



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**SISTEM MONITORING DAN KLASIFIKASI
KUALITAS TANAH BERBASIS *INTERNET OF
THINGS* DAN KECERDASAN BUATAN UNTUK
MENDUKUNG PERTANIAN PRESISI**

Sub-Judul:

**Klasifikasi dan Analisis Tingkat Kesuburan Tanah
Menggunakan Metode *Random Forest* Berbasis *Edge
Computing***

SKRIPSI

**RADEN MUHAMMAD FADIL AZHAR
2207421005**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MULTIMEDIA DAN
JARINGAN
JURUSAN TEKNIK INFORMATIKA DAN
KOMPUTER
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA
2026**



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**SISTEM MONITORING DAN KLASIFIKASI
KUALITAS TANAH BERBASIS *INTERNET OF
THINGS* DAN KECERDASAN BUATAN UNTUK
MENDUKUNG PERTANIAN PRESISI**

Sub-Judul:

**Klasifikasi dan Analisis Tingkat Kesuburan Tanah
Menggunakan Metode *Random Forest* Berbasis *Edge
Computing***

SKRIPSI
**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

**Dibuat untuk Melengkapi Syarat-Syarat yang diperlukan
untuk Memperoleh Diploma Empat Politeknik**

RADEN MUHAMMAD FADIL AZHAR

2207421005

**PROGRAM STUDI TEKNIK MULTIMEDIA DAN
JARINGAN
JURUSAN TEKNIK INFORMATIKA DAN
KOMPUTER
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA
2026**



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Raden Muhammad Fadil Azhar
NIM : 2207421005
Jurusan/Program Studi : Teknik Informatika dan Komputer/Teknik
Multimedia dan Jaringan
Judul Skripsi : Klasifikasi dan Analisis Tingkat Kesuburan Tanah Menggunakan Metode *Random Forest* Berbasis *Edge Computing*

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi ini benar – benar merupakan hasil karya saya sendiri, bebas dari peniruan terhadap karya dari orang lain. Kutipan pendapat dan tulisan orang lain ditunjuk sesuai dengan cara-cara penulisan karya ilmiah yang berlaku.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa dalam skripsi ini terkandung ciri – ciri plagiat dan bentuk – bentuk peniruan lain yang dianggap melanggar peraturan, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Depok, 15 Juni 2026

Yang membuat pernyataan



Raden Muhammad Fadil Azhar

NIM. 2207421005



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi diajukan oleh:

Nama : Raden Muhammad Fadil Azhar
NIM : 2207421005
Program Studi : Teknik Multimedia dan Jaringan
Judul Skripsi : Klasifikasi dan Analisis Tingkat Kesuburan Tanah Menggunakan Metode *Random Forest* Berbasis *Edge Computing*

Telah diuji oleh tim penguji dalam Sidang Skripsi pada hari ~~Pada~~ Tanggal 19, Bulan Juni Tahun 2026 dan dinyatakan LULUS

Disahkan oleh:

Pembimbing I Maria Agustin, S.Kom., M.Kom.

Penguji I Dr. Indra Hermawan, S.Kom., M.Kom.

Penguji II Susana Dwi Yulianti, M.Kom.

Penguji III Dwi Ermawati, M.T.

(Maria Agustin)
(Dr. Indra Hermawan)
(Susana Dwi Yulianti)
(Dwi Ermawati)

Mengetahui:

Jurusan Teknik Informatika dan Komputer

Ketua



Dr. Anita Hidayati, S.Kom., M.Kom.

NIP. 197908032003122003



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur senantiasa penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, karena atas limpahan rahmat, rida, dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul "Klasifikasi dan Analisis Tingkat Kesuburan Tanah Menggunakan Metode *Random Forest* Berbasis *Edge Computing*" dengan baik dan lancar.

Penyusunan skripsi ini merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan (Diploma Empat) pada Program Studi Teknik Multimedia dan Jaringan, Jurusan Teknik Informatika dan Komputer, Politeknik Negeri Jakarta.

Penulis menyadari bahwa proses penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bimbingan, dukungan, saran, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Maria Agustin, S.Kom., M.Kom, selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan arahan, bimbingan, serta evaluasi yang sangat berharga sejak awal hingga selesainya penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Indra Hermawan, S.Kom., M.Kom, selaku Ketua Program Studi D4 Teknik Multimedia dan Jaringan, yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan arahan kepada penulis untuk menyusun skripsi ini.
3. Keluarga dan kedua orang tua tercinta, teristimewa untuk ibu saya, atas segala doa yang tak pernah putus, dukungan moral, serta fasilitas yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan ini.
4. Kakak saya, Tasya Diah Anggraeni, atas segala bentuk dukungan, perhatian, dan semangat yang senantiasa diberikan kepada penulis.
5. Dr. Ir. Junita Barus, M.Si, selaku pihak yang telah memberikan dukungan, arahan, masukan, serta bantuan selama proses pelaksanaan penelitian di lapangan, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

6. Stephanie Mcissya Permata Asri Tarigan, yang selalu memberikan dukungan emosional, mendengarkan keluh kesah, serta tiada hentinya menyemangati penulis di setiap fase penyusunan penelitian ini.
7. Teman saya Muhammad Ilham Utama dan Bayu Dwi Setianto, yang telah menemani perjalanan ini.
8. Rekan-rekan mahasiswa Program Studi Teknik Multimedia dan Jaringan angkatan 2022, atas kebersamaan, diskusi, dan bantuan yang saling melengkapi selama menempuh masa perkuliahan.
9. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna karena keterbatasan pengetahuan dan pengalaman penulis. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi perbaikan dan pengembangan di masa mendatang.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat, wawasan, serta kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya di bidang *Internet of Things* dan kecerdasan buatan dalam mendukung sektor pertanian presisi di Indonesia.

Depok, 15 Juni 2026

Raden Muhammad Fadil Azhar
NIM. 2207421005

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Politeknik Negeri Jakarta, saya bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Raden Muhammad Fadil Azhar
NIM : 2207421005
Jurusan/Program Studi : Teknik Informatika dan Komputer/Teknik
Multimedia dan Jaringan

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Politeknik Negeri Jakarta Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Klasifikasi dan Analisis Tingkat Kesuburan Tanah Menggunakan Metode
Random Forest Berbasis *Edge Computing***

Berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Politeknik Negeri Jakarta Berhak menyimpan, mengalihmediakan/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Depok, 15 Juni 2026

Yang menyatakan



Raden Muhammad Fadil Azhar

NIM.2207421005

© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Klasifikasi dan Analisis Tingkat Kesuburan Tanah Menggunakan Metode Random Forest Berbasis Edge Computing

ABSTRAK

Ketahanan pangan dan pertanian presisi menuntut adanya pengelolaan lahan berbasis pemantauan dan analisis kualitas tanah secara seketika (*real-time*). Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem monitoring dan klasifikasi tingkat kesuburan tanah berbasis Internet of Things (IoT) dan kecerdasan buatan dengan pendekatan edge computing. Sistem akuisisi data dibangun menggunakan sensor tanah 7-in-1 untuk mengukur parameter derajat keasaman (pH), Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), dan Electrical Conductivity (EC), yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32. Untuk melakukan klasifikasi lima tingkat kesuburan tanah berdasarkan standar kelayakan Balittanah, penelitian ini mengevaluasi kinerja algoritma Random Forest, Support Vector Machine (SVM), XGBoost, dan Neural Network. Model terbaik selanjutnya dikonversi menjadi format bahasa C/C++ menggunakan pustaka micromlgen (TinyML) agar dapat dieksekusi langsung pada ESP32 tanpa bergantung pada komputasi cloud. Hasil evaluasi komparatif menggunakan Stratified 6-Fold Cross-Validation menunjukkan bahwa algoritma Random Forest memiliki performa klasifikasi tertinggi dengan akurasi 99,85%. Melalui penerapan hyperparameter tuning, kompleksitas model sukses direduksi sehingga ukuran file menyusut sebesar 79,2% menjadi 27,97 KB. Hal ini membuat model sangat ringan karena hanya mengonsumsi 0,68% memori flash mikrokontroler dengan rata-rata waktu inferensi yang sangat cepat, yakni 0,0000412 detik. Infrastruktur jaringan berbasis protokol MQTT menuju basis data Supabase juga terbukti andal dengan rata-rata latensi pengiriman 0,79 detik serta tahan terhadap gangguan koneksi (*fault tolerance*). Secara keseluruhan, sistem cerdas ini berhasil diimplementasikan secara end-to-end yang dihubungkan dengan antarmuka aplikasi mobile berbasis Capacitor Progressive Web App (PWA) untuk menyajikan data pemantauan, klasifikasi AI, serta rekomendasi tindakan secara akurat dan *real-time*.

Kata Kunci: Edge Computing, Internet of Things, Kecerdasan Buatan, Kualitas Tanah, Machine Learning, Random Forest

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan dan Manfaat	4
1.4.1 Tujuan Penelitian.....	4
1.4.2 Manfaat Penelitian	5
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB II.....	8
2.1 Penelitian Terkait.....	8
2.2 Landasan Teori	11
2.2.1 Pertanian Presisi (<i>Precision Agriculture</i>).....	11
2.2.2 Internet of Things (IoT) dalam Pertanian.....	12
2.2.3 Edge Computing dan TinyML	12
2.2.4 Parameter Kualitas Tanah.....	13



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.2.5	Kecerdasan Buatan dan <i>Machine Learning</i>	15
2.2.6	Algoritma Klasifikasi	17
2.2.7	Evaluasi Model Klasifikasi	19
2.2.8	<i>Cross-Validation</i>	20
2.2.9	Evaluasi Kinerja <i>Edge Computing</i>	21
2.2.10	Evaluasi Sistem dan Aplikasi <i>Mobile</i>	22
2.2.11	<i>Backend-as-a-Service</i> (BaaS) dan Supabase	23
2.2.12	<i>Progressive Web App (PWA)</i> dan Capacitor	23
BAB III		24
3.1	Rancangan Penelitian	24
3.2	Tahapan Penelitian	25
3.3	Objek Penelitian	26
BAB IV		27
4.1	Analisis Kebutuhan Sistem	27
4.1.1	Analisis Kebutuhan Data	27
4.1.2	Analisis Kebutuhan Fungsional	27
4.1.3	Analisis Kebutuhan Non-Fungsional	28
4.1.4	Analisis Kebutuhan Perangkat Keras	28
4.1.5	Analisis Kebutuhan Perangkat Lunak	29
4.2	Perancangan Sistem	30
4.2.1	Arsitektur Sistem	30
4.2.2	Perancangan Alur Komunikasi Data	32
4.2.3	Perancangan Hardware	34
4.2.4	Perancangan Server	34
4.2.5	Alur Kerja Pengembangan Model AI dan Aplikasi	35
4.2.6	Perancangan Proses Pelabelan Data	37



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.2.7	Perancangan Algoritma Klasifikasi dan Rekomendasi Tindakan	38
4.2.8	Perancangan Database dan Antarmuka Aplikasi.....	39
4.3	Implementasi Sistem	42
4.3.1	Implementasi Hardware	42
4.3.2	Implementasi Pengumpulan Data	44
4.3.3	Implementasi Pra-pemrosesan Data	45
4.3.4	Implementasi Pelatihan dan Komparasi Model	48
4.3.5	Implementasi <i>Hyperparameter Tuning</i>	52
4.3.6	Implementasi <i>Edge Computing</i> (<i>Deployment Model</i> ke ESP32).....	55
4.3.7	Implementasi Server.....	57
4.3.8	Implementasi Aplikasi <i>Mobile</i>	57
4.4	Pengujian Sistem.....	59
4.4.1	Deskripsi Pengujian	59
4.4.2	Prosedur Pengujian	60
4.4.3	Data Hasil Pengujian.....	60
BAB V.....		66
5.1	Kesimpulan	66
5.2	Saran.....	67
DAFTAR PUSTAKA.....		69
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....		73



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terkait	8
Tabel 2.2 Analisis Perbandingan Kuantitatif Penelitian	10
Tabel 4.1 Kebutuhan Perangkat Keras	29
Tabel 4.2 Kebutuhan Perangkat Lunak	29
Tabel 4.3 Rancangan Logika Rekomendasi Berbasis Defisiensi Nutrisi	39
Tabel 4.4 Contoh Raw Data Hasil Pembacaan Sensor Tanah	44
Tabel 4.5 Perbandingan Performa Algoritma pada 6-Fold Cross-Validation	49
Tabel 4.6 Parameter Terbaik Hasil GridSearchCV (Stratified 6-Fold CV)	52
Tabel 4.7 Hasil Evaluasi Tuned Random Forest	53
Tabel 4.8 Hasil Evaluasi Performa Model Klasifikasi	61
Tabel 4.9 Hasil Pengujian Komparasi Model 5 Parameter vs 4 Parameter	61
Tabel 4.10 Pengujian Komparasi Kinerja Model	62
Tabel 4.11 Hasil Pengujian Fungsionalitas Edge Computing (ESP32)	62
Tabel 4.12 Hasil Pengujian Penggunaan Memori ESP32	63
Tabel 4.13 Hasil Pengujian Waktu Inferensi Kecerdasan Buatan	63
Tabel 4.14 Hasil Pengujian Transmisi Data	64
Tabel 4.15 Hasil Pengujian Sinkronisasi dan Latensi Forwarding Data	64
Tabel 4.16 Hasil Pengujian Fungsionalitas Aplikasi Mobile	65



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Tahapan Penelitian	25
Gambar 4.1 Arsitektur Sistem	30
Gambar 4.2 Flowchart Alur Komunikasi Data	32
Gambar 4.3 Arsitektur Server	34
Gambar 4.4 Rancangan Skema Database	40
Gambar 4.5 Rancangan Antarmuka Pengguna Aplikasi Mobile	41
Gambar 4.6 Implementasi Hardware pada Lahan Pertanian	43
Gambar 4.7 Proses Pengumpulan Data	44
Gambar 4.8 Grafik Elbow dan Silhouette Score pada Algoritma K-Means	46
Gambar 4.9 Heatmap Centroid Parameter Kualitas Tanah	47
Gambar 4.10 Distribusi Kelas Kesuburan Tanah	48
Gambar 4.11 Tren Stabilitas Akurasi	50
Gambar 4.12 Confusion Matrix Model Random Forest	51
Gambar 4.13 Confusion Matrix Model Random Forest Setelah Tuning	53
Gambar 4.14 Perbandingan Beban Memori Model Sebelum dan Sesudah Tuning	54
Gambar 4.15 Feature Importance pada Model Final Random Forest	55
Gambar 4.16 Hasil Inferensi AI pada Serial Monitor	56
Gambar 4.17 Hasil Implementasi Penyimpanan Data Sensor pada Supabase	57
Gambar 4.18 Tampilan Antarmuka Aplikasi Mobile	58

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Ketahanan pangan nasional menuntut pengelolaan lahan pertanian yang tidak hanya bergantung pada pemantauan kondisi tanah secara aktual, tetapi juga pada kemampuan untuk menganalisis dan menentukan status kualitas tanah secara berkelanjutan (Wulandari & Astiko, 2025).

Informasi kondisi tanah yang bersifat *real-time* sangat penting, namun tanpa adanya analisis lanjutan, petani masih cenderung melakukan pengelolaan lahan secara reaktif, seperti pemupukan dan pengolahan tanah yang dilakukan setelah muncul permasalahan pada tanaman.

Kondisi kualitas tanah bersifat dinamis dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain pola pemupukan, curah hujan, sistem irigasi, serta aktivitas budidaya tanaman. Perubahan parameter tanah yang terjadi secara bertahap sering kali sulit diidentifikasi hanya melalui pengamatan data secara manual. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan komputasi yang mampu mengolah data sensor, mengidentifikasi pola hubungan antar-parameter tanah, serta mengklasifikasikan kondisi tanah.

Perkembangan sistem monitoring kualitas tanah berbasis *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pengumpulan data parameter tanah secara kontinu, seperti pH, kandungan nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), dan *electrical conductivity* (EC). Data sensor yang tersimpan secara berkala menghasilkan kumpulan data historis yang berpotensi besar untuk dianalisis lebih lanjut. Namun, pada praktiknya, data tersebut umumnya masih disajikan dalam bentuk visualisasi sederhana tanpa pemanfaatan metode analisis yang mampu menghasilkan informasi diagnosis status tingkat kesuburan tanah bagi pengguna.

Beberapa penelitian terdahulu telah berupaya mengintegrasikan IoT dan kecerdasan buatan dalam pertanian, namun masih terdapat berbagai batasan. Penelitian oleh Sharafat et al. (2025) berhasil memprediksi kondisi tanah



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menggunakan beberapa algoritma, namun memiliki batasan tingkat klasifikasi karena hanya mengevaluasi satu parameter ukur, yaitu suhu tanah. Pendekatan lain oleh Cheema & Pires (2025) lebih berfokus pada pengembangan *hardware* sensor elektrokimia untuk deteksi nutrisi tanpa pemodelan klasifikasi yang komprehensif. Penelitian Munezero et al. (2024) menggunakan *Decision Tree* dan *Random Forest* untuk klasifikasi NPK dengan akurasi 90-96,5%, namun belum mencakup analisis parameter kualitas tanah secara menyeluruh seperti *electrical conductivity*. Sementara itu, penelitian Shahare et al. (2023) yang mencapai tingkat akurasi 98% masih bergantung pada pengujian sampel tanah di laboratorium, bukan pemrosesan *real-time* di lapangan. Secara keseluruhan, penelitian-penelitian tersebut memiliki kekurangan pada terbatasnya parameter tingkat kesuburan yang dianalisis, serta belum mengimplementasikan kecerdasan buatan pada perangkat keras.

Untuk mengatasi permasalahan kompleksitas dan keterbatasan parameter tersebut, diperlukan sebuah tahapan untuk mencari model klasifikasi yang tidak hanya memiliki tingkat akurasi tinggi, tetapi juga arsitektur komputasi yang ringan. Hal ini dicapai dengan melakukan evaluasi dan komparasi kinerja terhadap empat algoritma *Machine Learning*, yaitu *Random Forest*, *Support Vector Machine* (SVM), *XGBoost*, dan *Neural Network*. Perbandingan ini bertujuan untuk mengukur tingkat akurasi tertinggi dalam mengklasifikasikan kelima parameter tanah secara bersamaan, sekaligus memastikan bahwa model yang terpilih dapat diekstrak menjadi sangat ringan agar kompatibel untuk ditanamkan ke dalam mikrokontroler.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini berfokus pada penerapan model kecerdasan buatan untuk klasifikasi dan analisis tingkat kesuburan tanah berbasis data sensor IoT. Model yang dikembangkan diharapkan mampu mengklasifikasi status kesuburan tanah secara *real-time*, membantu interpretasi kondisi tanah secara lebih komprehensif, serta mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan lahan pertanian padi secara lebih efektif, dan efisien. Agar informasi diagnosis dan klasifikasi tersebut dapat diakses dengan mudah dan dikelola secara efisien, diperlukan sistem



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

penyimpanan data yang serta antarmuka pengguna yang praktis. Oleh karena itu, penelitian ini juga mengintegrasikan penggunaan Supabase sebagai layanan *backend* untuk manajemen *database* secara *real-time*, serta pengembangan antarmuka berupa aplikasi *mobile* berbasis Capacitor *Progressive Web App* (PWA). Dengan adanya integrasi ini, pengguna atau petani dapat memantau kondisi lahan dan menerima rekomendasi pengelolaan pertanian di mana saja secara fleksibel melalui perangkat *mobile*.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mengembangkan sistem cerdas berbasis *edge computing* yang mampu melakukan pemantauan dan klasifikasi tingkat kesuburan tanah secara *real-time*?
2. Bagaimana mengintegrasikan perangkat *edge computing*, dan algoritma kecerdasan buatan dalam satu sistem yang mampu memberikan informasi tingkat kesuburan tanah secara otomatis?
3. Bagaimana memperoleh model kecerdasan buatan yang memiliki akurasi tinggi namun tetap ringan sehingga dapat dijalankan pada perangkat *edge computing* dengan sumber daya terbatas?
4. Bagaimana mengevaluasi performa sistem yang dikembangkan berdasarkan parameter akurasi klasifikasi, waktu respons, efisiensi penggunaan sumber daya komputasi, dan keandalan sistem di lingkungan pertanian?
5. Bagaimana merancang dan mengintegrasikan sistem *backend* menggunakan Supabase serta antarmuka aplikasi *mobile* berbasis Capacitor PWA untuk menyajikan data monitoring dan hasil klasifikasi tingkat kesuburan tanah kepada *pengguna*?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah dan tidak meluas, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Objek penelitian dibatasi pada pengolahan data historis hasil pengukuran *Internet of Things* (IoT) secara *real-time* di lahan pertanian padi wilayah



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Kabupaten Bogor dengan parameter ukur meliputi pH, Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), dan *Electrical Conductivity* (EC), di mana klasifikasinya difokuskan pada lima kelas tingkat kesuburan berdasarkan standar kelayakan Balittanah beserta rekomendasi pengelolaannya

2. Penelitian ini berfokus pada arsitektur *software* (tidak membahas perancangan sirkuit perangkat keras secara mendetail), di mana implementasi *edge computing* untuk mengeksekusi sistem klasifikasi secara otomatis dibatasi pada penggunaan mikrokontroler ESP32.
3. Algoritma *Machine Learning* yang diterapkan dan dikomparasikan untuk mendapatkan model kecerdasan buatan meliputi *Random Forest*, *Support Vector Machine* (SVM), *XGBoost*, dan *Neural Network*, di mana model terbaik akan dikonversi menggunakan pustaka *micromlgen* agar berukuran ringan dan kompatibel ditanamkan pada perangkat *edge*.
4. Evaluasi performa dari masing-masing model klasifikasi dibatasi pada penggunaan metrik pengujian *Confusion Matrix* yang meliputi Akurasi, Presisi, Recall, dan F1-Score.
5. Pengembangan antarmuka pengguna difokuskan pada pembuatan aplikasi *mobile* menggunakan *framework Capacitor* berbasis *Progressive Web App* (PWA) terintegrasi dengan layanan *backend* Supabase, yang fungsionalitasnya dibatasi hanya sebagai media pemantauan kondisi lahan, visualisasi klasifikasi, dan penyajian rekomendasi, tanpa adanya fitur kontrol aktuator jarak jauh.

