tren peningkatan

maupun penurunan nilai pengukuran. Informasi historis ini penting dalam proses evaluasi kesehatan tanah karena perubahan parameter tertentu sering kali terjadi secara bertahap dan tidak dapat diamati hanya dari satu kali pengukuran.

Grafik historis juga mendukung proses analisis efektivitas tindakan budidaya, misalnya setelah pemberian pupuk, pengapuran, atau pengairan. Dengan membandingkan data sebelum dan sesudah perlakuan, pengguna dapat mengevaluasi pengaruh tindakan tersebut terhadap kondisi kesehatan tanah.

4.5.4. Status Kesehatan Tanah

Sebagai bentuk dukungan terhadap proses identifikasi kondisi lahan, dashboard dirancang untuk menampilkan status kesehatan tanah berdasarkan kombinasi parameter yang diperoleh dari sensor. Status tersebut disajikan dalam bentuk informasi sederhana sehingga mudah dipahami oleh pengguna.

Sebagai contoh, apabila hasil pengukuran menunjukkan nilai pH berada di bawah kisaran optimum, kandungan nitrogen rendah, dan kelembapan tanah berada di bawah batas minimum, maka dashboard dapat menampilkan informasi sebagai berikut:

Parameter	Kondisi
pH Tanah	Rendah (Masam)
Nitrogen	Rendah
Kelembapan	Rendah
Status Lahan	Perlu Perbaikan

Penyajian informasi dalam bentuk status memungkinkan pengguna memperoleh gambaran kondisi lahan secara cepat tanpa harus menafsirkan setiap parameter secara terpisah.

4.5.5. Riwayat Data Pengukuran

Dashboard juga menyediakan tabel riwayat pengukuran (*historical data*) yang berisi seluruh data sensor berdasarkan waktu pengambilan. Informasi yang ditampilkan meliputi tanggal dan waktu pengukuran, nilai setiap parameter kesehatan tanah, serta status hasil identifikasi. Penyimpanan data historis memungkinkan pengguna melakukan analisis jangka panjang terhadap perubahan kondisi

tanah serta mendukung penyusunan rekomendasi pengelolaan lahan berdasarkan data yang terdokumentasi.

Secara keseluruhan, rancangan dashboard monitoring tidak hanya berfungsi sebagai media visualisasi data, tetapi juga sebagai sarana pendukung pengambilan keputusan (*decision support*) dalam pengelolaan lahan pertanian. Integrasi informasi numerik, grafik historis, indikator visual, dan status kesehatan tanah diharapkan mampu membantu petani maupun penyuluh pertanian dalam mengidentifikasi faktor-faktor yang berpotensi menyebabkan rendahnya produktivitas lahan secara lebih cepat, objektif, dan berbasis data.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini telah menghasilkan rancangan sistem monitoring kesehatan tanah berbasis *Internet of Things* (IoT) sebagai solusi untuk mendukung identifikasi faktor-faktor yang memengaruhi rendahnya produktivitas lahan pertanian. Rancangan sistem dikembangkan menggunakan pendekatan *Design Science Research* (DSR) yang meliputi identifikasi permasalahan, analisis kebutuhan, perancangan arsitektur sistem, pemilihan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, serta perancangan dashboard monitoring. Sistem yang diusulkan mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 dengan sensor kelembapan tanah, pH, suhu tanah, *Electrical Conductivity* (EC), dan NPK untuk memperoleh informasi kondisi kesehatan tanah secara lebih komprehensif. Data hasil pengukuran dirancang untuk dikirim melalui protokol MQTT menuju cloud database dan divisualisasikan melalui dashboard berbasis web sehingga mendukung proses pemantauan kondisi tanah secara real-time.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada rancangan sistem yang mengintegrasikan berbagai parameter kesehatan tanah dalam satu platform IoT sebagai dasar identifikasi faktor pembatas produktivitas lahan. Berbeda dengan sebagian besar penelitian sebelumnya yang hanya memantau satu atau dua parameter tanah, rancangan yang diusulkan mampu menyediakan informasi yang lebih komprehensif sehingga berpotensi mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan lahan pertanian secara lebih efektif dan berbasis data.

Penelitian ini masih terbatas pada tahap perancangan sehingga implementasi perangkat keras, pengujian performa sistem, validasi akurasi sensor, serta evaluasi efektivitas sistem pada kondisi lapangan belum dilakukan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya diarahkan pada implementasi sistem pada lahan pertanian, pengujian kualitas komunikasi data dan keandalan sensor, serta pengembangan metode identifikasi menggunakan pendekatan *Fuzzy Logic*, *Machine Learning*, atau *Artificial Intelligence* untuk meningkatkan kemampuan analisis dan rekomendasi pengelolaan lahan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nahdlatul Ulama Lampung, atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama proses penyusunan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan saran, masukan, dan dukungan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik..