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan Penelitian

1. Mengembangkan sistem cerdas terintegrasi berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *edge computing* yang mampu melakukan akuisisi, pemantauan, serta klasifikasi tingkat kesuburan tanah menggunakan kecerdasan buatan secara *real-time* di lokasi pengukuran untuk mendukung pertanian presisi.
2. Mengevaluasi kinerja sistem yang dikembangkan berdasarkan parameter akurasi klasifikasi, *precision*, *recall*, *F1-score*, waktu



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

respons (*latency*), penggunaan memori, konsumsi daya, dan efisiensi transmisi data.

3. Menghasilkan prototipe sistem klasifikasi tingkat kesuburan tanah yang dapat digunakan sebagai pendukung pengambilan keputusan dalam penerapan pertanian presisi
4. Membangun dan mengintegrasikan sistem *backend* (Supabase) dengan aplikasi *mobile* (Capacitor PWA) sebagai media penyajian data pemantauan dan hasil klasifikasi kualitas tanah secara *real-time*.

1.4.2 Manfaat Penelitian

1. Memberikan kontribusi teknologi cerdas (*Smart Farming*) bagi petani berupa sistem yang mampu memproses data klasifikasi secara mandiri (*on-device*) di lahan, sehingga informasi kesuburan tanah dapat diketahui secara cepat, menghemat *bandwidth*, dan meminimalisasi ketergantungan pada *cloud computing*.
2. Menambah referensi akademis dan menjadi dasar penelitian lanjutan terkait keandalan *Machine Learning* pada perangkat bersumber daya terbatas (*TinyML*), dengan menyediakan bukti empiris mengenai tingkat akurasi, efisiensi memori, dan latensi komputasi.
3. Membantu petani melalui sistem pendukung keputusan untuk menentukan tindakan agronomi (seperti pemupukan) yang lebih presisi, mengurangi risiko gagal panen akibat malnutrisi tanah, dan berpotensi meningkatkan produktivitas hasil pertanian.
4. Meningkatkan efisiensi pemantauan dengan memberikan kemudahan bagi pengguna untuk mengakses kondisi *real-time* lahan, riwayat data historis, serta rekomendasi secara fleksibel dari mana saja melalui integrasi aplikasi *mobile* dan *database cloud*.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan skripsi ini disusun sebagai berikut:

1. Bab I Pendahuluan

Bab I membahas mengenai latar belakang penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2. Bab II Tinjauan Pustaka

Bab II berisikan tinjauan pustaka dan landasan teori atau kajian ilmu secara garis besar mengenai topik permasalahan pada penelitian ini, seperti beberapa penelitian – penelitian terdahulu berkaitan pada isu relevan.

3. Bab III Metodologi Penelitian

Bab III menjelaskan metode penelitian yang digunakan, meliputi rancangan penelitian, tahapan penelitian, dan objek penelitian.

4. Bab IV Hasil dan Pembahasan

Bab IV menjelaskan tentang analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi sistem, dan pengujian sistem yang terdiri dari deskripsi pengujian dan data hasil pengujian.

5. Bab V Penutup

Bab V berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk pengembangan sistem monitoring dan klasifikasi kualitas tanah pada penelitian selanjutnya.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian mengenai penerapan teknologi di bidang pertanian, khususnya *Internet of Things* (IoT) dan Kecerdasan Buatan (AI), telah banyak dikembangkan untuk mendukung konsep pertanian presisi. Penelitian terdahulu umumnya berfokus pada pengembangan sistem monitoring berbasis IoT serta analisis data menggunakan kecerdasan buatan untuk memantau dan mengklasifikasi kualitas tanah. Oleh karena itu, tinjauan pustaka ini membahas beberapa penelitian yang relevan dengan topik monitoring dan klasifikasi kualitas tanah serta mengidentifikasi perbedaan dan fokus penelitian yang dilakukan, sebagaimana dirangkum pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian Terkait

No	Judul Penilitan	Metode	Hasil Penelitian	Fokus Penelitian
1	An IoT-enabled AI system for real-time crop prediction using soil and weather data in precision agriculture (Sharafat et al., 2025)	<i>Machine Learning</i> (XGBoost, LightGBM, CatBoost)	Model <i>machine learning</i> terbukti efektif mengklasifikasi suhu tanah pada berbagai kedalaman dengan metrik evaluasi yang tinggi ($R > 0.98$).	Penelitian ini hanya mengklasifikasi satu parameter (suhu tanah).
2	AIoT based soil nutrient analysis and recommendation system for crops using machine learning (Cheema & Pires., 2025)	Sensor Elektrokimia & <i>Machine Learning</i>	Menggabungkan sensor elektrokimia dengan ML untuk mendeteksi nutrisi tanah secara cepat dan akurat.	Penelitian ini fokus pada pengembangan sisi <i>hardware</i> sensor baru dan mendeteksi nutrisi pada tanah.
3	Machine Learning and Internet of Things Based Real Time NPK Fertilizer Prediction for	Eksperimen menggunakan sensor IoT (pH, NPK, Suhu, Kelembaban) dan model <i>Machine Learning</i> (<i>Random Forest</i> , <i>Decision</i>	Model <i>Decision Tree</i> mencapai akurasi pelatihan 96.5% untuk prediksi Nitrogen dan Kalium, sedangkan <i>Random Forest</i> mencapai	Penelitian ini berfokus pada mengklasifikasi kebutuhan pupuk untuk tanaman Singkong di Rwanda.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

	Cassava Crop in Rwanda (Munezero, et al., 2024)	<i>Tree, K-Nearest Neighbors</i>) untuk mengklasifikasi kebutuhan pupuk.	akurasi 90% untuk Fosfor pada data uji.	
4	A Comprehensive Analysis of Machine Learning-Based Assessment and Prediction of Soil Enzyme Activity (Shahare, et al., 2023)	Eksperimen Kuantitatif menggunakan <i>Random Forest</i> (RF), <i>Multiple Linear Regression</i> (MLR), dan <i>Artificial Neural Network</i> (ANN)	Model <i>Random Forest</i> terbukti paling unggul dengan akurasi 98% untuk mengklasifikasi aktivitas enzim selulase dan 94% untuk N-acetyl-glucosaminidase dibandingkan model MLR dan ANN	Penelitian ini mengklasifikasi aktivitas enzim tanah menggunakan sampel tanah laboratorium di India.
5	Designing Resilient IoT and Edge Computing with Federated TinyML (Laiu et al., 2025)	Eksperimen arsitektur <i>Edge Computing</i> dan <i>TinyML</i> pada perangkat IoT bersumber daya komputasi terbatas.	Menghasilkan arsitektur komputasi yang tangguh dan efisien untuk memproses data model <i>Machine Learning</i> secara langsung di perangkat <i>edge (on-device inference)</i> .	Penelitian ini berfokus pada efisiensi pemrosesan algoritma AI menggunakan TinyML pada perangkat <i>edge</i> , namun belum diterapkan secara spesifik pada sistem klasifikasi kualitas lahan pertanian.
Usulan		Klasifikasi dan Analisis Tingkat Kesuburan Tanah Menggunakan Metode Random Forest Berbasis Edge Computing	Eksperimen Kuantitatif menggunakan sensor IoT (<i>soil sensor 7 in 1</i>), Mikrokontroler (Edge Device), dan algoritma Machine Learning (Random Forest, SVM, XGBoost) yang dikonversi menggunakan TinyML (<i>micromlgen</i>).	Penelitian ini menggabungkan monitoring <i>real-time</i> dan analisis perbandingan secara kuantitatif terhadap empat (4) algoritma <i>Machine Learning</i> (<i>Random Forest, SVM, XGBoost, Neural Network</i>). Kebaruan utama terletak pada penerapan TinyML (Edge Computing), di mana proses inferensi AI



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

			dilakukan langsung di mikrokontroler (bukan di <i>cloud</i>) untuk efisiensi daya dan latensi, serta difokuskan pada karakteristik lahan sawah padi di Indonesia. Selain itu, penelitian ini juga berfokus pada kemudahan aksesibilitas data oleh pengguna melalui penyediaan aplikasi <i>mobile</i> yang responsif dan penyimpanan data yang terpusat secara <i>real-time</i> .
--	--	--	---

Berdasarkan kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu pada Tabel 2.1, dapat diketahui bahwa sebagian besar penelitian telah berhasil menerapkan teknologi Internet of Things (IoT), Machine Learning, maupun Edge Computing pada bidang pertanian. Namun, masih terdapat beberapa keterbatasan, seperti jumlah parameter tanah yang dianalisis, cakupan algoritma yang dibandingkan, implementasi inferensi pada perangkat edge, serta integrasi sistem secara end-to-end. Oleh karena itu, untuk memperjelas posisi dan kontribusi penelitian yang diusulkan, dilakukan analisis perbandingan secara kuantitatif terhadap beberapa aspek utama penelitian terdahulu.

Tabel 2.2 Analisis Perbandingan Kuantitatif Penelitian

Kriteria	Sharafat et al. (2025)	Munezero et al. (2024)	Shahare et al. (2023)	Penelitian Ini
Jumlah Parameter Tanah	1	4	3	5
Algoritma yang Dibandingkan	3	3	3	4
Klasifikasi <i>Multi-Level</i>	Tidak	Tidak	Tidak	Ya



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Kriteria	Sharafat et al. (2025)	Munezero et al. (2024)	Shahare et al. (2023)	Penelitian Ini
<i>Real-Time IoT</i>	Ya	Ya	Tidak	Ya
<i>Edge Computing</i>	Tidak	Tidak	Tidak	Ya
<i>Mobile Application</i>	Tidak	Tidak	Tidak	Ya

Berdasarkan analisis pada penelitian terdahulu, belum ditemukan penelitian yang secara bersamaan mengintegrasikan lima parameter kualitas tanah (pH, N, P, K, dan EC), melakukan komparasi empat algoritma *Machine Learning*, menerapkan model klasifikasi pada perangkat *edge* menggunakan TinyML, serta menyediakan antarmuka *mobile* berbasis Capacitor PWA untuk pemantauan real-time. Secara kuantitatif, penelitian ini menggunakan lima parameter utama kualitas tanah, lebih banyak dibandingkan penelitian Sharafat et al. (2025) yang hanya menggunakan satu parameter maupun penelitian Munezero et al. (2024) yang menggunakan empat parameter. Selain itu, penelitian ini tidak hanya berfokus pada proses monitoring, tetapi juga mengintegrasikan klasifikasi tingkat kesuburan tanah secara *real-time* melalui implementasi inferensi langsung pada mikrokontroler ESP32 menggunakan pendekatan TinyML. Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi teknologi IoT, komparasi empat algoritma *Machine Learning*, implementasi TinyML berbasis perangkat *edge*, serta penyediaan aplikasi *mobile* berbasis Capacitor PWA dalam satu sistem terintegrasi untuk mendukung pertanian presisi.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pertanian Presisi (*Precision Agriculture*)

Pertanian presisi merupakan pendekatan inovatif dalam sektor agrikultur yang mengintegrasikan teknologi informasi, sensor, sistem navigasi satelit, serta analisis data untuk mengoptimalkan pengelolaan lahan dan hasil pertanian. Pendekatan ini beroperasi dengan prinsip dasar '*right input, right place, right time, and right amount*', yang berarti setiap input produksi seperti air dan pupuk diberikan secara presisi sesuai kebutuhan spesifik pada tiap bagian lahan. Penerapan konsep ini bertujuan untuk menciptakan sistem



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

pertanian yang lebih modern, efisien, dan berkelanjutan secara lingkungan (Anggreni, N. V. 2024).

2.2.2 *Internet of Things (IoT)* dalam Pertanian

Berdasarkan tinjauan literatur sistematis terhadap penerapan teknologi ini di Indonesia, tren penggunaan IoT di sektor pertanian saat ini didominasi oleh sistem monitoring dan otomatisasi. Sistem ini berfungsi untuk memantau kondisi lingkungan secara *real-time* serta melakukan tindakan otomatis seperti penyiraman dan pemberian nutrisi, yang terbukti meningkatkan efisiensi operasional. Selain itu, dari segi platform teknologi, aplikasi berbasis mobile (*Android*) menjadi antarmuka yang paling banyak digunakan oleh petani dibandingkan website, karena fleksibilitas dan kemudahan aksesnya saat digunakan langsung di lahan pertanian (Alfassa, A. I. et al. 2025).

2.2.3 Edge Computing dan TinyML

a) Edge Computing

Edge Computing adalah paradigma komputasi yang memindahkan proses pengolahan data dari server pusat (*cloud*) ke lokasi yang lebih dekat dengan sumber data, seperti *gateway* atau perangkat IoT itu sendiri. Arsitektur ini dirancang untuk mengurangi *overhead* komunikasi ke *cloud*, menghemat energi perangkat, serta mempercepat waktu respon sistem karena data diproses secara lokal (Laiu, P. et al. 2025).

b) TinyML (Tiny Machine Learning)

TinyML merupakan cabang dari *machine learning* yang berfokus pada penerapan model cerdas pada perangkat berdaya sangat rendah dan memiliki sumber daya terbatas, seperti mikrokontroler (MCU). Tujuan utama *TinyML* adalah mengatasi batasan memori dan komputasi pada perangkat keras IoT sambil tetap mempertahankan akurasi model yang dapat diterima (Laiu, P. et al. 2025). Dengan *TinyML*, inferensi model dapat dilakukan langsung di perangkat (*on-device inference*), yang



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

memungkinkan deteksi anomali atau mengklasifikasi kondisi tanah dilakukan secara *real-time* tanpa perlu menunggu koneksi internet yang stabil ke server.

c) Micromlgen

Micromlgen adalah sebuah pustaka (*library*) open-source berbasis Python yang dirancang khusus untuk memfasilitasi penerapan *Tiny Machine Learning (TinyML)* pada perangkat mikrokontroler. Fungsi utamanya adalah mengonversi model *machine learning* klasik (seperti *Random Forest*, *Support Vector Machine*, dan *Decision Tree*) yang telah dilatih pada umumnya menggunakan modul *Scikit-learn*—menjadi kode bahasa C/C++ murni (*plain C code*). (Rajić et al., 2024).

2.2.4 Parameter Kualitas Tanah

Kualitas tanah ditentukan oleh sifat fisik dan kimia yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Pemahaman mendalam mengenai parameter tanah sangat diperlukan untuk menentukan tindakan pemupukan dan pengelolaan lahan yang tepat. Berikut adalah parameter utama yang digunakan dalam penelitian ini.

a) Derajat Keasaman (pH) Tanah

Nilai pH tanah merupakan indikator kimia penting yang menentukan keberhasilan pertanian karena mempengaruhi ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Kondisi pH tanah harus diperhatikan secara cermat, terutama dalam hubungannya dengan pemupukan, karena pH yang tidak netral dapat menyebabkan unsur hara terikat dan tidak dapat diserap tanaman. Sebagai contoh, pada tanah dengan pH rendah (masam), unsur Fosfor akan bereaksi dengan ion besi dan aluminium membentuk senyawa yang sukar larut, sedangkan pada tanah dengan pH tinggi (basa), Fosfor akan bereaksi dengan Kalsium dan menjadi tidak tersedia bagi tanaman (Gobel, S. S. et al. 2025).

b) Nitrogen (N)



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Nitrogen merupakan unsur hara makro primer yang memiliki peran vital sebagai penyusun enzim yang sangat besar fungsinya dalam proses metabolisme tanaman. Ketersediaan nitrogen di dalam tanah sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu, tekstur tanah, dan pH tanah. Kekurangan nitrogen dapat terjadi akibat proses pencucian oleh air, denitrifikasi, atau terangkat saat panen, yang jika dibiarkan akan menghambat mineralisasi dan menurunkan kualitas pertumbuhan tanaman (Gobel, S. S. et al. 2025).

c) Fosfor (P)

Fosfor adalah unsur hara makro esensial yang sangat dibutuhkan untuk menunjang pertumbuhan tanaman, namun ketersediaannya di dalam tanah seringkali terbatas. Hal ini disebabkan karena sebagian besar senyawa fosfor di dalam tanah berada dalam bentuk yang terikat oleh partikel tanah atau bahan organik sehingga sukar larut dalam air dan sulit diserap oleh akar tanaman. Ketersediaan fosfor sangat bergantung pada keberadaan bahan organik dan keseimbangan unsur hara lainnya dalam tanah (Gobel, S. S. et al. 2025).

d) Kalium (K)

Kalium memegang peranan penting dalam proses metabolisme tanaman, di mana kebutuhannya seringkali sebanding atau bahkan lebih tinggi daripada kebutuhan nitrogen, terutama pada tanaman pangan seperti padi dan jagung. Sifat dasar kalium yang mudah larut menyebabkannya rentan mengalami pencucian (*leaching*) dan terhanyut oleh air, khususnya pada lahan dengan curah hujan tinggi atau lahan sawah yang tergenang. Jika kebutuhan kalium tidak tercukupi, proses metabolisme akan terganggu yang pada akhirnya berdampak pada penurunan produktivitas dan kualitas hasil panen (Gobel, S. S. et al. 2025).

e) *Electrical Conductivity* (EC)



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Electrical Conductivity (EC) atau konduktivitas listrik adalah parameter yang mengukur kemampuan larutan tanah dalam menghantarkan arus listrik, yang menjadi indikator utama konsentrasi garam terlarut dan ketersediaan ion nutrisi di dalam tanah. Pemantauan EC sangat krusial dalam pertanian presisi karena dapat mendeteksi masalah salinitas yang mempengaruhi tekanan osmotik pada akar tanaman. Nilai EC yang terlalu tinggi dapat menghambat penyerapan air dan nutrisi, sementara nilai EC yang rendah dapat mengindikasikan defisiensi unsur hara. Dengan memonitor EC secara *real-time* menggunakan sensor tanah, petani dapat menentukan strategi pengelolaan irigasi dan pemupukan yang lebih akurat untuk menjaga produktivitas tanaman (Shahab et al., 2025).

Untuk mengevaluasi status tingkat kesuburan tanah, diperlukan suatu parameter rujukan yang baku. Penelitian ini mengacu pada standar kriteria penilaian sifat kimia tanah yang diterbitkan oleh Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk (Balittanah), Kementerian Pertanian Republik Indonesia (Eviati et al., 2023). Standar ini mengklasifikasikan kondisi unsur hara dan sifat kimia tanah ke dalam lima tingkatan utama, yaitu: Sangat Rendah, Rendah, Sedang, Tinggi, dan Sangat Tinggi. Klasifikasi ini menjadi landasan teori utama dalam pelabelan *dataset* kualitas tanah pada perancangan model kecerdasan buatan. Rincian kriteria penilaian tersebut dapat dilihat pada tabel kelayakan analisis tanah yang terlampir pada Lampiran 3.

2.2.5 Kecerdasan Buatan dan *Machine Learning*

a) Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence*)

Kecerdasan Buatan atau *Artificial Intelligence* (AI) didefinisikan sebagai sistem komputer yang dirancang untuk meniru kemampuan kecerdasan manusia dalam melakukan tugas-tugas tertentu. AI mencakup penerapan algoritma dan kerangka matematika yang melatih sistem berdasarkan data,



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

sehingga memungkinkannya untuk mengidentifikasi pola dan membuat keputusan yang cerdas tanpa intervensi manusia secara terus-menerus. Inti dari teknologi ini adalah kemampuannya untuk memproses dan menganalisis data dalam jumlah besar (*big data*) secara efisien guna menghasilkan wawasan prediktif yang berharga bagi pengambilan keputusan (Pratiwi, A. A. et al. 2025).

b) Machine Learning

Machine Learning (ML) merupakan komponen utama dari kecerdasan buatan yang memungkinkan komputer untuk belajar dari informasi (data) dan menarik kesimpulan atau klasifikasi berdasarkan pola yang ditemukan dalam data tersebut. Berbeda dengan sistem konvensional, algoritma ML memungkinkan sistem untuk belajar secara mandiri dari data historis seperti data cuaca, suhu, dan kelembaban tanah untuk merekomendasikan keputusan yang paling efisien, misalnya dalam penentuan waktu irigasi atau klasifikasi hasil panen (Pratiwi, A. A. et al. 2025).

c) Unsupervised Machine Learning

Berdasarkan metode pembelajaran dan ketersediaan label pada *dataset* yang digunakan, algoritma *Machine Learning* umumnya dibagi menjadi beberapa kategori utama, salah satu yang paling krusial untuk analisis data eksploratif adalah *Unsupervised Machine Learning*. Berbeda dengan pendekatan *Supervised Learning* yang memerlukan pasangan input-output berlabel sebagai target pembelajaran, *Unsupervised Learning* bekerja dengan cara menganalisis dan memproses *dataset* mentah yang tidak memiliki label atau target keluaran sebelumnya. Algoritma ini berfokus pada kemampuan sistem untuk mengeksplorasi struktur data, mengenali pola-pola laten yang tersembunyi, serta mengelompokkan entitas data berdasarkan kemiripan karakteristik yang dimiliki (Bougiouklis et al., 2025).

d) K-Means Clustering



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

K-Means Clustering merupakan salah satu algoritma dalam rumpun *unsupervised machine learning* yang paling sering digunakan untuk mengelompokkan himpunan data ke dalam sejumlah kelompok (*cluster*) berdasarkan tingkat kemiripan fitur numeriknya. Algoritma ini bekerja secara iteratif dengan menentukan sejumlah K titik pusat massa (*centroid*) awal, menghitung jarak terdekat antar titik data menggunakan metrik jarak seperti *Euclidean Distance*, kemudian memperbarui posisi *centroid* hingga mencapai kondisi konvergen. Dalam implementasi manajemen pertanian presisi, pemanfaatan metode *K-Means* terbukti sangat efektif untuk memetakan dan mendelineasi zona pengelolaan tanah berdasarkan variabilitas parameter fisikokimia tanah seperti kandungan unsur hara (N, P, K), konduktivitas listrik (EC), dan tingkat keasaman (pH) tanah (Bougiouklis et al., 2025).

2.2.6 Algoritma Klasifikasi

Pemilihan algoritma yang tepat sangat menentukan akurasi klasifikasi kualitas tanah. Berikut adalah beberapa algoritma *machine learning* yang digunakan dalam penelitian ini untuk kasus klasifikasi data sensor.

a) Random Forest

Random Forest adalah algoritma *ensemble learning* yang beroperasi dengan membangun banyak pohon keputusan (*decision trees*) pada saat pelatihan. Algoritma ini dirancang untuk mampu menangkap interaksi non-linier antar variabel serta tangguh (*robust*) terhadap *outlier* dan *noise* dalam data, sehingga sangat cocok untuk memodelkan *dataset* lingkungan yang kompleks (Upadhyay, A. K. and Shah, S. R. 2025). Untuk tugas klasifikasi, *Random Forest* menggunakan mekanisme voting mayoritas, di mana kelas yang paling banyak dipilih oleh pohon-pohon keputusan individu akan ditetapkan sebagai hasil klasifikasi akhir sistem.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

b) Support Vector Machine (SVM)

Support Vector Machine (SVM) adalah metode *supervised learning* yang dapat digunakan untuk klasifikasi linier maupun non-linier. Algoritma ini bekerja dengan mencari *hyperplane* terbaik yang memisahkan data dengan margin maksimal antar kelas atau nilai (Setiyadi, D. et al. 2025) . Pada kasus data non-linier, SVM mengatasi masalah dengan menggunakan fungsi kernel untuk memetakan data ke dalam ruang fitur berdimensi lebih tinggi, sehingga pola yang kompleks dapat dipisahkan atau diklasifikasi dengan lebih akurat.

c) XGBoost

XGBoost adalah pengembangan tingkat lanjut dari metode *gradient boosting* yang dioptimalkan untuk kecepatan dan performa. Berbeda dengan *Random Forest* yang membangun pohon secara independen, *XGBoost* membangun pohon secara sekuensial di mana setiap pohon baru bertujuan untuk memperbaiki kesalahan (*error*) dari pohon sebelumnya. Algoritma ini dikenal memiliki akurasi tinggi pada data terstruktur dan kemampuan memodelkan hubungan non-linier yang rumit, serta efisien dalam menangani data dengan dimensi besar (Upadhyay, A. K. and Shah, S. R. 2025).

d) Neural Network

Neural Network (NN) adalah algoritma yang dirancang untuk meniru cara kerja otak manusia, terdiri dari jutaan unit pemrosesan kecil yang disebut neuron yang beroperasi secara paralel. Setiap neuron saling terhubung, menerima input dari kelompok neuron lain, memprosesnya, dan meneruskan output ke lapisan berikutnya (Setiyadi, D. et al. 2025). Kemampuan adaptif yang kuat dalam mengenali pola pada *dataset* yang besar dan kompleks menjadikan algoritma ini sangat andal untuk tugas klasifikasi yang membutuhkan akurasi tinggi.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.2.7 Evaluasi Model Klasifikasi

Untuk mengukur kinerja model kecerdasan buatan dalam mengklasifikasi kualitas tanah, diperlukan metrik evaluasi yang objektif. Berikut adalah metrik yang digunakan dalam penelitian ini.

a) Confusion Matrix

Confusion Matrix merupakan metode evaluasi fundamental yang memetakan performa model klasifikasi dengan cara membandingkan hasil klasifikasi sistem terhadap data aktual. Berdasarkan penelitian Setiyadi et al. (2025), matriks ini merepresentasikan distribusi kebenaran klasifikasi ke dalam empat kuadran utama yaitu *True Positive* (TP), *True Negative* (TN), *False Positive* (FP), dan *False Negative* (FN).

b) Akurasi (*Accuracy*)

Akurasi merupakan rasio klasifikasi yang benar terhadap keseluruhan data uji. Metrik ini merepresentasikan kemampuan model secara global dalam membedakan kelas status kesuburan tanah. Dalam penelitian serupa mengenai klasifikasi kebutuhan pupuk NPK, akurasi digunakan sebagai tolak ukur utama untuk menentukan keandalan model *Machine Learning* dalam memberikan rekomendasi yang tepat kepada petani (Hermawan et al., 2023).

$$Accuracy = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)} \dots (1)$$

c) Presisi (*Precision*)

Presisi mengukur tingkat ketepatan antara data yang diklasifikasi positif dengan data yang sebenarnya positif. Dalam konteks klasifikasi pertanian, nilai presisi yang tinggi sangat penting untuk memastikan bahwa tanah yang didiagnosis "Sangat Tinggi" oleh sistem benar-benar memiliki kualitas nutrisi yang baik, sehingga meminimalkan kesalahan rekomendasi pemupukan (Hermawan et al., 2023).



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

$$Precision = \frac{TP}{(TP + FP)} \dots (2)$$

d) Recall (*Sensitivity*)

Recall atau sensitivitas mengukur kemampuan model dalam mendeteksi kembali informasi yang relevan dari seluruh data aktual. Metrik ini menunjukkan seberapa baik sistem dalam mengidentifikasi seluruh sampel tanah yang memiliki masalah (misalnya kelas "Sangat Rendah") agar tidak ada kondisi kritis yang terlewat oleh sistem monitoring (Hermawan et al., 2023).

$$Recall = \frac{TP}{(TP + FN)} \dots (3)$$

e) F1-Score

f1-Score adalah rata-rata harmonik dari *Precision* dan *Recall*. Penggunaan *F1-Score* menjadi sangat krusial ketika *dataset* memiliki distribusi kelas yang tidak seimbang (*imbalanced dataset*), seperti jumlah sampel tanah kategori "Sangat Tinggi" yang jauh lebih sedikit dibandingkan kategori lainnya. Metrik ini memberikan gambaran kinerja model yang lebih objektif dan menyeluruh dibandingkan hanya mengandalkan akurasi semata (Hermawan et al., 2023).

$$F1 - Score = 2 * \frac{(Precision * Recall)}{(Precision + Recall)} \dots (4)$$

2.2.8 Cross-Validation

Cross-validation merupakan teknik evaluasi model yang menguji seluruh sampel data secara bergantian, sehingga menghasilkan estimasi performa yang lebih stabil. Penelitian ini menggunakan metode *Stratified K-Fold Cross-Validation* yang dirancang khusus untuk *dataset* dengan distribusi kelas yang tidak seimbang (*imbalanced class distribution*) (Prusty et al., 2022). Mekanisme stratifikasi ini memastikan proporsi setiap kelas dalam data latih dan data uji di tiap *fold* tetap representatif dan proporsional (Allen et al., 2021).



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Secara teknis, *dataset* dibagi menjadi K bagian (*fold*) yang sama besar. Pada setiap iterasi, satu *fold* digunakan sebagai data uji dan sisanya digabungkan sebagai data latih, lalu diulang sebanyak K kali. Hasil akhir dievaluasi berdasarkan rata-rata akurasi dengan formula:

$$\bar{A} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K A_i$$

di mana A_i adalah akurasi pada *fold* ke- i . Untuk menentukan model yang paling optimal, penelitian ini mengevaluasi performa dengan memvariasikan nilai K dari 5 hingga 10.

2.2.9 Evaluasi Kinerja *Edge Computing*

Dalam penerapan kecerdasan buatan pada perangkat bersumber daya terbatas (TinyML), evaluasi kinerja tidak hanya bergantung pada metrik akurasi statistik, tetapi juga pada efisiensi pemanfaatan sumber daya komputasi perangkat keras (Laiu et al., 2025). Metrik utama yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja pada *Edge Computing* meliputi:

a) Penggunaan Memori

Mengukur besaran ruang kapasitas penyimpanan yang dialokasikan untuk menanamkan struktur model AI ke dalam mikrokontroler (Rajić et al., 2024). Karena mikrokontroler (seperti ESP32) memiliki batas *heap memory* dan ruang penyimpanan *flash* yang sangat terbatas, ukuran model *Machine Learning* yang telah dikonversi (misalnya menggunakan pustaka *micromlgen* menjadi format C/C++) harus divalidasi agar cukup ringan dan tidak menyebabkan tumpukan memori penuh atau *Out-of-Memory* (Laiu et al., 2025)

b) Waktu Inferensi

Merupakan jeda waktu pemrosesan komputasi yang dibutuhkan oleh perangkat *edge* sejak menerima data masukan (*input*) dari sensor hingga sukses mengeksekusi algoritma dan menghasilkan label klasifikasi akhir (*output*) (Rajić et al., 2024).



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Semakin rendah angka latensi inferensi yang dihasilkan, semakin tangguh perangkat tersebut dalam beroperasi secara *real-time* dan mandiri di lapangan (Laiu et al., 2025)

2.2.10 Evaluasi Sistem dan Aplikasi *Mobile*

Untuk memastikan sistem integrasi data dari lahan pertanian dapat diterima dan divisualisasikan dengan akurat pada perangkat genggam pengguna, diperlukan evaluasi fungsionalitas perangkat lunak. Evaluasi ini berfokus pada dua aspek utama:

1. Pengujian *Black-Box* (*Black-Box Testing*)

Black-Box Testing adalah metode pengujian perangkat lunak yang mengevaluasi sistem dari sudut pandang eksternal tanpa melihat struktur internalnya. Metode ini sangat efektif digunakan untuk menguji ketepatan sistem dalam merespons masukan pengguna tanpa perlu mengetahui struktur teknis internal (Santika et al., 2025). Dalam konteks aplikasi ini, pengujian *Black-Box* bertujuan untuk memvalidasi apakah sistem memberikan respons yang konsisten, seperti menarik (*fetch*) data pemantauan dari *database* secara tepat, memperbarui status metrik, serta menangani skenario konektivitas buruk seperti sistem *caching* saat perangkat berstatus *offline* (Santika et al., 2025)

2. Latensi Transmisi dan Sinkronisasi Data

Mengevaluasi kinerja alur komunikasi jaringan menggunakan standar ukuran *Quality of Service* (QoS). Pada penerapan *Internet of Things* (IoT) di sektor pertanian, parameter QoS difokuskan pada ketahanan transmisi data dan pengukuran latensi jaringan. Latensi mengevaluasi jeda waktu yang dibutuhkan untuk mentransmisikan *payload* data dari *broker* MQTT hingga berhasil masuk ke *backend database* dan divisualisasikan pada layar aplikasi *mobile* (Rasyaad et al., 2025). Jaminan QoS dengan tingkat kehilangan paket data (*packet loss*) yang minim dan latensi yang rendah menjadi tolak



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ukur penting dalam sistem *monitoring* IoT, guna memastikan bahwa petani melihat pembaruan kondisi lahan secara *real-time* (Nugraha et al., 2026).

2.2.11 *Backend-as-a-Service (BaaS)* dan Supabase

Dalam arsitektur pengembangan sistem berbasis *Internet of Things* (IoT), tantangan terbesar sering kali terletak pada fleksibilitas pengelolaan data sensor dan komunikasi waktu nyata (*real-time*). *Backend-as-a-Service* (BaaS) hadir sebagai model infrastruktur komputasi awan yang menyediakan layanan *backend* siap pakai, seperti manajemen basis data, autentikasi, dan API (*Application Programming Interface*), sehingga pengembang dapat berfokus penuh pada logika antarmuka tanpa harus mengonfigurasi *server* secara manual dari nol (Rasyaad et al., 2025).

Supabase merupakan salah satu platform BaaS *open-source* berbasis PostgreSQL yang semakin banyak diimplementasikan sebagai alternatif sistem *backend* tradisional. Platform ini memiliki keunggulan integrasi *database* yang langsung menyediakan layanan API RESTful dan WebSockets secara otomatis. Kemampuan pembaruan data secara *real-time* dari Supabase sangat esensial dalam skenario monitoring sistem IoT, di mana perubahan nilai sensor dari lahan pertanian dapat langsung diproses dan disinkronisasikan ke perangkat antarmuka pengguna dalam hitungan milidetik dengan latensi yang sangat rendah (Nugraha et al., 2026).

2.2.12 *Progressive Web App (PWA)* dan Capacitor

Progressive Web App (PWA) adalah metode pengembangan perangkat lunak berbasis *web* yang dioptimalkan agar memiliki karakteristik, pengalaman pengguna, dan performa yang menyerupai aplikasi *native* pada perangkat seluler. PWA mengimplementasikan teknologi seperti *Service Workers* dan *Web App Manifest* yang memungkinkannya untuk melakukan integrasi yang responsif, mendukung sistem *caching* untuk akses data pada kondisi jaringan

tidak stabil (*offline mode*), serta dapat dipasang langsung ke layar utama (*home screen*) perangkat (Nugroho & Rosyidah, 2025).

Untuk memaksimalkan kapabilitas perangkat keras (seperti akses memori dan fitur *mobile* spesifik) pada pengembangan antarmuka monitoring, PWA dikolaborasikan dengan *cross-platform runtime* bernama Capacitor. Capacitor membungkus kode *web* modern yang dirancang menjadi bentuk aplikasi *native* sesungguhnya, baik untuk sistem operasi Android maupun iOS, menggunakan satu basis kode (*single codebase*). Kombinasi PWA dan Capacitor dalam sistem manajemen data IoT dapat meningkatkan fleksibilitas pengguna saat mengakses informasi di lapangan serta menekan beban komputasi perangkat klien (*client-side*), sehingga penarikan dan visualisasi data kondisi lahan menjadi lebih efisien (Kurniawan & Saputra, 2023).



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimental (*experimental research*). Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian ini berfokus pada pengukuran kinerja model kecerdasan buatan dalam mengklasifikasi kualitas tanah berdasarkan data numerik. Desain eksperimental diterapkan dengan memanipulasi parameter model *Machine Learning* dan data latih untuk melihat pengaruhnya terhadap akurasi klasifikasi.

Variabel yang digunakan dalam perancangan dan pengujian sistem ini ditentukan sebagai berikut:

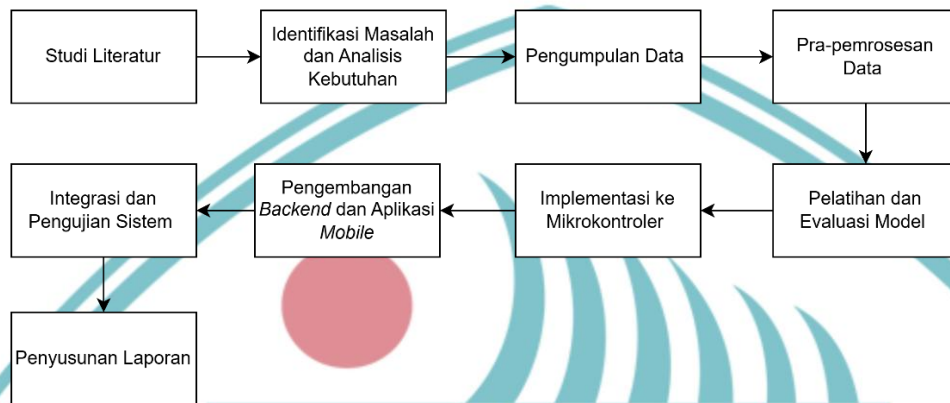
1. Variabel Bebas (*Independen*): Data masukan berupa parameter tanah yang dibaca oleh sensor, meliputi pH, kandungan nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), dan EC (*Electrical Conductivity*).
2. Variabel Terikat (*Dependen*): Label Status Kesuburan Tanah (Sangat Rendah, Rendah, Sedang, Tinggi, dan Sangat Tinggi).
3. Variabel Kontrol: Algoritma yang digunakan (*Random Forest*, SVM, XGBoost, *Neural Network*), nilai K pada metode Stratified K-Fold Cross-Validation ($K = 5$ hingga $K = 10$), serta lokasi pengambilan data primer pada lahan sawah padi.

Selain pendekatan eksperimental kuantitatif untuk pengujian model kecerdasan buatan, penelitian ini juga mengadopsi pendekatan rekayasa sistem terintegrasi. Hal ini diterapkan pada proses perancangan dan pembangunan arsitektur *backend* menggunakan Supabase serta pengembangan antarmuka aplikasi *mobile* menggunakan Capacitor PWA, sehingga keseluruhan sistem dapat beroperasi secara *end-to-end* dari sensor IoT hingga ke pengguna akhir.



3.2 Tahapan Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini mengacu pada tahapan sistematis yang terdiri dari serangkaian proses, mulai dari pengkajian literatur hingga penyusunan laporan akhir.



Gambar 3.1 Tahapan Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini mengacu pada tahapan sistematis yang terdiri dari sebagai berikut :

1. Studi Literatur: Mengkaji teori terkait algoritma *Machine Learning*, konsep *TinyML* untuk perangkat *edge*, serta parameter kualitas tanah.
2. Identifikasi Masalah dan Analisis Kebutuhan: Menganalisis kebutuhan petani dan data untuk pelatihan model serta spesifikasi *hardware* agar mampu menjalankan model AI secara *embedded*.
3. Pengumpulan Data (*Data Collection*): Mengakuisisi data primer dari sensor di lapangan dan data sekunder dari *dataset* publik (Kaggle).
4. Pra-pemrosesan Data (*Data Preprocessing*): Melakukan pembersihan data (*cleaning*), normalisasi, pelabelan data, dan pembagian data (*splitting*) menjadi data latih dan data uji.
5. Pelatihan dan Evaluasi Model (*Modeling & Evaluation*): Melatih model menggunakan algoritma terpilih dan mengevaluasi akurasi menggunakan *Confusion Matrix* (Akurasi, Presisi, *Recall*, dan *F1-Score*.)
6. Implementasi ke Mikrokontroler (*Deployment*): Mengonversi model yang telah dilatih ke format *Micromlgen* agar dapat dijalankan pada mikrokontroler ESP32.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

7. Pengembangan *Backend* dan Aplikasi *Mobile*: Membangun arsitektur *database* dan manajemen layanan *real-time* menggunakan platform Supabase, serta merancang antarmuka pengguna berbasis aplikasi *mobile cross-platform* menggunakan *framework* Capacitor PWA.
8. Integrasi dan Pengujian Sistem (*System Integration*): Mengintegrasikan seluruh komponen sistem, mulai dari pengiriman data pemantauan ESP32 melalui protokol komunikasi MQTT ke *server*, penyimpanan data di Supabase, hingga visualisasi hasil klasifikasi AI di aplikasi *mobile*.
9. Penyusunan Laporan: Mendokumentasikan seluruh proses dan hasil analisis klasifikasi ke dalam laporan skripsi.

3.3 Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah kualitas tanah yang direpresentasikan oleh parameter fisik dan kimia pada lahan pertanian padi. Lokasi penelitian dilaksanakan pada Kelompok Tani Famili Sejahtera yang berlokasi di Kampung Geger Bitung, Desa Cijeruk, Kecamatan Cijeruk, Kabupaten Bogor. Lokasi penelitian dipilih karena sistem monitoring IoT akan diimplementasikan pada lahan tersebut sehingga data hasil pengukuran dapat digunakan untuk menguji keandalan model klasifikasi secara langsung.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Kebutuhan Sistem

Pada tahap ini, dilakukan analisis terhadap kebutuhan utama dalam membangun model klasifikasi kecerdasan buatan, yang terbagi menjadi kebutuhan data sebagai bahan pelatihan (*training*) dan kebutuhan perangkat komputasi *edge* untuk tahap implementasi (*deployment*).

4.1.1 Analisis Kebutuhan Data

Kebutuhan data merupakan elemen paling krusial dalam pengembangan algoritma *Machine Learning*. Dalam penelitian ini, *dataset* yang digunakan untuk melatih dan menguji model diperoleh dari dua sumber utama

1. Data Primer merupakan data hasil pengukuran yang diakuisisi secara langsung menggunakan sistem monitoring IoT pada lahan pertanian padi milik Kelompok Tani Famili Sejahtera di Kampung Geger Bitung, Desa Cijeruk, Kabupaten Bogor. Total data primer yang berhasil dikumpulkan sebanyak 2.289 sampel dengan parameter: Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), pH, dan *Electrical Conductivity* (EC).
2. Data Sekunder merupakan *dataset* kualitas tanah yang diperoleh dari platform *Kaggle* dengan jumlah 880 sampel. *Dataset* ini memiliki fitur yang relevan meliputi N, P, K, pH, dan EC.
3. Fitur yang digunakan untuk melatih model terdiri dari parameter fisik dan kimia tanah, meliputi nilai pH, kandungan Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), dan *Electrical Conductivity* (EC).

4.1.2 Analisis Kebutuhan Fungsional

Kebutuhan fungsional mendefinisikan kapabilitas dan layanan yang harus mampu dilakukan oleh sistem perangkat lunak dan AI yang dibangun. Kebutuhan fungsional pada penelitian ini meliputi:

1. Model kecerdasan buatan harus mampu memproses kelima parameter tanah (pH, N, P, K, EC) untuk mengklasifikasikan status tingkat



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

kesuburan lahan ke dalam salah satu dari lima kelas yang telah ditentukan.

2. Model AI yang telah dilatih harus dapat diekspor dan dikonversi ukurannya agar kompatibel untuk dijalankan secara langsung pada mikrokontroler tanpa harus memproses data di server.
3. Platform *backend* (Supabase) harus mampu menerima, menyimpan data, serta menyediakan *Application Programming Interface* (API) untuk mendistribusikan historis data kualitas tanah secara *real-time*.
4. Aplikasi *mobile* yang dikembangkan harus mampu menarik data dari *backend* untuk memvisualisasikan kondisi tanah terkini, menampilkan hasil klasifikasi AI, serta menyajikan rekomendasi tindakan kepada pengguna.