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *The State of Food and Agriculture 2023: Revealing the True Cost of Food to Transform Agrifood Systems*, Rome, Italy: FAO, 2023.
- [2] B. R. Aditya, E. Hernawati, T. Gunawan, and P. Aji, "Design an Agricultural Soil and Environment Monitoring System Based on IoT," *pertanika journal of sei & technol*, vol. 32, no. 6, pp. 2575 – 2589, 2024, doi: 10.47836/pjst.32.6.09
- [3] H. Hartanto, H. Hasan, T. Muzakkir, M. Y. Tharam, Mohd. Ilyas, and E. Radwitya, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Tanaman Lidah Buaya Menggunakan ESP32 Berbasis IoT," *Electrical Network Systems and Sources*, vol. 3, no. 1, pp. 23–31, Jan. 2024, doi: 10.58466/entries.v3i1.1575.
- [4] A. A. Shahane and Y. S. Shivay, "Soil Health and Its Improvement Through Novel Agronomic and Innovative Approaches," *Frontiers in Agronomy*, vol. 3, Art. no. 680456, 2021.
- [5] M. I. Rifki and F. H. Lubis, "Multiparameter Soil Fertility Monitoring System in Agriculture Based on the Internet of Things," *Journal of*

- Computer Science and Informatics Engineering*, vol. 5, no. 1, 2025.
- [6] W. Muhammad, L. Faridah, and Sutisna, "Automated Nutrient Control and Monitoring System for Internet of Things (IoT)-Based Hydroponic Towers," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan (JITET)*, vol. 13, no. 3, 2025.
- [7] A. Naji, A. Hnini, and A. Daaif, "Agricultural IoT technology: an overview of usages, technologies, and challenges," pp. 1–8, May 2023, doi: 10.1109/IRASET57153.2023.10153038.
- [8] R. Lal, "Soil Health and Carbon Management," *Food and Energy Security*, vol. 9, no. 4, 2020.
- [9] S. Painuly and S. Rana, "A Review on the Importance of Internet of Things in Agriculture Applications," pp. 906–913, Nov. 2023, doi: 10.1109/icccis60361.2023.10425338.
- [10] A. Khanna and S. Kaur, "Internet of Things (IoT), Applications and Challenges: A Comprehensive Review," *Wireless Personal Communications*, vol. 114, pp. 1687–1762, 2020.
- [11] P. Awasthi, S. Mishra, and N. Gupta, "Integrated Multi-Parameter Soil Sensor Technology for Continuous Real-Time Plant Health Analysis," pp. 1–6, Dec. 2024, doi: 10.1109/ariia63345.2024.11051673
- [12] A. Sinha and P. Dhanalakshmi, "Smart Agriculture Monitoring System Using Internet of Things," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 13, no. 6, pp. 2975–2988, 2022.
- [13] J. Ramson et al., "A Self-Powered, Real-Time, LoRaWAN IoT-Based Soil Health Monitoring System," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 11, pp. 9278–9293, 2021.
- [14] W. O. D. M. Ella, F. Biabdillah, A. Wajiansyah, and A. Mulia, "SMARTSOIL: Sistem Monitoring Kelembaban Tanah Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan ESP32 dan Sensor Soil Moisture," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 14, no. 1, 2026.
- [15] M. A. Andriansyah, M. Arifin, and Maroeto, "Designing Soil Color Sensors to Determine Soil Characteristics Based on Internet of Things (IoT)," *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, vol. 14, no. 1, 2025.
- [16] F. A. Silaban, Y. A. Putri, and S. R. Oktaviany, "Design of a Smart Farming Monitoring System Leveraging Internet of Things Technology: Application of the NPKTHCPH -S Sensor," *Journal Sensi*, vol. 10, no. 1, pp. 67–78, Feb. 2024, doi: 10.33050/sensi.v10i1.3118.
- [17] I. Spivak, S. Krepych, M. Litvynchuk, and S. Spivak, "Validation and Data Processing in JSON Format," July 2021, doi: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535582.
- [18] M. Sukur, T. Khristianto, E. Nurraharjo, and T. D. Wismarin, "Pemodelan layanan visualisasi data awan untuk pemantauan data multisensor," *JIKO (Jurnal Informatika dan Komputer)*, vol. 5, no. 3, pp. 188–193, Dec. 2022, doi: 10.33387/jiko.v5i3.5160.
- [19] J. L. Gaol et al., "Aplikasi Android untuk Monitoring Lahan Pertanian secara Realtime Berbasis Internet of Things," vol. 6, no. 3, Dec. 2020, doi: 10.28932/JUTISI.V6I3.3039.