4.1.3 Analisis Kebutuhan Non-Fungsional

Kebutuhan non-fungsional menitikberatkan pada aspek kualitas, batasan, dan kinerja operasional sistem perangkat lunak yang dibangun. Analisis kebutuhannya meliputi:

1. Kinerja Model AI (*Model Performance*): Model klasifikasi harus mencapai tingkat akurasi dan *F1-Score* yang tinggi, namun tetap memiliki kompleksitas yang ringan dan efisien agar tidak membebani memori terbatas pada perangkat *edge*.
2. Kecepatan Sinkronisasi (*Real-time Latency*): Komunikasi data antara basis data Supabase dengan aplikasi klien harus memiliki latensi yang serendah mungkin untuk memastikan petani melihat perubahan status tanah saat sensor membacanya di lahan.
3. Ketergunaan (*Usability*): Antarmuka aplikasi yang dibangun dengan *Progressive Web App* (PWA) harus adaptif (*responsive design*), memiliki ukuran unduhan yang ringan, dan mudah dioperasikan (intuitif) melalui perangkat seluler (*smartphone*) oleh pengguna akhir

4.1.4 Analisis Kebutuhan Perangkat Keras

Meskipun perancangan perangkat dan perakitan sensor tidak dibahas secara mendetail pada sub-judul ini, perangkat keras tetap dibutuhkan secara spesifik sebagai media untuk memproses data, menanamkan



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

(*deploy*) model kecerdasan buatan, serta untuk mengakses antarmuka pengguna. Rincian kebutuhan perangkat keras dijabarkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Kebutuhan Perangkat Keras

No	Perangkat Keras	Fungsi
1	Komputer / Laptop	Bertindak sebagai lingkungan komputasi utama untuk pra-pemrosesan <i>dataset</i> mentah, pelatihan (<i>training</i>) dan optimasi parameter algoritma AI, serta penulisan kode aplikasi <i>mobile</i> dan <i>backend</i> .
2	Alat Smart Farming	Merupakan integrasi perangkat keras yang berfungsi sebagai alat akuisisi data di lahan sekaligus <i>Edge Device</i> tempat berjalannya proses klasifikasi AI.
3	Perangkat Seluler (<i>Smartphone</i>)	Berfungsi sebagai <i>client device</i> (perangkat pengguna akhir) untuk menjalankan, menguji, dan mengakses antarmuka aplikasi PWA secara langsung.

4.1.5 Analisis Kebutuhan Perangkat Lunak

Perangkat lunak merupakan komponen utama dalam perancangan *software architecture* pada penelitian ini. Kebutuhan perangkat lunak membentang dari tahap pembuatan model AI hingga tahap *deployment* aplikasi, sebagaimana dirangkum pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Kebutuhan Perangkat Lunak

No	Perangkat Keras	Fungsi
1	Python	Bahasa pemrograman utama untuk membersihkan data, menjalankan pelabelan <i>K-Means</i> , dan melatih model komparasi klasifikasi (Random Forest, SVM, XGBoost, Neural Network).
2	Micromlgen	Pustaka (<i>library</i>) khusus yang bertugas menerjemahkan model klasifikasi AI dari ekosistem Python menjadi format bahasa C/C++ murni untuk mikrokontroler.
3	Supabase	Berperan sebagai layanan <i>Backend-as-a-Service</i> (BaaS) yang menyediakan infrastruktur basis data relasional PostgreSQL, manajemen API, dan sinkronisasi data <i>real-time</i> .
4	Capacitor PWA	<i>Framework</i> pengembangan perangkat lunak yang digunakan untuk membangun dan merancang antarmuka visual (UI/UX) aplikasi <i>mobile cross-platform</i> yang responsif.
5	Visual Studio Code & Arduino IDE	<i>Integrated Development Environment (IDE)</i> yang digunakan sebagai editor penulisan kode aplikasi <i>mobile</i> dan kompilasi <i>source code</i> ke dalam ESP32.



Hak Cipta :

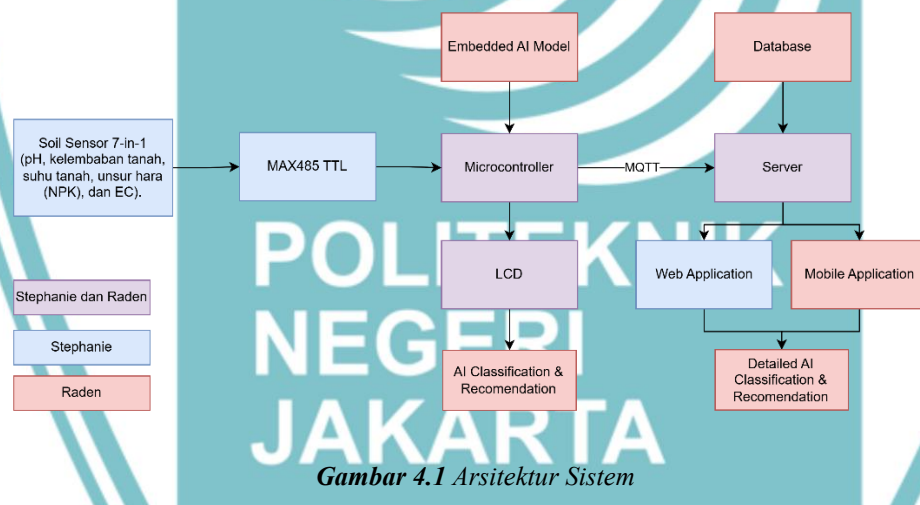
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.2 Perancangan Sistem

Perancangan sistem berfokus pada tahapan pengolahan data sensor menjadi model kecerdasan buatan (AI) yang dapat diimplementasikan ke dalam mikrokontroler (Edge Device).

4.2.1 Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem dirancang untuk menggambarkan hubungan antar komponen yang terlibat dalam proses monitoring dan klasifikasi kualitas tanah berbasis Internet of Things (IoT) dan kecerdasan buatan. Perancangan ini menunjukkan alur data mulai dari proses akuisisi data sensor, pemrosesan menggunakan model kecerdasan buatan pada perangkat edge, hingga penyimpanan dan visualisasi data melalui aplikasi mobile. Dengan adanya arsitektur sistem, setiap komponen dapat diintegrasikan secara terstruktur sehingga mampu mendukung proses monitoring kualitas tanah secara *real-time*.



Gambar 4.1 Arsitektur Sistem

Gambar 4.1 menunjukkan arsitektur sistem monitoring dan klasifikasi kualitas tanah berbasis *Internet of Things* (IoT) dan Kecerdasan Buatan yang telah di ditanamkan. Sistem menggunakan soil sensor 7-in-1 yang mampu mengukur beberapa parameter tanah dalam satu perangkat, meliputi pH tanah, kelembaban tanah, suhu tanah, unsur hara Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), serta *Electrical Conductivity* (EC). Sensor melakukan pengukuran secara langsung pada lahan pertanian dan menghasilkan data numerik yang merepresentasikan kondisi aktual tanah secara *real-time*.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Data hasil pembacaan sensor kemudian dikirimkan menuju mikrokontroler melalui modul komunikasi MAX485 TTL yang berfungsi sebagai konverter komunikasi RS485 ke TTL agar data dapat diproses oleh ESP32. Mikrokontroler berperan sebagai pusat pengolahan data sekaligus perangkat edge computing yang menjalankan *Embedded AI Model*. Pada tahap ini, data sensor diproses untuk melakukan klasifikasi kualitas tanah menggunakan model *Machine Learning* yang telah dikonversi ke dalam format C/C++ menggunakan library micromlgen agar kompatibel dengan perangkat mikrokontroler.

Selain melakukan monitoring parameter tanah, sistem juga mampu menghasilkan klasifikasi status kesuburan tanah serta rekomendasi tindakan pengelolaan lahan secara otomatis. Hasil klasifikasi tersebut ditampilkan secara lokal melalui layar LCD sehingga pengguna tetap dapat mengetahui kondisi tanah secara langsung tanpa harus membuka aplikasi atau bergantung pada koneksi internet. Sistem juga didukung oleh sumber daya baterai sehingga perangkat dapat dioperasikan secara portabel di area pertanian.

Selanjutnya, data pemantauan dan hasil klasifikasi AI dikirimkan ke *server* perantara menggunakan protokol komunikasi MQTT. Data tersebut kemudian diteruskan dan dikelola menggunakan platform *backend* Supabase, yang berfungsi sebagai *database* utama untuk kebutuhan penyimpanan riwayat data dan analisis lanjutan. Informasi kondisi tanah ini kemudian disajikan kepada pengguna melalui antarmuka aplikasi *mobile*. Aplikasi ini dikembangkan menggunakan *framework* Capacitor dengan pendekatan *Progressive Web App* (PWA) agar kinerja aplikasi tetap ringan, responsif, dan dapat diakses dari berbagai perangkat cerdas. Dengan adanya integrasi *backend* Supabase dan aplikasi PWA ini, pengguna dapat memantau lahan pertanian secara *real-time* dari jarak jauh, lengkap dengan fitur visualisasi klasifikasi dan rekomendasi untuk mendukung keputusan agrikultur.

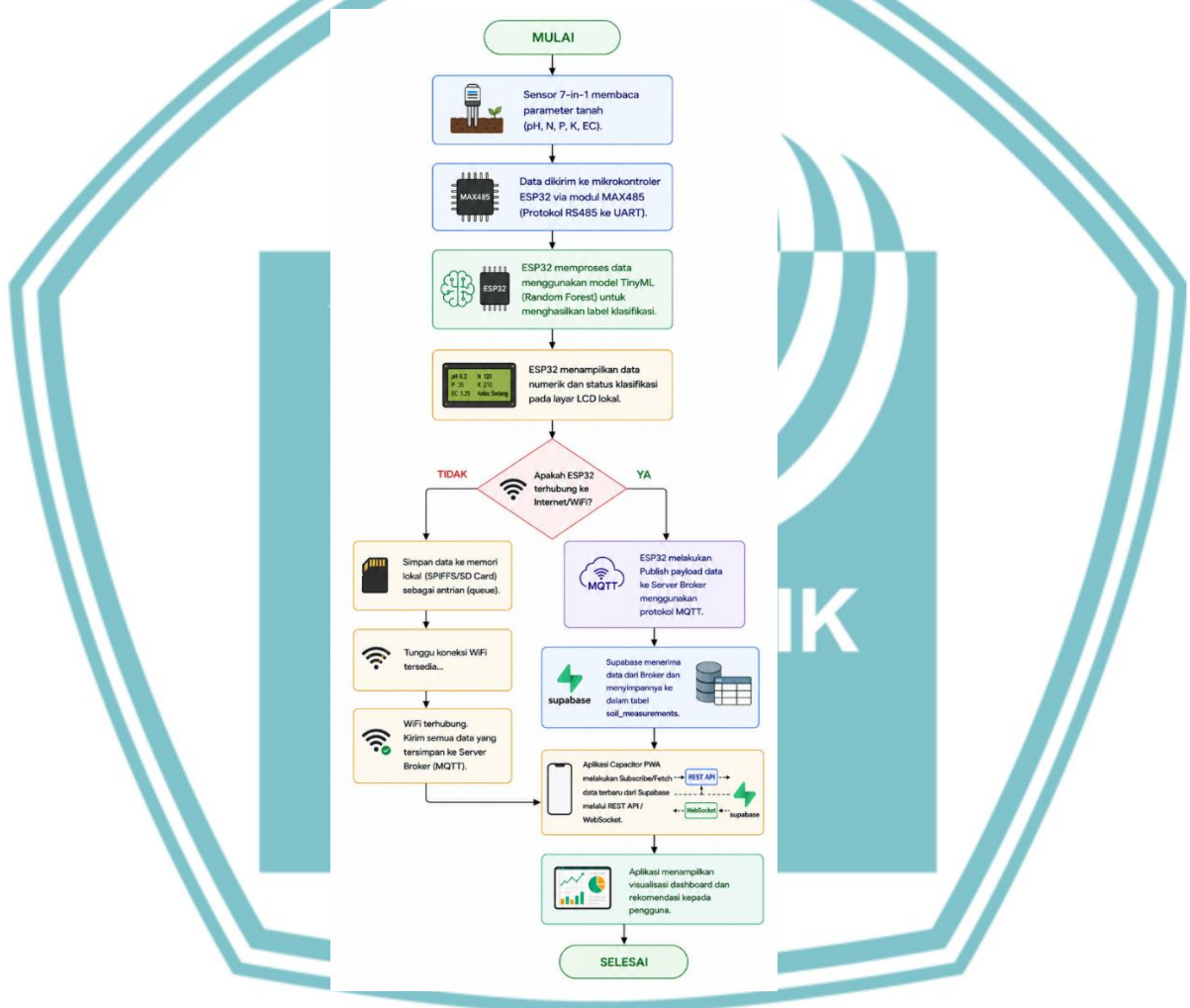


Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.2.2 Perancangan Alur Komunikasi Data

Selain perancangan arsitektur perangkat keras, diperlukan pemodelan alur komunikasi data (*Data Flow*) untuk mendeskripsikan secara spesifik bagaimana siklus informasi bergerak dari titik akuisisi di lahan pertanian hingga divisualisasikan kepada pengguna akhir. Perancangan alur ini juga memetakan protokol komunikasi jaringan yang menjembatani setiap *node* pada sistem, serta mekanisme penanganan kegagalan koneksi.



Gambar 4.2 Flowchart Alur Komunikasi Data

Berdasarkan diagram pada Gambar 4.2, siklus komunikasi data dimulai saat perangkat *soil sensor 7-in-1* melakukan akuisisi parameter fisikokimia tanah (pH, N, P, K, EC). Data mentah tersebut ditransmisikan menggunakan protokol komunikasi serial RS485, yang kemudian



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dikonversi menjadi sinyal serial UART melalui modul MAX485 agar dapat dibaca oleh mikrokontroler ESP32.

Di dalam ESP32, data masukan diproses secara langsung menggunakan model *Tiny Machine Learning* (berbasis algoritma *Random Forest*) untuk menghasilkan label klasifikasi tingkat kesuburan tanah. Hasil pemrosesan analitik ini secara simultan dicetak ke layar LCD lokal agar petani tetap dapat melakukan pemantauan di lahan (*on-site*), sekaligus dipersiapkan dalam bentuk *payload* untuk transmisi jaringan.

Selanjutnya, ESP32 melakukan pengecekan ketersediaan koneksi internet (WiFi). Pada tahap ini, sistem dirancang dengan dua skenario percabangan:

1. Skenario *Online* (WiFi Terhubung): Jika jaringan tersedia, ESP32 akan langsung melakukan metode *Publish payload* data menuju *Server Broker* menggunakan protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*).
2. Skenario *Offline* (Koneksi Terputus): Jika jaringan gagal terhubung, sistem tidak akan membuang data tersebut. Data akan disimpan sementara ke dalam memori lokal mikrokontroler (menggunakan sistem *file SPIFFS* atau modul *SD Card*) sebagai antrean (*queue*). Perangkat akan terus menunggu hingga koneksi WiFi kembali tersedia, lalu mengirimkan seluruh tumpukan data yang tersimpan tersebut ke *Server*. Skenario ini memastikan tidak ada riwayat data lahan yang hilang selama gangguan jaringan.

Setelah data berhasil dikirim, *broker* akan meneruskannya ke platform Supabase. Sistem *backend* Supabase kemudian menerima dan menyimpannya ke dalam tabel *soil_measurements*. Pada tahap akhir operasional, aplikasi Capacitor PWA di sisi pengguna (*client*) akan melakukan *Subscribe* atau *Fetch* data terbaru dari Supabase melalui protokol *REST API* atau *WebSocket*. Aplikasi kemudian memvisualisasikan data tersebut ke dalam bentuk *dashboard* interaktif dan menyajikan rekomendasi tindakan secara langsung di layar perangkat pengguna.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

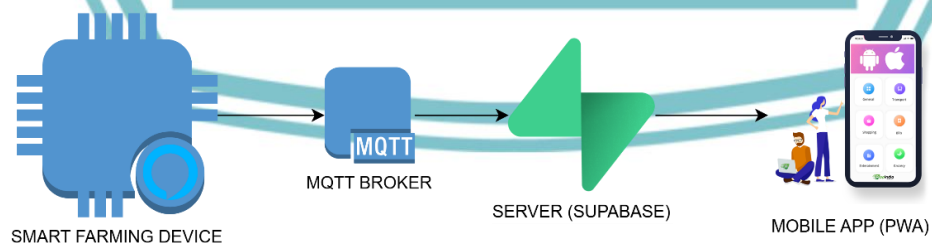
4.2.3 Perancangan Hardware

Perancangan perangkat keras bertujuan untuk membangun purwarupa alat *smart farming* yang berfungsi sebagai titik akuisisi data sekaligus perangkat pemrosesan AI lokal (*Edge Device*). Agar alat dapat dioperasikan secara portabel di area persawahan, perancangan komponen ini disusun sebagai berikut:

1. **Mikrokontroler ESP32:** Bertindak sebagai pusat pemrosesan data sekaligus perangkat *edge computing* yang menjalankan *Embedded AI Model*. ESP32 bertugas menerima data masukan dari sensor, mengeksekusi algoritma *Machine Learning* secara lokal (*on-device inference*), dan mempersiapkan *payload* data untuk dikirimkan ke *server*.
2. **Soil Sensor :** Sensor utama yang ditancapkan ke tanah untuk membaca parameter lingkungan secara bersamaan, yaitu derajat keasaman (pH), Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), dan *Electrical Conductivity* (EC).
3. **Layar LCD 20x4:** Diintegrasikan sebagai antarmuka visual lokal (*on-site display*) untuk menampilkan nilai metrik pembacaan sensor dan status klasifikasi AI secara *real-time*, sehingga petani dapat langsung melihat hasil diagnosis tanpa harus membuka aplikasi.

4.2.4 Perancangan Server

Perancangan server bertujuan untuk mengelola aliran data dari mikrokontroler di lahan pertanian agar dapat disimpan dengan aman dan didistribusikan ke antarmuka aplikasi pengguna secara *real-time*.



Gambar 4.3 Arsitektur Server

Berdasarkan Gambar 4.3, arsitektur peladen pada sistem ini dibangun menggunakan dua komponen jaringan utama yang saling terintegrasi, yaitu:



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1. Protokol MQTT dan IoT Platform: Berperan sebagai perantara komunikasi lalu lintas data dari perangkat keras. Saat mikrokontroler ESP32 terhubung ke jaringan internet (WiFi), perangkat tersebut bertindak sebagai *publisher* yang mengirimkan *payload* berisi hasil pembacaan sensor dan status klasifikasi AI menuju *Server Broker* menggunakan protokol komunikasi MQTT. Pada penelitian ini, layanan *broker* diimplementasikan menggunakan platform IoT ThingsBoard. Platform ini bertindak sebagai antarmuka visualisasi sekunder sekaligus jembatan integrasi yang akan meneruskan data ke basis data utama melalui mekanisme *Rule Engine*.

2. Backend-as-a-Service (Supabase): Bertindak sebagai *server backend* dan basis data utama pada sistem. Supabase dikonfigurasi untuk menerima aliran *payload* dari *broker* MQTT dan menyimpannya secara terstruktur ke dalam tabel relasional PostgreSQL. Selain sebagai penyimpan data (*database*), Supabase secara otomatis menyediakan layanan *Application Programming Interface* (API) berbasis *RESTful* dan *WebSocket*. Layanan API inilah yang memfasilitasi aplikasi klien (Capacitor PWA) untuk berlangganan (*subscribe*) dan menarik (*fetch*) pembaruan data kondisi lahan secara seketika (*real-time*) dengan tingkat latensi yang sangat rendah.

4.2.5 Alur Kerja Pengembangan Model AI dan Aplikasi

Pengembangan model kecerdasan buatan pada penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis mulai dari pengumpulan data hingga implementasi model pada perangkat mikrokontroler. Adapun alur kerja pengembangan model AI dijelaskan sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data (*Data Collection*): Tahap pertama dilakukan dengan mengumpulkan data dari dua sumber utama, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari hasil pembacaan *soil sensor 7-in-1* pada lahan pertanian padi, sedangkan data sekunder diperoleh dari dataset publik Kaggle. Parameter yang dikumpulkan meliputi pH tanah, Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), dan *Electrical Conductivity* (EC).



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2. Pembersihan Data (*Data Cleaning*): Setelah data terkumpul, dilakukan proses pembersihan data untuk memastikan kualitas dataset tetap baik. Tahap ini meliputi penghapusan *missing value*, data duplikat, serta deteksi dan penanganan *outlier*.
3. Pelabelan Data (*Data Labeling*): Data primer hasil pembacaan sensor belum memiliki label status kesuburan tanah. Oleh karena itu, dilakukan proses pelabelan otomatis menggunakan pendekatan *K-means Clustering* berdasarkan standar kualitas tanah dari Balittanah. Label yang digunakan terdiri dari lima kelas, yaitu Sangat Rendah, Rendah, Sedang, Tinggi, dan Sangat Tinggi.
4. Pra-pemrosesan Data (*Data Preprocessing*): Tahap pra-pemrosesan dilakukan untuk mempersiapkan dataset sebelum digunakan pada proses pelatihan model. Proses ini meliputi normalisasi data, serta pembagian dataset menjadi data latih dan data uji.
5. Pelatihan dan Komparasi Model (*Training & Comparison*): Pada tahap ini dilakukan pelatihan model menggunakan beberapa algoritma *Machine Learning*, yaitu *Random Forest*, *Support Vector Machine* (SVM), *XGBoost*, dan *Neural Network*. Setiap model dilatih menggunakan data training dan dibandingkan performanya.
6. *Hyperparameter Tuning*: Setelah model terbaik diperoleh, dilakukan optimasi parameter menggunakan metode *GridSearchCV*. Tahap ini bertujuan untuk meningkatkan performa model dengan mencari kombinasi parameter terbaik sesuai karakteristik dataset.
7. Evaluasi Model (*Model Evaluation*): Hasil pelatihan model dievaluasi menggunakan *confusion matrix* dengan metrik *accuracy*, *precision*, *recall*, dan *F1-score*. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi dan kemampuan model dalam mengklasifikasikan status kesuburan tanah secara tepat.
8. Ekspor Model: Model terbaik yang telah dioptimasi kemudian dikonversi menggunakan library *micromlgen* menjadi kode C/C++ agar dapat dijalankan pada mikrokontroler ESP32. Implementasi ini



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

memungkinkan proses inferensi AI dilakukan langsung pada perangkat edge tanpa ketergantungan terhadap *cloud computing*.

9. Integrasi *Backend* dan Antarmuka Aplikasi: Membangun layanan sinkronisasi *database* dengan Supabase dan mendesain antarmuka pemantauan pengguna akhir.

4.2.6 Perancangan Proses Pelabelan Data

Pada penelitian ini, data primer hasil pembacaan sensor IoT yang diperoleh dari lahan pertanian belum memiliki label status kesuburan tanah (*unlabeled data*). Oleh karena itu, diperlukan suatu mekanisme pelabelan data agar dataset dapat digunakan dalam proses pelatihan model *Machine Learning* untuk tahap klasifikasi.

Sistem pelabelan pada penelitian ini dirancang menggunakan algoritma *Unsupervised Learning*, yaitu *K-Means Clustering*. Meskipun proses pengelompokan dilakukan secara otomatis oleh algoritma berdasarkan pola sebaran data sensor, pembagian jumlah kluster ($K=5$) mengacu pada standar kualitas tanah dari Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk (Balittanah) yang membagi kesuburan menjadi 5 tingkatan (Sangat Rendah, Rendah, Sedang, Tinggi, dan Sangat Tinggi).

Pendekatan *clustering* ini dipilih karena kondisi kualitas tanah di lapangan bersifat dinamis dan pembacaan sensor portabel memiliki karakteristik variansi data (seperti pembacaan N-tersedia dalam ppm atau mg/kg) yang seringkali sulit jika dipetakan langsung menggunakan batas numerik kaku dari uji laboratorium konvensional. Melalui algoritma K-Means, sistem mampu mengelompokkan kelima variabel sensor (N, P, K, pH, dan EC) secara multivariat dan statistik, sehingga pembagian kelas kesuburan menjadi jauh lebih adaptif dan representatif terhadap kondisi tanah lokal. Sebagai bentuk validasi ilmiah terhadap penentuan batasan parameter yang digunakan pada sistem, penelitian ini didukung oleh hasil diskusi bersama pakar. Ringkasan hasil konsultasi mengenai analisis hara tanah bersama peneliti ahli dari Balai Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dapat dilihat secara detail pada Lampiran 2.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.2.7 Perancangan Algoritma Klasifikasi dan Rekomendasi Tindakan

Pada tahap perancangan, penelitian ini menggunakan empat algoritma Machine Learning, yaitu Random Forest, Support Vector Machine (SVM), XGBoost, dan Neural Network. Keempat algoritma tersebut digunakan untuk membandingkan performa klasifikasi terhadap dataset kualitas tanah yang telah diperoleh.

Sebelum proses pelatihan dilakukan, dataset terlebih dahulu dinormalisasi menggunakan StandardScaler untuk menyamakan rentang nilai antar fitur. Untuk memastikan validitas dan generalisasi model yang tidak bergantung pada satu partisi data tertentu, proses evaluasi dirancang menggunakan metode *Stratified K-Fold Cross-Validation*. Pemilihan rentang nilai K dari 5 hingga 10 didasarkan pada standar dalam pengujian *machine learning* yang dinilai paling optimal untuk menyeimbangkan varians dan bias. Berdasarkan total dataset bersih yang telah dilabeli sebanyak 677 sampel, variasi pengujian nilai K ini akan menyimulasikan rasio pembagian data latih dan data uji secara dinamis sebagai berikut:

1. $K = 5$ (*5-Fold Cross-Validation*) Membagi data menjadi 5 bagian, setara dengan rasio 80% data latih dan 20% data uji pada tiap iterasi.
2. $K = 6$ (*6-Fold Cross-Validation*) Membagi data menjadi 6 bagian, setara dengan rasio 83.3% data latih dan 16.7% data uji.
3. $K = 7$ (*7-Fold Cross-Validation*) Membagi data menjadi 7 bagian, setara dengan rasio 85.7% data latih dan 14.3% data uji
4. $K = 8$ (*8-Fold Cross-Validation*) Membagi data menjadi 8 bagian, setara dengan rasio 87.5% data latih dan 12.5% data uji.
5. $K = 9$ (*9-Fold Cross-Validation*) Membagi data menjadi 9 bagian, setara dengan rasio 88.8% data latih dan 11.2% data uji.
6. $K = 10$ (*10-Fold Cross-Validation*) Membagi data menjadi 10 bagian, setara dengan rasio 90% data latih dan 10% data uji pada tiap iterasi

Pemilihan rentang K tersebut bertujuan untuk menganalisis pengaruh jumlah *fold* terhadap kestabilan dan akurasi rata-rata model. Metode stratifikasi diterapkan untuk memastikan distribusi kelas yang



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

proporsional di setiap *fold*, mengingat dataset memiliki distribusi jumlah sampel yang tidak merata antar kelas kesuburan tanah.

Setelah seluruh model dievaluasi dengan seluruh variasi nilai K , dilakukan analisis komparatif untuk menentukan kombinasi model dan nilai K yang menghasilkan performa terbaik dan paling stabil. Model dengan kombinasi nilai K optimal selanjutnya digunakan sebagai acuan pada tahap hyperparameter tuning dan implementasi deployment ke perangkat ESP32 menggunakan pendekatan TinyML melalui library micromlgen.

Tabel 4.3 Rancangan Logika Rekomendasi Berbasis Defisiensi Nutrisi

Parameter	Kondisi Logika (Threshold)	Indikasi Agronomi	Rekomendasi Tindakan (Output Aplikasi)
Nitrogen (N)	Jika $N < 80\%$ dari Nilai Ideal	Defisiensi unsur makro Nitrogen	Tambah pupuk Urea atau Kompos.
Fosfor (P)	Jika $P < 80\%$ dari Nilai Ideal	Defisiensi unsur makro Fosfo	Tambah pupuk SP-36 atau <i>Rock Phosphate</i> .
Kalium (K)	Jika $K < 80\%$ dari Nilai Ideal	Defisiensi unsur makro Kalium	Tambah pupuk KCl atau Abu Kayu.
pH Tanah	Jika $pH < 5.5$	Tanah dalam kondisi Asam	Tambah Kapur Dolomit untuk menetralkan.
pH Tanah	Jika $pH > 7.5$	Tanah dalam kondisi Basa (Alkalin)	Tambah Belerang/Sulfur untuk menurunkan pH.

Berdasarkan tabel 4.3, sistem ini juga dirancang untuk memberikan informasi rekomendasi tindakan pengelolaan lahan yang kepada petani. Adapun parameter kondisi logika (*threshold*) dan indikasi agronomi pada tabel tersebut dirumuskan berdasarkan hasil konsultasi langsung dengan praktisi pertanian (petani), yang rincian datanya dapat dilihat pada bagian Lampiran 3. Mekanisme ini diimplementasikan menggunakan pendekatan Sistem Hibrida (Hybrid System), yaitu menggabungkan hasil prediksi kelas dari algoritma *Random Forest* dengan logika *Rule-Based System* berdasarkan ambang batas (*threshold*) defisiensi nutrisi.

4.2.8 Perancangan Database dan Antarmuka Aplikasi

Perancangan infrastruktur penyimpanan data pada penelitian ini menggunakan platform *Backend-as-a-Service* (BaaS) Supabase. Struktur basis data (*database*) dirancang menggunakan tabel relasional PostgreSQL



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

bernama `soil_measurements` untuk menyimpan riwayat pembacaan sensor dari lahan pertanian beserta hasil klasifikasi kecerdasan buatan.

Column	Data Type
id	int8
timestamp	timestamp
Hum	numeric
Temp	numeric
N	numeric
P	numeric
K	numeric
pH	numeric
EC	int4
ai_label	text
recommendation	text

Gambar 4.4 Rancangan Skema Database

Berdasarkan rancangan pada Gambar 4.4, tabel tersebut memiliki sebuah *Primary Key* (id) dengan tipe data `int8`, serta kolom `timestamp` untuk mencatat stempel waktu secara otomatis saat data masuk. Selain itu, terdapat kolom bertipe numerik untuk menyimpan nilai pembacaan dari perangkat *soil sensor 7-in-1*, yaitu kelembaban (Hum), suhu (Temp), Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), derajat keasaman (pH), dan konduktivitas listrik (EC). Tabel ini juga dilengkapi dengan kolom bertipe teks (text) untuk menyimpan keluaran dari model AI, yaitu `ai_label` untuk menyimpan kelas kesuburan, dan `recommendation` untuk menyimpan rekomendasi tindakan agrikultur.

Alur masuknya data ke dalam struktur tabel tersebut dirancang memanfaatkan protokol komunikasi MQTT yang diteruskan secara langsung ke antarmuka pemrograman aplikasi (API) Supabase agar

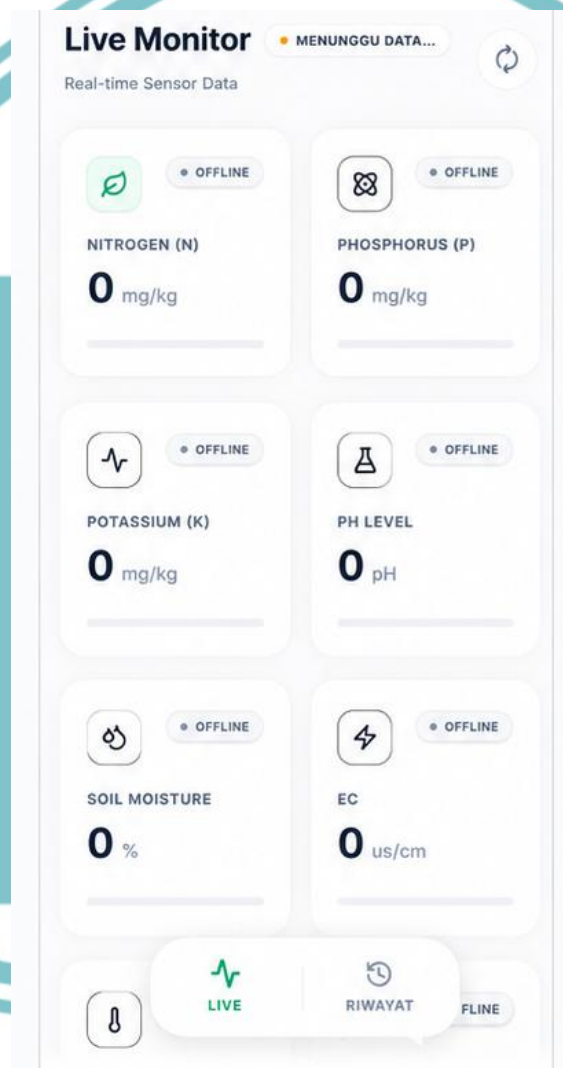


© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

pembaruan dan pencatatan data riwayat lahan dapat terjadi secara seketika (*real-time*). Di sisi pengguna (*client-side*), perancangan antarmuka berfokus pada pengembangan aplikasi *mobile* menggunakan *framework* Capacitor dengan pendekatan *Progressive Web App* (PWA). Desain antarmuka dirancang dengan mengutamakan kemudahan penggunaan (*pengguna-friendly*) dan tata letak yang responsif menyesuaikan ukuran layar perangkat pengguna.



Gambar 4.5 Rancangan Antarmuka Pengguna Aplikasi Mobile

Berdasarkan rancangan antarmuka pada Gambar 4.5, halaman utama aplikasi menampilkan menu *Live Monitor* yang berfungsi sebagai *dashboard* pemantauan *real-time*. Halaman ini menyajikan informasi dalam bentuk *grid* yang memuat kartu-kartu metrik (*cards*) untuk memvisualisasikan parameter aktual dari *soil sensor*, yang meliputi nilai



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

kandungan Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), derajat keasaman (pH), kelembaban tanah (*Soil Moisture*), nilai *Electrical Conductivity* (EC), serta suhu tanah.

Desain ini juga dilengkapi dengan indikator status koneksi (seperti keterangan *Offline* atau Menunggu Data) pada masing-masing kartu untuk memastikan pengguna senantiasa mengetahui keaktifan transmisi sensor dari lahan. Selain itu, terdapat menu navigasi melayang (*floating navigation bar*) di bagian bawah layar yang memungkinkan pengguna untuk berpindah secara cepat antara menu pemantauan langsung (*Live*) dan menu data historis (*Riwayat*). Menu riwayat ini nantinya dirancang untuk menampilkan detail klasifikasi tingkat kesuburan dari algoritma kecerdasan buatan secara utuh beserta panduan rekomendasi tindakan agrikultur yang sesuai.

4.3 Implementasi Sistem

Tahap implementasi sistem dilakukan setelah seluruh proses perancangan selesai. Pada tahap ini, rancangan sistem direalisasikan ke dalam bentuk nyata, meliputi proses pengumpulan data sensor, pra-pemrosesan dataset, pelatihan model *Machine Learning*, implementasi model AI pada perangkat ESP32, hingga peluncuran aplikasi *mobile*. Seluruh tahapan implementasi ini dilakukan untuk memastikan sistem terintegrasi mampu melakukan monitoring dan klasifikasi kualitas tanah secara *real-time*.

4.3.1 Implementasi Hardware

Implementasi perangkat keras melibatkan perakitan purwarupa alat *smart farming* yang berfungsi sebagai titik akuisisi data sekaligus perangkat pemrosesan AI lokal (*Edge Device*). Komponen utama yang diintegrasikan di dalam purwarupa ini meliputi mikrokontroler ESP32, *soil sensor* 7-in-1, dan layar LCD 20x4. Sensor tanah dihubungkan dan data dapat diproses oleh ESP32.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4.6 Implementasi Hardware pada Lahan Pertanian

Keseluruhan sistem didukung oleh sumber daya baterai sehingga perangkat dapat dioperasikan secara portabel untuk membaca parameter derajat keasaman (pH), Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), dan *Electrical Conductivity* (EC) langsung di lahan pertanian. Agar mudah digunakan di lapangan, komponen-komponen tersebut dikemas ke dalam *casing* genggam portabel yang dilengkapi dengan saklar daya (*power switch*) serta layar antarmuka di bagian depannya. Pengguna cukup menancapkan *probe* kabel sensor secara langsung ke dalam lumpur tanah persawahan, kemudian perangkat akan membaca kondisi tanah secara aktual dan memvisualisasikan data pemantauan tersebut secara langsung pada layar LCD.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumpulkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.3.2 Implementasi Pengumpulan Data

Implementasi pengumpulan data dilakukan menggunakan perangkat *Smart Farming*. Sensor digunakan untuk membaca parameter kualitas tanah secara langsung pada lahan pertanian. Proses pengambilan data dilakukan secara berkala sehingga menghasilkan data historis yang dapat digunakan untuk proses pelatihan model Machine Learning. Selama proses implementasi, sistem berhasil mengumpulkan sebanyak 2.289 sampel data.



Gambar 4.7 Proses Pengumpulan Data

Gambar 4.7 menunjukkan proses implementasi pengambilan data menggunakan perangkat monitoring tanah berbasis IoT di lahan pertanian. Hasil pembacaan sensor yang diperoleh dari perangkat kemudian disimpan dalam bentuk dataset mentah (raw data) seperti pada Tabel 4.4. Dataset tersebut berisi parameter hasil monitoring tanah yang nantinya digunakan pada tahap preprocessing dan pelatihan model klasifikasi.

Tabel 4.4 Contoh Raw Data Hasil Pembacaan Sensor Tanah

pH	N	P	K	EC
6.5	292	721	718	1584
6	101	281	275	672
5.4	40	138	131	376
6.2	45	150	143	401

Data mentah yang telah berhasil dikumpulkan kemudian digunakan pada tahap pra-pemrosesan data untuk dilakukan pembersihan data,



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

normalisasi, serta pembagian dataset training dan testing sebelum digunakan pada proses pelatihan model Machine Learning.

4.3.3 Implementasi Pra-pemrosesan Data

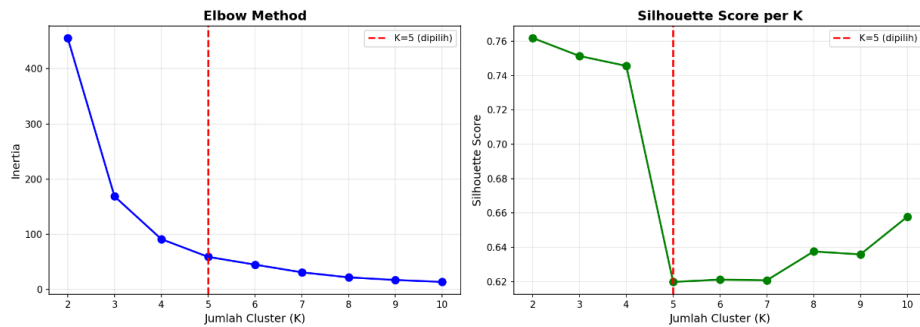
Tahap pra-pemrosesan data bertujuan untuk meningkatkan kualitas dataset mentah agar dapat dipelajari secara optimal oleh algoritma *Machine Learning*. Proses ini dieksekusi menggunakan bahasa pemrograman Python dengan memanfaatkan dukungan pustaka *Pandas*, *NumPy*, dan *Scikit-Learn*.

Data mentah yang diperoleh dari sensor melalui tahapan pembersihan meliputi penghapusan kolom *metadata* yang tidak relevan, penanganan nilai yang hilang (*missing value*), dan pembersihan data anomali (*outlier*). Setelah proses pembersihan, diperoleh dataset akhir yang valid sebanyak 677 sampel data. Penyusutan jumlah sampel dari 2.289 menjadi 677 data bersih ini merupakan prosedur reduksi karena sistem sensor melakukan perekaman secara kontinu setiap 15 detik, dihasilkan ribuan baris data duplikat dengan nilai metrik yang persis sama selama kondisi tanah belum mengalami perubahan nyata. Penghapusan duplikasi data (*deduplication*) secara masif ini dilakukan untuk mencegah model *Machine Learning* mengalami *overfitting* akibat mempelajari sampel yang berulang dan redundan. Karena data primer tersebut belum memiliki label kesuburan, dilakukan proses pelabelan otomatis (*auto-labeling*) menggunakan pendekatan *Unsupervised Learning* yaitu K-Means Clustering. Penentuan jumlah kelompok (klaster) optimal (K) tidak dilakukan secara acak, melainkan dibuktikan secara matematis menggunakan dua metrik evaluasi, yaitu Metode *Elbow* dan *Silhouette Score*. Metode *Elbow* bekerja dengan mengevaluasi nilai *Within-Cluster Sum of Squares* (WCSS) atau inersia, yakni total jarak kuadrat antara setiap titik data dengan pusat klasternya (*centroid*). Sementara itu, *Silhouette Score* digunakan untuk mengukur kualitas klasterisasi berdasarkan seberapa kohesif suatu objek di dalam klasternya sendiri dibandingkan dengan seberapa terpisah objek tersebut dari klaster tetangga (*separasi*), di mana rentang nilai bergerak dari -1 hingga 1.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4.8 Grafik Elbow dan Silhouette Score pada Algoritma K-Means

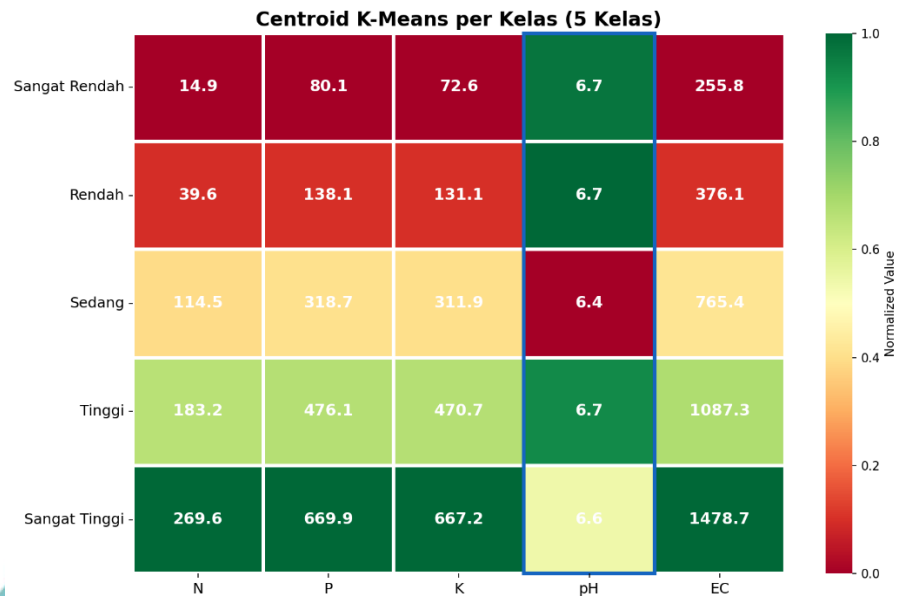
Berdasarkan visualisasi grafik Metode *Elbow* pada Gambar 4.8, terlihat bahwa penurunan inersia yang sangat tajam terjadi pada rentang $K=2$ hingga $K=4$, kemudian grafik mulai mengalami patahan atau melandai (*leveling off*) membentuk pola siku tepat pada titik $K=5$. Melandainya grafik ini mengindikasikan bahwa penambahan jumlah kluster lebih dari 5 tidak lagi memberikan pengurangan varians (peningkatan kerapatan data) yang signifikan bagi model.

Selanjutnya, pada evaluasi metrik *Silhouette Score*, meskipun nilai tertinggi secara matematis berada pada $K=2$ dan $K=3$, pembagian menjadi dua atau tiga kluster tidak merepresentasikan klasifikasi tanah secara riil. Pada titik $K=5$, model masih menghasilkan nilai *Silhouette Score* yang berada pada rentang positif dan memadai (berkisar di angka 0,62). Nilai tersebut menandakan bahwa struktur kluster masih terpisah dengan cukup baik dan tidak tumpang tindih secara fatal. Oleh karena itu, pemilihan $K=5$ ditetapkan sebagai jumlah kluster yang paling optimal karena didukung oleh titik siku pada metode *Elbow*, skor *Silhouette* yang valid, serta selaras secara domain agrikultur dengan pedoman standar acuan Balittanah yang membagi tingkat kesuburan tanah tepat ke dalam 5 tingkatan kelas.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



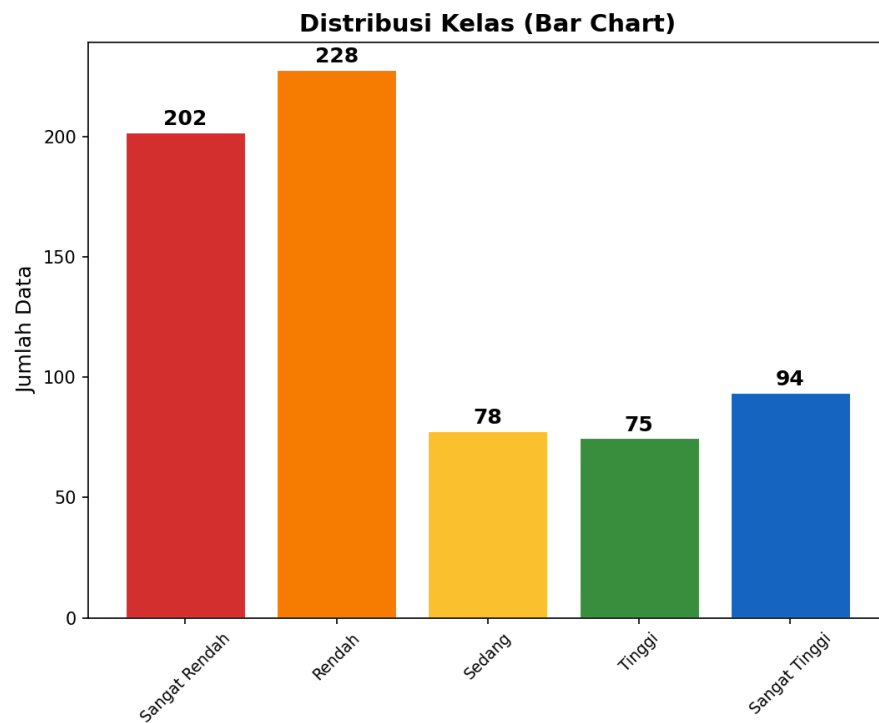
Gambar 4.9 Heatmap Centroid Parameter Kualitas Tanah

Berdasarkan Heatmap Centroid pada Gambar 4.9, setiap kluster merepresentasikan karakteristik parameter tanah yang spesifik. Hal ini membuktikan bahwa konversi pembacaan sensor ke standar acuan dapat dipetakan secara terstruktur ke dalam lima tingkatan kelas kesuburan. Pada parameter (N, P, K) dan konduktivitas listrik (EC), terlihat adanya pola kenaikan nilai yang linier; semakin tinggi kelas kesuburan tanah, semakin tinggi pula nilai rata-rata (centroid) pada parameter tersebut. Sebaliknya, kondisi yang cenderung konstan dan saling tumpang tindih (overlap) terjadi pada parameter pH. Sebaran nilai pH berfluktuasi tipis di rentang angka 6.4 hingga 6.7 pada seluruh kelas. Sebagai contoh, rata-rata nilai pH sebesar 6.7 muncul secara bersamaan di kelas 'Sangat Rendah', 'Rendah', dan 'Tinggi'. Karena nilai pH pada seluruh dataset cenderung seragam dan telah berada di dalam rentang ideal (6.0 - 7.0), parameter ini gagal memberikan variansi yang cukup untuk memisahkan antar kelas kesuburan. Fenomena ini sekaligus menjadi justifikasi matematis mengapa pH pada akhirnya memiliki feature importance yang paling rendah bagi model klasifikasi.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4.10 Distribusi Kelas Kesuburan Tanah

Setelah proses pelabelan selesai, distribusi jumlah sampel pada masing-masing kelas divisualisasikan pada Gambar 4.10. Pada tahap akhir pra-pemrosesan, seluruh fitur numerik dinormalisasi menggunakan *StandardScaler* dan *dataset* dipecah ke dalam proporsi *training* dan *testing data* sebelum dimasukkan ke dalam algoritma klasifikasi.

4.3.4 Implementasi Pelatihan dan Komparasi Model

Setelah *dataset* siap dan telah memiliki label kelas kesuburan yang tervalidasi, tahap selanjutnya adalah implementasi pelatihan model (*model training*). Proses pelatihan ini dilakukan secara komparatif menggunakan empat algoritma *Supervised Machine Learning*, yaitu *Random Forest*, *Support Vector Machine* (SVM), *XGBoost*, dan *Neural Network*.

Untuk memastikan model memiliki tingkat generalisasi yang baik dan estimasi performa yang tidak bias terhadap satu partisi data tertentu, proses evaluasi dilakukan menggunakan metode *Stratified K-Fold Cross-Validation*. Eksperimen dilakukan dengan memvariasikan nilai *K* dari 5 hingga 10 untuk mengetahui pengaruh jumlah *fold* terhadap stabilitas model. Berdasarkan hasil pengujian menyeluruh konfigurasi *6-Fold*



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Cross-Validation terbukti memberikan tingkat kestabilan (standar deviasi) dan akurasi rata-rata yang paling optimal. Data hasil perbandingan performa secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 4.

Tabel 4.5 Perbandingan Performa Algoritma pada 6-Fold Cross-Validation

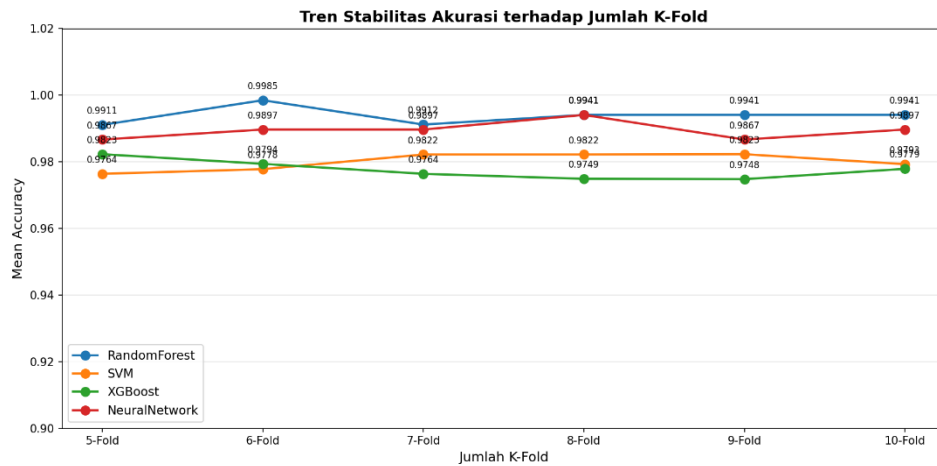
Model	Mean Accuracy	Std Accuracy	Mean Precision	Mean Recall
Random Forest	0,9985	$\pm 0,0033$	0,9986	0,9985
Neural Network	0,9897	$\pm 0,0094$	0,9904	0,9897
XGBoost	0,9794	$\pm 0,0196$	0,9808	0,9794
SVM	0,9778	$\pm 0,0151$	0,9787	0,9778

Berdasarkan Tabel 4.5, dapat diamati bahwa algoritma *Random Forest* mendominasi performa dengan akurasi nyaris sempurna sebesar 0,9985 (99,85%) dan tingkat fluktuasi (standar deviasi) yang sangat rendah yaitu $\pm 0,0033$. Tingginya pencapaian akurasi sebesar 99,85% pada model *Random Forest* telah melalui proses validasi untuk mencegah terjadinya *overfitting*. Dari segi ukuran dataset, model dilatih menggunakan 677 sampel unik yang telah dibersihkan dari duplikasi. Hal ini memastikan model tidak melakukan hafalan terhadap data yang redundan. Selanjutnya, untuk menangani potensi bias akibat distribusi kelas kesuburan yang tidak seimbang, penelitian ini mengimplementasikan metode *Stratified 6-Fold Cross-Validation*. Mekanisme stratifikasi ini menjaga agar setiap partisi data latih dan data uji memiliki rasio proporsi kelas yang adil dan representatif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa performa model tetap stabil dan mampu mengklasifikasi *unseen data* (data uji baru) dengan sangat akurat tanpa menghafal pola pelatihan. Ketangguhan ini dibuktikan lebih lanjut melalui metrik evaluasi *Confusion Matrix* pada Gambar 4.12, di mana dari keseluruhan 677 sampel yang diuji, model hanya melakukan 1 (satu) kesalahan prediksi sehingga menghasilkan nilai rata-rata *F1-Score* sebesar 0,9985. Seluruh model menunjukkan akurasi rata-rata di atas 0,97, yang mengindikasikan bahwa dataset yang telah melalui proses pra-pemrosesan dan pelabelan berbasis *K-Means Clustering* memiliki kualitas yang sangat baik untuk digunakan dalam klasifikasi.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



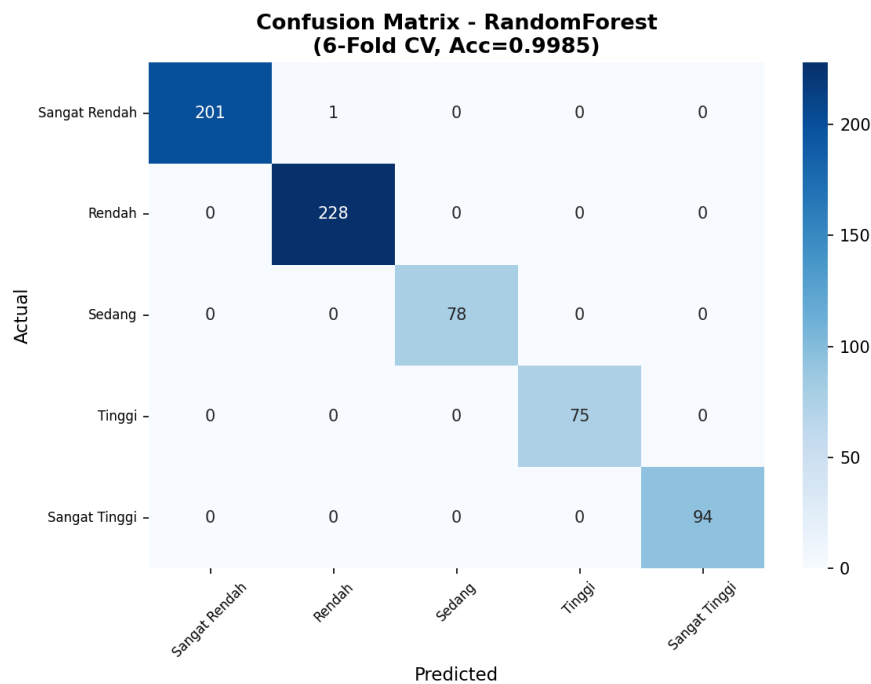
Gambar 4.11 Tren Stabilitas Akurasi

Visualisasi grafik garis pada Gambar 4.11 memperlihatkan pergerakan nilai rata-rata akurasi (*Mean Accuracy*) dari keempat algoritma ketika jumlah partisi data (*K*) diubah-ubah. Pergerakan garis yang cenderung datar dan minim fluktuasi mengindikasikan bahwa model tersebut stabil dan tidak sensitif terhadap variasi pemisahan data uji dan data latih. Dari grafik tersebut, terlihat jelas bahwa algoritma Random Forest (garis biru) tidak hanya konsisten menempati posisi teratas di setiap konfigurasi *fold*, tetapi juga berhasil mencapai titik puncak performa tertingginya pada 6-Fold dengan akurasi 0,9985. Sementara itu, Neural Network (garis merah) membayangi di posisi kedua dengan pergerakan yang juga cukup stabil di kisaran 0,98 hingga 0,99. Sebaliknya, algoritma XGBoost (garis hijau) justru menunjukkan tren penurunan akurasi seiring bertambahnya jumlah *K*, yang menandakan model tersebut lebih rentan terhadap variasi data pada dataset ini. Di sisi lain, SVM (garis oranye) tampak cukup stabil namun rata-rata akurasinya persisten berada di rentang yang lebih rendah dibandingkan *Random Forest* dan *Neural Network*.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4.12 *Confusion Matrix Model Random Forest*

Berdasarkan *Confusion Matrix* pada Gambar 4.12, model *Random Forest* dengan konfigurasi *6-Fold Cross-Validation* terbukti mampu mengklasifikasikan seluruh kelas kesuburan tanah dengan tingkat ketepatan yang sangat tinggi. Dari total 676 sampel data yang diuji secara agregat pada seluruh *fold*, model hanya melakukan 1 (satu) kesalahan prediksi, yaitu 1 sampel kelas Sangat Rendah yang diprediksi sebagai Rendah. Keempat kelas lainnya (Rendah: 228, Sedang: 78, Tinggi: 75, dan Sangat Tinggi: 94 sampel) berhasil diklasifikasikan dengan akurasi sempurna (100%). Hal ini membuktikan bahwa model *Random Forest* sangat tangguh (*robust*) dalam mempelajari pola data sensor yang kompleks dan memiliki kemampuan generalisasi yang sangat baik terhadap data yang belum pernah dikenali sebelumnya. Sementara itu, visualisasi *Confusion Matrix* yang mendetail untuk mengamati distribusi kesalahan prediksi pada algoritma pembanding lainnya, yaitu *Support Vector Machine* (SVM), *XGBoost*, dan *Neural Network*, dapat dilihat selengkapnya pada Lampiran 6.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.3.5 Implementasi *Hyperparameter Tuning*

Algoritma *Random Forest* telah menunjukkan performa terbaik pada tahap komparasi awal menggunakan *Stratified K-Fold Cross-Validation* (K=6) dengan akurasi rata-rata mencapai 0,9985. Meskipun hasil tersebut sudah sangat tinggi, implementasi *Hyperparameter Tuning* tetap dilakukan dengan tujuan yang berfokus pada efisiensi model untuk *deployment* ke mikrokontroler ESP32, bukan semata-mata peningkatan akurasi. Proses *tuning* bertujuan untuk menyederhanakan arsitektur model agar lebih ringan saat ditanamkan pada perangkat *edge*, serta menemukan konfigurasi parameter yang paling optimal secara menyeluruh.

Tabel 4.6 Parameter Terbaik Hasil *GridSearchCV* (*Stratified 6-Fold CV*)

Parameter	Nilai yang Diuji	Nilai Optimal
n_estimators	10, 20, 30, 40, 50	20
max_depth	None, 5, 10, 15, 20	10
max_features	sqrt, log2	sqrt
min_samples_split	2, 5, 10	5
min_samples_leaf	1, 2, 4	2

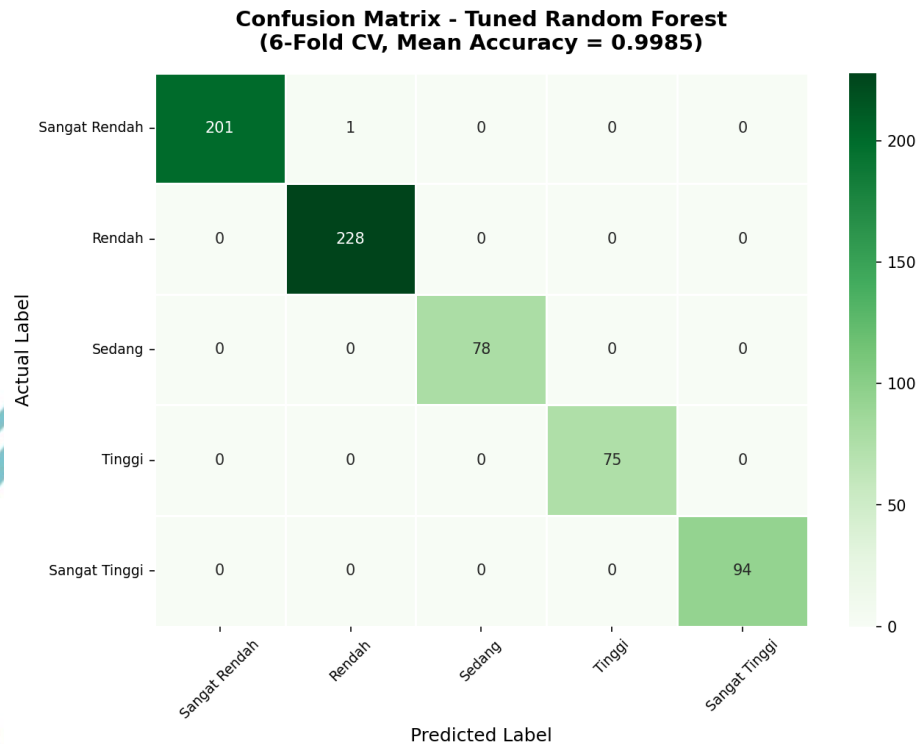
Berdasarkan hasil *GridSearchCV* pada tabel 4.6, kombinasi parameter terbaik diperoleh pada nilai n_estimators = 20, max_depth = 10, max_features = sqrt, min_samples_split = 5, dan min_samples_leaf = 2. Nilai n_estimators yang relatif kecil menunjukkan bahwa model tidak memerlukan jumlah pohon yang terlalu banyak untuk mencapai performa optimal, sehingga waktu pelatihan dan kebutuhan memori dapat dikurangi. Penggunaan max_depth = 10 membatasi kedalaman pohon keputusan sehingga membantu mencegah *overfitting* sekaligus menjaga kemampuan generalisasi model. Sementara itu, nilai min_samples_split = 5 dan min_samples_leaf = 2 menghasilkan pembentukan node yang lebih stabil dengan mengurangi percabangan yang terlalu spesifik terhadap data pelatihan. Parameter max_features = sqrt memungkinkan setiap pohon menggunakan subset fitur yang berbeda, sehingga meningkatkan keragaman antar pohon dan memperkuat kemampuan prediksi model secara keseluruhan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi yang lebih sederhana mampu mempertahankan performa klasifikasi yang sangat



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

tinggi. Dengan demikian, model menjadi lebih efisien dan lebih sesuai untuk diimplementasikan pada perangkat *edge* berbasis ESP32 yang memiliki keterbatasan sumber daya komputasi dan memori.



Gambar 4.13 Confusion Matrix Model Random Forest Setelah Tuning

Berdasarkan Confusion Matrix pada Gambar 4.13, model Random Forest yang telah dioptimasi berhasil mempertahankan performa yang sangat tinggi pada evaluasi *Stratified 6-Fold Cross-Validation*, dengan akurasi rata-rata sebesar 0,9985 (99,85%) dan standar deviasi $\pm 0,0033$. Hasil ini identik dengan performa model sebelum tuning (default), yang menunjukkan bahwa pengurangan kompleksitas model secara signifikan dari 100 pohon menjadi 20 pohon dengan batasan kedalaman maksimal 10 sama sekali tidak mengorbankan kemampuan model dalam mengenali pola data. Keberhasilan mempertahankan tingkat akurasi ini merupakan pencapaian optimal karena tujuan utama dari implementasi tuning pada penelitian ini adalah efisiensi memori perangkat keras. Untuk memberikan penjabaran yang lebih komprehensif, evaluasi performa model diukur lebih lanjut menggunakan metrik *Precision*, *Recall*, dan *F1-Score*.

Tabel 4.7 Hasil Evaluasi Tuned Random Forest

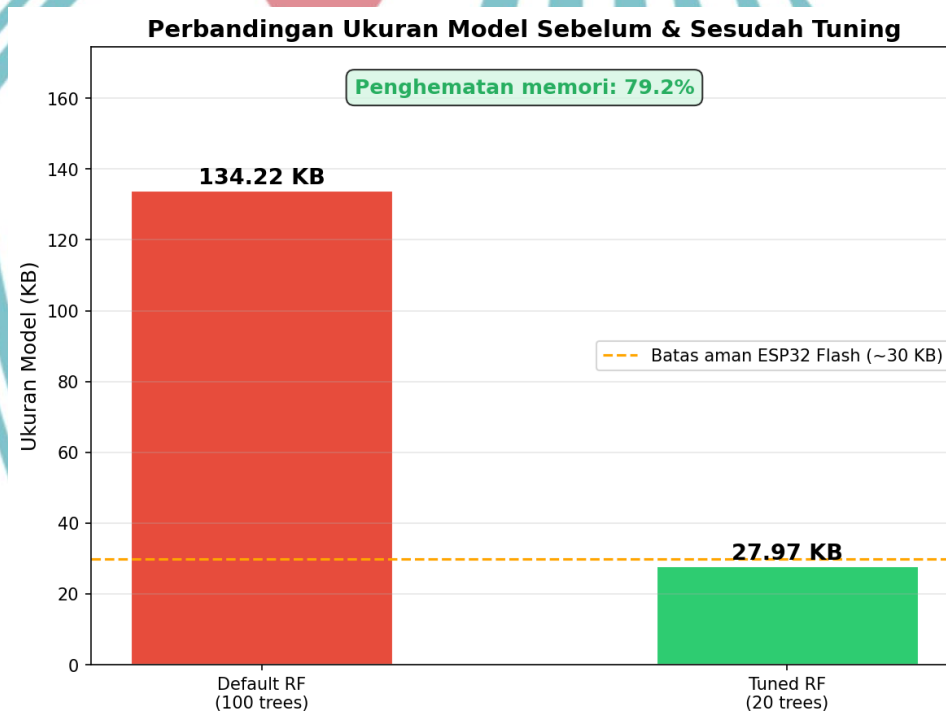


Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Kelas	Precision	Recall	F1-Score	Jumlah Sampel
Sangat Rendah	1,0000	0,9950	0,9975	202
Rendah	0,9956	1,0000	0,9978	228
Sedang	1,0000	1,0000	1,0000	78
Tinggi	1,0000	1,0000	1,0000	75
Sangat Tinggi	1,0000	1,0000	1,0000	94
Rata-rata	0,9986	0,9985	0,9985	677

Berdasarkan Tabel 4.7, model Tuned Random Forest berhasil mengklasifikasikan hampir seluruh 677 sampel dengan sangat baik. Hanya terdapat 1 kesalahan prediksi (sampel Sangat Rendah diprediksi sebagai Rendah), yang menghasilkan nilai agregat F1-Score sebesar 0,9985. Performa ini sangat memuaskan dan membuktikan keandalan model.



Gambar 4.14 Perbandingan Beban Memori Model Sebelum dan Sesudah Tuning

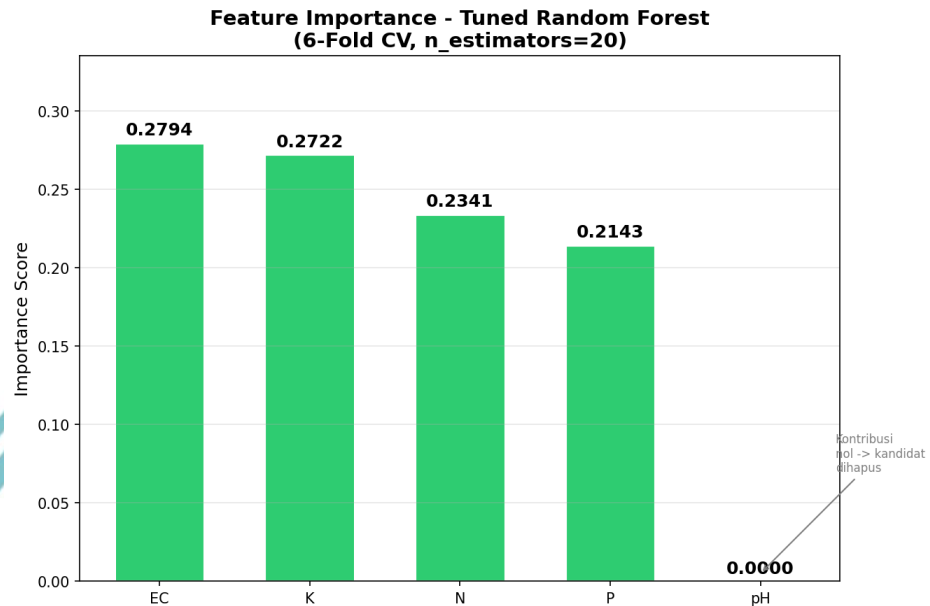
Berdasarkan Gambar 4.14, model *Random Forest* bawaan (*default*) dengan parameter 100 pohon (*trees*) menghasilkan ukuran struktur sebesar 134.23 KB. Ukuran ini berpotensi membebani memori pada mikrokontroler IoT yang sangat terbatas. Setelah dilakukan tahap *tuning* dengan mengoptimalkan parameter menjadi 20 pohon serta membatasi kedalaman maksimum menjadi 10, ukuran model berhasil berkurang menjadi 27.97 KB. Penghematan memori sebesar 79.2%.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Penurunan yang sangat signifikan ini menjadikan model jauh lebih ringan dan aman untuk di-deploy secara langsung ke dalam sistem mikrokontroler ESP32.



Gambar 4.15 Feature Importance pada Model Final Random Forest

Berdasarkan Gambar 4.15, hasil analisis *Feature Importance* menggunakan konfigurasi *6-Fold Cross-Validation* konsisten mengonfirmasi temuan sebelumnya mengenai kontribusi tiap parameter terhadap keputusan model klasifikasi. Pada model Random Forest, parameter Electrical Conductivity (EC) menempati posisi pertama dengan skor 0,2794, diikuti oleh Kalium (K) sebesar 0,2722, Nitrogen (N) sebesar 0,2341, dan Fosfor (P) sebesar 0,2143. Sebaliknya, derajat keasaman (pH) kembali menunjukkan skor kontribusi sebesar 0,0000 (nol), mengonfirmasi bahwa parameter ini tidak memberikan variansi yang memadai untuk membedakan antar kelas kesuburan tanah.

4.3.6 Implementasi *Edge Computing* (*Deployment Model* ke ESP32)

Model klasifikasi *Random Forest* final yang telah dioptimasi dan terbukti sangat ringan tidak dapat langsung dijalankan pada lingkungan perangkat keras mikrokontroler ESP32 yang memiliki keterbatasan memori dan daya komputasi. Oleh karena itu, dilakukan implementasi *deployment* model



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dengan menerapkan prinsip *Tiny Machine Learning (TinyML)*. Proses *deployment* ini dieksekusi menggunakan pustaka *micromlgen* di dalam *Python environment*. Pustaka ini berfungsi untuk mengekstrak arsitektur dari model *Random Forest* yang berupa struktur percabangan pohon keputusan dan bobot fiturnya lalu mengonversinya menjadi statis dalam format bahasa C/C++ murni. Hasil keluaran dari proses konversi ini adalah sebuah berkas *header* (.h), selanjutnya berkas *header* tersebut diintegrasikan ke dalam sistem perangkat keras menggunakan *Integrated Development Environment (IDE)* Arduino. *Array* data yang berisi kelima parameter hasil pembacaan sensor secara *real-time* (N, P, K, pH, dan EC) digunakan sebagai nilai masukan (*input*) untuk fungsi prediksi model di dalam berkas C/C++ tersebut. Dengan demikian, proses inferensi klasifikasi kesuburan tanah tereksekusi sepenuhnya secara lokal di dalam ESP32 (*on-device inference*) tanpa memerlukan bantuan *server* atau *cloud computing*.

```

Output  Serial Monitor X
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM12')

13:31:22.826 -> -----
13:31:22.826 -> N : 286 mg/kg
13:31:22.826 -> P : 708 mg/kg
13:31:22.826 -> K : 706 mg/kg
13:31:22.826 -> pH : 6.3
13:31:22.826 -> EC : 1558 us/cm
13:31:22.826 -> =====
13:31:33.205 -> Status: SANGAT TINGGI
13:31:34.392 -> Tindakan: Pertahankan kondisi saat ini.
13:31:35.400 -> =====
13:31:35.400 -> [MQTT] Data terkirim ke ThingsBoard.
13:31:36.607 ->
13:31:36.607 -> [AI Latency: 0.000126 seconds]
13:31:36.642 -> [AI Class: 4 = Sangat Tinggi]
13:31:36.642 -> =====
13:31:36.642 -> HASIL ANALISIS KUALITAS TANAH
13:31:36.642 -> =====
13:31:36.642 -> Kelembaban : 95.8 %
13:31:36.642 -> Suhu : 29.4 degC
13:31:36.642 -> -----
13:31:36.642 -> N : 287 mg/kg
13:31:36.642 -> P : 711 mg/kg
13:31:36.642 -> K : 708 mg/kg
13:31:36.642 -> pH : 6.2
13:31:36.642 -> EC : 1563 us/cm
13:31:36.642 -> =====
  
```

Gambar 4.16 Hasil Inferensi AI pada Serial Monitor

Keberhasilan implementasi *TinyML* pada perangkat *edge* ini dibuktikan melalui pengujian pemrosesan data sensor secara langsung. Berdasarkan log keluaran pada *Serial Monitor* yang ditunjukkan pada Gambar 4.16, mikrokontroler ESP32 berhasil membaca parameter kualitas tanah terkini



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dan memasukkannya ke dalam algoritma AI. Model kemudian mengklasifikasikan kondisi tersebut ke dalam Kelas Sangat Tinggi dan memberikan rekomendasi tindakan.

4.3.7 Implementasi Server

Layanan *backend* atau *server* diimplementasikan secara utuh menggunakan platform Supabase. Berdasarkan pengujian integrasi sistem, aliran data pemantauan dari perangkat mikrokontroler ESP32 di lahan pertanian berhasil dikirimkan ke *Server Broker* menggunakan protokol komunikasi MQTT, yang kemudian diteruskan ke API *real-time* Supabase.

	id int8	timestamp timesta...	N numeric	P numeric	K numeric	pH numeric	EC int4	+
	984	2026-05-15 12:16:17	102	282	276	5.6	674	
	985	2026-05-15 12:16:23	102	281	275	5.6	673	
	986	2026-05-15 12:16:28	102	282	276	5.6	674	
	987	2026-05-15 12:16:33	102	281	275	5.6	673	
	988	2026-05-15 12:16:39	102	281	275	5.6	673	
	989	2026-05-15 12:16:44	102	281	275	5.6	673	
	990	2026-05-15 12:16:50	102	281	275	5.6	673	
	991	2026-05-15 12:16:55	102	281	275	5.6	673	
	992	2026-05-15 12:17:01	102	281	275	5.6	673	
	993	2026-05-15 12:17:06	102	281	275	5.6	673	
	994	2026-05-15 12:17:12	102	281	275	5.6	673	
	995	2026-05-15 12:17:17	102	281	275	5.6	673	
	996	2026-05-15 12:17:23	101	281	275	5.6	672	
	997	2026-05-15 12:17:28	101	281	275	5.6	672	
	998	2026-05-15 12:17:34	101	281	275	5.6	672	
	999	2026-05-15 12:17:39	101	281	275	5.6	672	
	1000	2026-05-15 12:17:45	101	281	275	5.6	672	

Gambar 4.17 Hasil Implementasi Penyimpanan Data Sensor pada Supabase

Berdasarkan Gambar 4.17, sistem *backend* terbukti mampu menerima dan mencatat riwayat pemantauan secara kontinu dan berurutan. Data yang tersimpan mencakup stempel waktu (*timestamp*) masuknya data yang terekam setiap beberapa detik, beserta pembacaan parameter secara akurat sesuai dengan rancangan skema basis data.

4.3.8 Implementasi Aplikasi Mobile

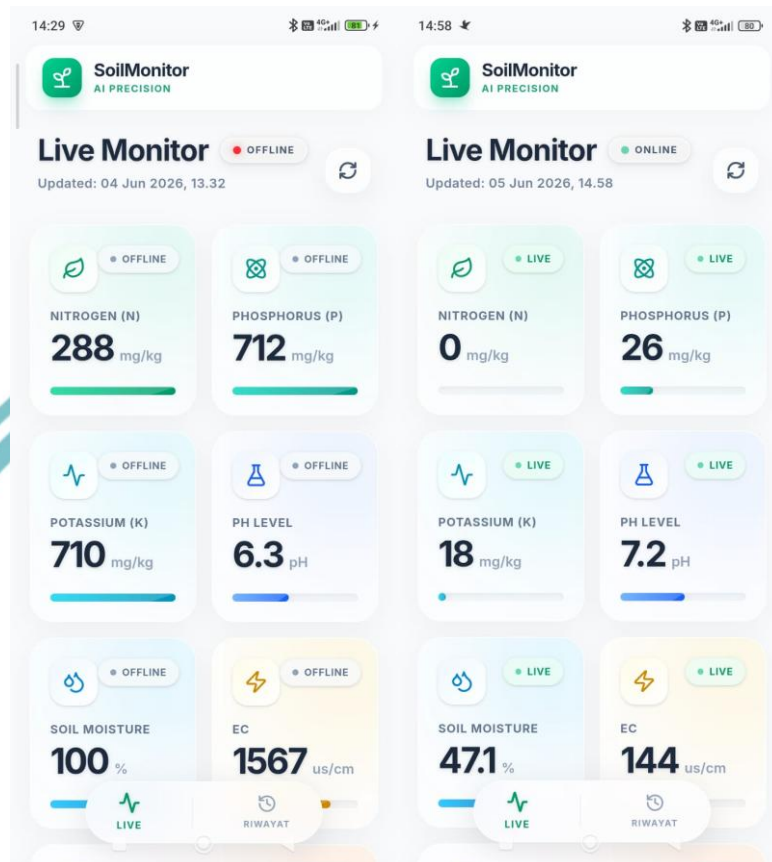
Tahapan akhir dari integrasi antarmuka pengguna akhir direalisasikan pada sisi klien (*client-side*). Antarmuka diimplementasikan dengan mengeksekusi kode program *Progressive Web App* (PWA) menggunakan kerangka kerja Capacitor agar dapat dijalankan sebagai aplikasi *native* pada perangkat seluler. Aplikasi ini telah dihubungkan dengan basis data



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Supabase sehingga setiap baris pembaruan data yang masuk akan ditarik (*fetch*) dan divisualisasikan pada layar aplikasi pengguna.



Gambar 4.18 Tampilan Antarmuka Aplikasi Mobile

Berdasarkan hasil implementasi pada Gambar 4.18, antarmuka aplikasi pemantauan terbukti telah berjalan secara fungsional. Layar menu *Live Monitor* secara responsif menampilkan angka parameter sensor terkini yang ditarik dari *database*. Selain itu, layar aplikasi juga menampilkan informasi waktu pembaruan terakhir, yang membuktikan keandalan fitur *caching* pada arsitektur PWA. Fitur manajemen memori lokal ini memungkinkan pengguna untuk tetap dapat melihat rekaman data kondisi lahan terakhir meskipun perangkat *smartphone* sedang terputus dari jaringan atau saat sensor berstatus *Offline*. Keberhasilan implementasi transmisi dan visualisasi data ini membuktikan bahwa tujuan perancangan sistem pertanian presisi telah tercapai secara utuh (*end-to-end*).



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.4 Pengujian Sistem

Tahap pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen yang telah diimplementasikan dapat berjalan dan berintegrasi dengan baik sesuai dengan analisis kebutuhan fungsional dan non-fungsional. Pengujian ini berfokus pada keandalan sistem secara menyeluruh, mulai dari ketepatan algoritma kecerdasan buatan, pemrosesan data di lingkungan *Edge Computing*, pengiriman data jaringan, hingga visualisasi pada antarmuka pengguna.

4.4.1 Deskripsi Pengujian

Pengujian sistem pada penelitian ini menggunakan metode *Black-Box Testing* untuk menguji fungsionalitas integrasi sistem secara keseluruhan (*end-to-end*). Aspek utama yang diuji meliputi:

1. Pengujian Model AI: Mengevaluasi kinerja algoritma *Machine Learning* dalam mengklasifikasikan data menggunakan metrik *Confusion Matrix* (Akurasi, Presisi, *Recall*, dan *F1-Score*). Pengujian ini juga mencakup komparasi performa antara model yang menggunakan 5 parameter fitur dengan model yang menggunakan 4 parameter (tanpa pH), serta komparasi keandalan model dengan dataset *Kaggle* dan dataset primer.
2. Pengujian Model pada *Edge Computing*: Menguji efisiensi arsitektur model setelah ditanamkan ke dalam mikrokontroler ESP32, meliputi evaluasi ukuran memori, latensi waktu inferensi (waktu pemrosesan data), dan stabilitas sistem secara lokal.
3. Pengujian *Quality of Service* (QoS) dan Komunikasi *Backend*: Mengukur tingkat keberhasilan pengiriman *payload* dari ESP32, mengevaluasi kecepatan sinkronisasi penerusan data (*forwarding*) dari platform IoT ThingsBoard ke basis data Supabase, serta menguji ketahanan sistem (*fault tolerance*) saat koneksi terputus.
4. Pengujian Fungsionalitas Aplikasi *Mobile*: Memastikan aplikasi *Progressive Web App* (PWA) berbasis Capacitor mampu menarik (*fetch*) data secara *real-time*, menyajikan visualisasi dengan responsif, dan berfungsi dengan baik di perangkat *smartphone*.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.4.2 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian dilakukan melalui dua skenario utama, yaitu pengujian simulasi perangkat lunak (lingkungan Python) dan pengujian fungsionalitas fisik di lapangan (lahan pertanian padi). Langkah-langkah pengujian dilakukan sebagai berikut:

1. Prosedur Pengujian Model: Melakukan validasi model final menggunakan metode *Stratified 6-Fold Cross Validation* di lingkungan Python. Prosedur dilanjutkan dengan simulasi penghapusan parameter derajat keasaman (pH) serta simulasi pelatihan menggunakan dataset sekunder (Kaggle) untuk membandingkan metrik akurasi akhir.
2. Prosedur Pengujian *Edge Computing*: Mengekspor model ke dalam bahasa C/C++ menggunakan pustaka *micromlgen*, mengunggahnya (*flashing*) ke mikrokontroler ESP32, lalu memonitor keluaran *Serial Monitor* untuk mencatat waktu jeda komputasi (latensi inferensi) sejak data sensor masuk hingga label AI keluar.
3. Pengujian *Quality of Service* (QoS) dan Komunikasi *Backend*: Mensimulasikan kondisi WiFi terputus pada purwarupa alat untuk memvalidasi fungsi antrean memori lokal. Selanjutnya, dilakukan pencatatan selisih stempel waktu (*timestamp*) antara *server* ThingsBoard dengan *database* Supabase untuk mengukur latensi penerusan data.
4. Prosedur Pengujian Aplikasi *Mobile*: Mengakses aplikasi melalui *smartphone* untuk menguji kecepatan pembaruan antarmuka secara *real-time*. Prosedur dilanjutkan dengan menguji responsivitas fitur navigasi riwayat data menggunakan penyaring tanggal (*date picker*), serta mematikan koneksi seluler untuk memvalidasi penanganan tampilan pada mode *offline*.

4.4.3 Data Hasil Pengujian

Berdasarkan prosedur yang telah dirancang, berikut adalah penjabaran data hasil pengujian dari masing-masing aspek:

1. Pengujian Model AI



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Pengujian pada tahap ini melakukan evaluasi performa dari model final untuk melihat keandalan klasifikasi, evaluasi komparasi reduksi fitur untuk memvalidasi efisiensi arsitektur algoritma dan komparasi kinerja model dengan dataset berbeda.

Tabel 4.8 Hasil Evaluasi Performa Model Klasifikasi

Metrik Evaluasi	Nilai Kinerja
Akurasi (<i>Accuracy</i>)	0,9985
Rata-rata <i>Precision</i>	0,9986
Rata-rata <i>Recall</i>	0,9985
Rata-rata <i>F1-Score</i>	0,9985

Berdasarkan Tabel 4.8, model klasifikasi terbukti sangat tangguh dan andal. Dengan nilai Akurasi, *Precision*, *Recall*, dan *F1-Score* yang menyentuh angka 0,9985 (99,85%), model memiliki kemampuan generalisasi yang luar biasa dalam mempelajari pola data sensor yang kompleks untuk mengklasifikasikan lima tingkatan kesuburan tanah dengan margin kesalahan (*error*) yang sangat minimal.

Tabel 4.9 Hasil Pengujian Komparasi Model 5 Parameter vs 4 Parameter

No	Metrik Evaluasi	Model 5 Parameter	Model 4 Parameter
1	Akurasi (<i>Accuracy</i>)	0,9986	0,9985
2	Rata-rata <i>Precision</i>	0,9986	0,9986
3	Rata-rata <i>Recall</i>	0,9985	0,9985
4	Rata-rata <i>F1-Score</i>	0,9985	0,9985
5	Ukuran Model	27,97 KB	34,61 KB

Berdasarkan Tabel 4.9, pengujian komparasi dilakukan untuk memvalidasi temuan *Feature Importance* sebelumnya yang menyatakan bahwa nilai derajat keasaman (pH) memiliki kontribusi nol (0,000) terhadap prediksi. Model 4 parameter (N, P, K, EC) terbukti mampu mempertahankan tingkat akurasi yang identik dengan model 5 parameter (99,85%). Namun, untuk menjaga kestabilan akurasi tersebut setelah kehilangan satu variabel masukan yaitu pH, jumlah pohon keputusan (*n_estimators*) pada model 4 parameter harus dinaikkan dari 20 pohon menjadi 25 pohon. Konsekuensi dari penyesuaian parameter



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ini adalah terjadinya sedikit peningkatan pada ukuran memori. Oleh karena itu, demi menjaga efisiensi memori agar tetap berada pada ukuran paling ringan (27.97 KB) tanpa mengorbankan performa klasifikasi, model 5 parameter dengan konfigurasi 20 pohon keputusan ditetapkan sebagai model final yang ditanamkan pada perangkat edge ESP32.

Tabel 4.10 Pengujian Komparasi Kinerja Model

No	Metrik Evaluasi	Model Dataset Sekunder	Model Dataset Primer
1	Akurasi (<i>Accuracy</i>)	0,9046	0,9985
2	Rata-rata <i>Precision</i>	0,8658	0,9986
3	Rata-rata <i>Recall</i>	0,9046	0,9985
4	Rata-rata F1- <i>Score</i>	0,8841	0,9985

Berdasarkan Tabel 4.10, hasil komparasi menunjukkan adanya ketimpangan performa yang signifikan antara kedua model. Meskipun model yang dilatih menggunakan dataset sekunder dari *Kaggle* mampu mencapai tingkat akurasi yang cukup baik yaitu 0,9046 (90,46%), performa tersebut masih tertinggal secara signifikan jika dibandingkan dengan model yang dibangun menggunakan dataset primer yang mencapai akurasi nyaris sempurna yaitu 0,9985 (99,85%).

2. Pengujian Model pada *Edge Computing*

Pengujian ini berfokus pada ketahanan mikrokontroler ESP32 dalam mengeksekusi arsitektur model AI tanpa terjadi *error* kehabisan memori (*out-of-memory*) serta seberapa cepat waktu pemrosesannya (latensi).

Tabel 4.11 Hasil Pengujian Fungsionalitas *Edge Computing* (ESP32)

No	Indikator Pengujian	Hasil Pengukuran / Observasi	Status
1	Ukuran <i>File</i> Model C/C++	Berhasil ditekan dari 134.22 KB (Default) menjadi 27.97 KB	Sangat Ringan
2	Waktu Inferensi AI (Latensi)	0.000204 detik per eksekusi klasifikasi (Berdasarkan <i>Log Serial Monitor</i>).	Sangat Cepat



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3	Stabilitas Eksekusi Lokal	Model dieksekusi terus-menerus tanpa ada layar LCD <i>freeze</i> atau ESP32 melakukan <i>restart</i> .	Stabil
---	---------------------------	--	--------

Berdasarkan Tabel 4.11, implementasi *TinyML* terbukti sukses secara operasional. Model dapat tertanam dengan baik dan dieksekusi terus-menerus secara berulang di dalam *looping* mikrokontroler tanpa memicu kesalahan sistem, maupun layar LCD yang membeku.

Tabel 4.12 Hasil Pengujian Penggunaan Memori ESP32

Komponen Memori ESP32	Kapasitas Maksimal Perangkat	Alokasi untuk Model AI	Beban Model
<i>Flash Memory</i>	4096 KB (4 MB)	27.97 KB	0,68 %
<i>SRAM</i>	520 KB	Sangat kecil (<1 KB)	< 0,2 %

Berdasarkan Tabel 4.12, ukuran model final sebesar 27.97 KB masih dikategorikan sangat ringan karena hanya mengonsumsi 0,68% dari total *Flash Memory* mikrokontroler ESP32 yang berkapasitas 4 MB. Ketersediaan sisa ruang memori (*free heap*) yang sangat besar ini krusial untuk memastikan mikrokontroler tidak mengalami *out-of-memory* saat harus memproses program lainnya secara bersamaan.

Tabel 4.13 Hasil Pengujian Waktu Inferensi Kecerdasan Buatan

Percobaan Ke-	Waktu Inferensi (Detik)
1	0.000042
2	0.000049
3	0.000040
4	0.000038
5	0.000039
6	0.000038
7	0.000050
8	0.000038
9	0.000038
10	0.000040
Rata-rata Waktu Inferensi	0.0000412 detik

Berdasarkan Tabel 4.13, ESP32 mampu mengeksekusi keputusan dengan sangat stabil. Rata-rata jeda waktu yang dibutuhkan oleh algoritma sejak menerima masukan data sensor hingga berhasil



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

mencetak label klasifikasi dengan rata-rata waktu sebesar 0.0000412 detik. Bukti tangkapan layar (*screenshot*) dari antarmuka *Serial Monitor* selama proses pengujian waktu inferensi ini berlangsung dapat dilihat pada Lampiran 7.

3. Pengujian Quality of Service (QoS) dan Komunikasi *Backend*

Pengujian ini berfokus pada keandalan infrastruktur jaringan sistem. Evaluasi dibagi menjadi dua bagian pengujian ketahanan transmisi data (*fault tolerance*) saat menghadapi gangguan konektivitas, serta pengujian kecepatan sinkronisasi penerusan data dari platform IoT ThingsBoard menuju basis data Supabase.

Tabel 4.14 Hasil Pengujian Transmisi Data

No	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Nyata	Status
1	Mentransmisikan data dalam kondisi WiFi stabil (<i>Online</i>).	<i>Payload</i> dari ESP32 dikirim via MQTT dan masuk ke <i>database</i> Supabase.	Baris data baru muncul di <i>dashboard</i> Supabase secara (<i>real-time</i>).	Sesuai
2	Memutuskan koneksi internet mikrokontroler (<i>Simulasi Offline</i>).	Sistem tidak macet (<i>hang</i>), data hasil sensor ditampung ke dalam antrean memori sementara.	Sistem mencatat data secara lokal di ESP32 dan menunggu status koneksi pulih.	Sesuai
3	Menghubungkan kembali internet setelah 5 menit <i>offline</i>	ESP32 mengirimkan seluruh antrean data yang tertunda sekaligus ke Supabase.	Seluruh riwayat data yang hilang saat <i>offline</i> masuk secara berurutan ke <i>database</i> .	Sesuai

Berdasarkan Tabel 4.14, penggunaan protokol MQTT merupakan arsitektur jaringan yang andal untuk area persawahan yang sering kali memiliki kualitas sinyal fluktuatif. Pengujian membuktikan bahwa ESP32 mampu menjalankan skema penjadwalan memori lokal untuk menampung aliran data saat gangguan sinyal terjadi. Ketika koneksi kembali pulih, sistem menyinkronkan seluruh antrean data tersebut ke *server* tanpa adanya satu pun data yang hilang.

Tabel 4.15 Hasil Pengujian Sinkronisasi dan Latensi Forwarding Data

Sampel	Waktu Masuk di Platform IoT	Waktu Terekam di Database	Selisih Waktu
1	2026-06-06 18:38:21	2026-06-06 18:38:22.042	1,04 Detik



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Sampel	Waktu Masuk di Platform IoT	Waktu Terekam di Database	Selisih Waktu
2	2026-06-06 18:38:36	2026-06-06 18:38:36.733	0,73 Detik
3	2026-06-06 18:38:50	2026-06-06 18:38:51.003	1,00 Detik
4	2026-06-06 18:39:05	2026-06-06 18:39:05.540	0,54 Detik
5	2026-06-06 18:39:19	2026-06-06 18:39:19.997	0,99 Detik
6	2026-06-06 18:39:34	2026-06-06 18:39:34.526	0,52 Detik
7	2026-06-06 18:39:48	2026-06-06 18:39:49.053	1,05 Detik
8	2026-06-06 18:40:03	2026-06-06 18:40:03.527	0,52 Detik
9	2026-06-06 18:40:17	2026-06-06 18:40:18.031	1,03 Detik
10	2026-06-06 18:40:32	2026-06-06 18:40:32.496	0,49 Detik
Rata-rata Latensi Keterlambatan			0,79 Detik

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.15, dari 10 sampel observasi berurutan, proses pengiriman data dari ESP32 terekam dengan ritme interval yang sangat konsisten setiap 14 hingga 15 detik di ThingsBoard. Lebih lanjut, mekanisme *Rule Engine* yang bertugas meneruskan (*forwarding*) data tersebut ke Supabase terbukti bekerja dengan efisiensi. Selisih waktu (latensi) antara datangnya data di dasbor ThingsBoard hingga tersimpan di dalam Supabase berada di kisaran sangat rendah, dengan rata-rata keterlambatan hanya sebesar 0,79 detik. Rincian dokumentasi validasi berupa perbandingan stempel waktu (*timestamp*) aktual dari platform IoT dan basis data selama pengujian dapat dilihat pada Lampiran 8.

4. Pengujian Antarmuka Aplikasi *Mobile*

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan fitur pada aplikasi *smartphone* berjalan dengan baik dan sinkron dengan perangkat keras di lapangan.

Tabel 4.16 Hasil Pengujian Fungsionalitas Aplikasi *Mobile*

No	Fungsionalitas yang Diuji	Hasil yang Diharapkan	Hasil Nyata	Status
1	Load dasbor <i>Live Monitor</i> .	Aplikasi menarik (<i>fetch</i>) metrik aktual dari Supabase tanpa latensi tinggi.	Metrik sensor sinkron dengan angka di LCD perangkat keras secara <i>real-time</i> .	Sesuai
2	Pembaruan visual pada kartu metrik (N, P, K, EC, pH,	Angka metrik di layar aplikasi berubah otomatis ketika ada	Angka ter- <i>update</i> secara <i>real-time</i> .	Sesuai



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

No	Fungsionalitas yang Diuji	Hasil yang Diharapkan	Hasil Nyata	Status
	Kelembaban, Suhu).	baris data baru di <i>server</i> .		
3	Tampilan diagnosis klasifikasi kesuburan dan rekomendasi AI.	Menampilkan label kesuburan (Sangat Tinggi/Sedang/dll) sesuai <i>payload</i> yang dikirimkan oleh ESP32	Teks ter- <i>update</i> dengan menyesuaikan hasil prediksi algoritma <i>Random Forest</i> .	Sesuai
4	Navigasi menu "Riwayat" (<i>History</i>) dan pembatasan kueri (<i>Limit Query</i>).	Aplikasi memuat daftar histori dan menampilkannya secara terstruktur.	Aplikasi sukses memuat maksimal 20 baris data pemantauan terakhir secara rapi.	Sesuai
5	Interaksi penyaringan data (<i>Filtering</i>) menggunakan <i>Date Picker</i>	Aplikasi menyortir riwayat hanya pada rentang tanggal spesifik yang dipilih pengguna.	Daftar riwayat langsung berubah menampilkan data sesuai dengan tanggal pilihan pengguna.	Sesuai
6	Penanganan layar kosong (<i>Empty State</i>) pada tanggal tanpa riwayat.	Aplikasi tidak <i>error</i> atau memunculkan layar <i>blank</i> jika tidak ada data di tanggal tersebut.	Muncul indikator visual dan pesan informatif yang menyatakan "Tidak Ada Data".	Sesuai

Berdasarkan Tabel 4.16, integrasi *framework* Capacitor dengan pendekatan arsitektur *Progressive Web App* (PWA) terbukti berhasil menjembatani fungsionalitas aplikasi. Seluruh skenario pengujian *Black-Box* berjalan persis seperti rancangan awal. Sinkronisasi metrik parameter aktual lingkungan serta visualisasi hasil klasifikasi tersaji di layar pengguna tanpa adanya jeda pemuatan visual. Sebagai tambahan, selain pengujian fungsionalitas sistem secara *Black-Box*, purwarupa aplikasi dan perangkat keras ini juga telah dievaluasi tingkat penerimaan serta kemudahan penggunaannya oleh pengguna akhir, yakni petani. Rincian kuesioner, tabulasi data, dan hasil perhitungan

evaluasi menggunakan metode *System Usability Scale* (SUS) dan *Net Promoter Score* (NPS) disajikan secara lengkap pada Lampiran 5.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring dan klasifikasi kualitas tanah yang telah dilakukan pada bab-bab sebelumnya, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem cerdas berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *edge computing* telah berhasil dikembangkan untuk memantau dan mengklasifikasikan tingkat kesuburan tanah secara *real-time* guna mendukung pertanian presisi. Melalui implementasi teknologi *Tiny Machine Learning* (TinyML) menggunakan pustaka *micromlgen*, algoritma Kecerdasan Buatan sukses ditanamkan ke dalam mikrokontroler ESP32 sehingga proses klasifikasi dapat dieksekusi langsung di lokasi pengukuran (*on-device inference*).
2. Berdasarkan hasil komparasi model *Machine Learning* yang dilakukan, algoritma *Random Forest* menunjukkan performa terbaik dibandingkan algoritma lainnya dengan tingkat akurasi sebesar 99,85% serta stabilitas yang tinggi berdasarkan pengujian *Stratified 6-Fold Cross-Validation*.
3. Proses *hyperparameter tuning* pada model *Random Forest* berhasil menciptakan model yang sangat ringan. Kompleksitas pohon keputusan berhasil direduksi sehingga ukuran file model menyusut sebesar 79,2% (dari 134,22 KB menjadi 27,97 KB) tanpa mengorbankan performa klasifikasi.
4. Kinerja perangkat *edge computing* (ESP32) terbukti efisien, di mana arsitektur model AI hanya membebani sekitar 0,68% dari kapasitas total *Flash Memory* mikrokontroler. Waktu respons sistem (latensi inferensi) juga sangat cepat, dengan rata-rata pemrosesan 0,0000412 detik per eksekusi, serta stabil beroperasi tanpa mengalami kegagalan memori (*out-of-memory*).
5. Integrasi antara *backend* Supabase dan aplikasi *mobile* berbasis *Capacitor Progressive Web App* (PWA) berjalan dengan sukses. Aplikasi mampu menarik data (*fetch*) dan memvisualisasikan kondisi riwayat



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

lahan, diagnosis klasifikasi AI, serta rekomendasi tindakan agrikultur secara seketika (*real-time*), lengkap dengan kemampuan *responsive*.

6. Meskipun algoritma *Random Forest* menunjukkan performa klasifikasi yang baik, penelitian ini memiliki batasan di mana model dilatih dan dioptimalkan secara spesifik menggunakan dataset historis dari karakteristik tanah sawah di wilayah Kabupaten Bogor. Oleh karena itu, kemampuan generalisasi model terhadap jenis tanah dan kondisi geografis di wilayah lain masih memerlukan pengujian lebih lanjut

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Menambahkan parameter kualitas tanah lainnya seperti kandungan bahan organik (C-Organik), maupun unsur hara lainya agar model dapat menghasilkan analisis kesuburan tanah yang lebih komprehensif.
2. Diperlukan penelitian lanjutan mengenai metode kalibrasi atau konversi nilai ukur yang lebih presisi untuk semua parameter, khususnya parameter Nitrogen (N). Karena sensor portabel umumnya membaca N-Tersedia.
3. Menambahkan fitur prediksi kondisi tanah dan rekomendasi pemupukan berbasis kecerdasan buatan sehingga sistem tidak hanya melakukan klasifikasi, tetapi juga mampu memberikan rekomendasi tindakan yang lebih spesifik.
4. Karena penelitian ini masih sebatas memonitor data dan memberikan rekomendasi (*decision support system*), pengembangan tahap selanjutnya dapat diintegrasikan dengan aktuator fisik di lapangan. Contohnya, aktuator pengontrol sistem irigasi pupuk cair otomatis (*fertigation*) yang bekerja sesuai output kelas kesuburan yang diputuskan oleh ESP32.
5. Jalur transmisi MQTT dan API yang menuju layanan Supabase ke depannya dapat diperkuat menggunakan standar keamanan lanjutan (seperti TLS/SSL, *payload encryption*, maupun sistem autentikasi di



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dalam PWA). Hal ini perlu diterapkan jika data kualitas lahan akan diakses dalam skala komersial oleh banyak kelompok tani.

6. Melakukan pengujian pada berbagai jenis lahan dan kondisi lingkungan yang berbeda untuk mengevaluasi kemampuan generalisasi model klasifikasi sehingga sistem dapat diterapkan pada wilayah pertanian yang lebih luas.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR PUSTAKA

- Alfassa, A. I., Zhafira, A., Sifa, R. Y., Sari, E. K., Indriani, N., & Hidayah, N. (2025). Literature Review: Pemanfaatan Internet of Things (IoT) di Sektor Pertanian, Peternakan, dan Perikanan. *Jurnal Perangkat Lunak*, 7(2), 198-209. <https://doi.org/10.32520/jupel.v7i2.4237>
- Allen, J., Liu, H., Iqbal, S., Zheng, D., & Stansby, G. (2021). Deep learning-based photoplethysmography classification for peripheral arterial disease detection: A proof-of-concept study. *Physiological Measurement*, 42(5). <https://doi.org/10.1088/1361-6579/abf9f3>
- Anggreni, Norma Vitasari. (2024). Implementasi Pertanian Presisi dalam Meningkatkan Efisiensi Produksi. Halaman 1-9.
- Bogiouklis, J. N., Barouchas, P. E., Petropoulos, P., Tsesmelis, D. E., & Moustakas, N. (2025). Precision soil sampling strategy for the delineation of management zones in olive cultivation using unsupervised machine learning methods. *Scientific Reports*, 15, 8253. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89395-1>
- Cheema, S. M., & Pires, I. M. (2025). AIoT based soil nutrient analysis and recommendation system for crops using machine learning. *Smart Agricultural Technology*, 11, 100924. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100924>
- Eviati, Sulaeman, Herawaty, L., Anggria, L., Usman, Tantika, H. E., Prihatini, R., & Wuningrum, P. (2023). Petunjuk Teknis Edisi 3: Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk. Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk, Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Gobel, Sitty Sofia., Nurmi., dan Zulzain Ilahude. (2025). Analisis Kadar Hara Makro (N, P, K), C-Organik Pada Lahan Sawah Dan Tegalan Di Desa Dutohe Kecamatan Kabila. *Jurnal Lahan Pertanian Tropis (JLPT)*. Volume 4, Nomor 1, Halaman 203-209. doi.org/10.56722/jlpt.v4i1.30034



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Hermawan, I., Agustin, M., Zain, A.R., Mulyani, M.T. dan Nathanael, D. (2023). Rice Seedling Image Classification Using Light Convolutional Neural Network. *Khazanah Informatika: Jurnal Ilmu Komputer dan Informatika*, 9(2), pp.111-119.
- Kurniawan, A., & Saputra, D. (2023). Analisis Performa dan Implementasi Progressive Web App (PWA) pada Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 10(2), 215-224.
- Laiu, Paul., et al. (2025). Designing Resilient IoT and Edge Computing with Federated TinyML (DRIFT). *Preprint submitted to Journal of Systems Architecture*. Halaman 1-34. SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5430788>
- Munezero, A., Uwitonze, A., Kayalvizhi, J., Maniriho, C., Niyitegeka, J., & Ndorimana, P. (2024). Machine Learning and Internet of Things Based Real Time NPK Fertilizer Prediction for Cassava Crop in Rwanda. Dalam *Proceedings of the 2024 13th International Conference on Software and Computer Applications (ICSCA '24)*. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3651781.3651784>
- Nugraha, M. R., Galih, D., Rezkika, R., & Haryono, W. (2026). Rancang Bangun Aplikasi Manajemen Proyek Berbasis Web Menggunakan React dan Supabase. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan (JITET)*, 14(1), 1-8. <https://doi.org/10.23960/jitet.v14i1.8741>
- Nugroho, F. S., & Rosyidah, U. (2025). Progressive Web App. *Mars: Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro Dan Ilmu Komputer*, 3(4). <https://doi.org/10.61132/mars.v3i4.1027>
- Pratiwi, Adelia Angelina., et al. (2025). PERAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM PREDIKSI HASIL TANAMAN: META-SINTESIS LITERATUR TERKINI. *HYBRIDA: Jurnal Pertanian, Peternakan, Perikanan*. Volume 4, Nomor 1. Prefix DOI: 10.3766/hibrida.v1i2.3753.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Prusty, S., Patnaik, S., & Dash, S. K. (2022). SKCV: Stratified K-fold cross-validation on ML classifiers for predicting cervical cancer. *Frontiers in Nanotechnology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fnano.2022.972421>
- Rahman, Ramijur., and Kulendra Nath Das. (2025). Artificial Intelligence and Machine Learning in Soil Analysis for Precision Agriculture: A Review. *Journal of Experimental Agriculture International*. Volume 47, Issue 5, Page 511-524, 2025;Article no.JEAI.134930 ISSN: 2457-0591.
- Rajić, A., et al. (2024). Analysis of Using Machine Learning Techniques for Estimating Solar Panel Performance in Edge Sensor Devices. *Applied Sciences*, 14(3), 1296. <https://doi.org/10.3390/app14031296>
- Rasyaad, F., dkk. (2025). Developing a Scalable Next.js Platform for IoT Monitoring Using Backend-as-a-Service with a Comparison of Supabase and Firebase. *ResearchGate Publication*, Januari 2025
- Santika, R., Febrianti, S., Hakeki, S., Udan, Supriyanto, Y., Abdillah, Z. F., & Atmaja, S. A.. (2025). Analisis Kinerja Fungsional pada Aplikasi Mobile JKN Melalui Pengujian Black Box Testing. *Journal on Pustaka Cendekia Informatika*, 3(1), 59-68. <https://doi.org/10.70292/pctif.v3i1.47>
- Senapaty, M. K., Ray, A., & Padhy, N. (2024). Enhancing Soil Fertility Prediction Through Federated Learning on IoT-Generated Datasets with a Feature Selection Perspective. *Engineering Proceedings*, 82(1), 39. <https://doi.org/10.3390/ecsa-11-20474>
- Setiyadi, Didik., et al. (2025). Prediction of heart disease using random forest algorithm, support vector machine, and neural network. *TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control*. Volume 23, Nomor 1, Halaman 129-137. DOI: 10.12928/TELKOMNIKA.v23i1.25341
- Shahab, H., Naeem, M., Iqbal, M., Aqeel, M., & Ullah, S. S. (2025). IoT-driven smart agricultural technology for real-time soil and crop



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

optimization. *Smart Agricultural Technology*, 10, 100847.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100847>

Shahare, Yogesh., et al. (2023). A Comprehensive Analysis of Machine Learning-Based Assessment and Prediction of Soil Enzyme Activity. *Agriculture*. Volume 13, Issue 7, 1323.
<https://doi.org/10.3390/agriculture13071323>.

Sharafat, M. S., Kabya, N. D., Emu, R. I., Ahmed, M. U., Onik, J. C., Islam, M. A., & Khan, R. (2025). An IoT-enabled AI system for real-time crop prediction using soil and weather data in precision agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 12, 101263.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101263>

Upadhyay, Ashutosh Kumar., and Sapna Ratan Shah. (2025). Machine Learning-Based Prediction of Air Quality Index (AQI) in Mumbai: Comparative Analysis of Linear Regression, Random Forest, and XGBoost Models. *RESEARCH REVIEW International Journal of Multidisciplinary*. Volume 10, Issue 11, Page 299-307.
<https://doi.org/10.31305/rrijm.2025.v10.11.030>

Wulandari, F. T., & Astiko, W. (2025). Kajian degradasi lahan dan pengelolaan lahan berkelanjutan. *Journal of Authentic Research*, 4(Special Issue), 1067–1080.
<https://doi.org/10.36312/jar.v4iSpecialIssue.2953>

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Raden Muhammad Fadil Azhar

Penulis menyelesaikan pendidikan menengah di SMKN 6 Jakarta dengan jurusan Multimedia pada tahun 2022. Saat ini, penulis sedang menempuh pendidikan tinggi sebagai mahasiswa tingkat akhir di Politeknik Negeri Jakarta, program studi D4 Teknik Multimedia & Jaringan. Penulis memiliki rekam jejak lebih dari 6 tahun di industri kreatif serta lebih dari 4 tahun pengalaman dalam bidang pemrograman dan jaringan (*networking*).

Selama masa perkuliahan, penulis aktif mengembangkan kompetensi profesional dan kepemimpinannya. Penulis pernah mengemban tugas sebagai *Creative Officer* di PT Tequino Media Kreatif (2021–2022) serta dipercaya menjadi *Project Based Learning Leader* di Politeknik Negeri Jakarta (2023–2025) untuk memimpin pengembangan proyek *Smart CCTV* berbasis IoT dan *Smart Attendance System*. Selain itu, penulis juga memiliki pengalaman akademis dan profesional sebagai Asisten Dosen di Politeknik Negeri Jakarta (2024–2025) serta menjadi *IT Staff* di Binus Center pada tahun 2025. Pengalaman kerja industri terakhir penulis adalah sebagai *IT Intern* di PT Astra Mitra Ventura (2025–2026), di mana penulis bertanggung jawab dalam mengembangkan serta menguji aplikasi internal perusahaan.

Dalam bidang keahlian teknis, penulis menguasai *Adobe Creative Suite*, *software development*, *full stack web development*, *Artificial Intelligence & Machine Learning*, serta konfigurasi jaringan. Penulis juga memiliki kecakapan dalam menggunakan bahasa pemrograman seperti C++, C#, Python, JavaScript, MySQL, dan PHP. Seluruh kombinasi pengalaman dan keahlian ini didukung oleh kemampuan adaptasi yang cepat, komunikasi yang baik, serta pemecahan masalah yang kuat.



- Hak Cipta :**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS,
DAN TEKNOLOGI
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA
JURUSAN TEKNIK INFORMATIKA DAN KOMPUTER
Jl. Prof.DR.G.A. Siwabesy, Kampus UI, Depok 16425
Telp. (021) 91274097, Fax (021) 7863531
Laman : <http://www.pnj.ac.id>, e-mail: tik@pnj.ac.id

F4

**LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING
MENGIKUTI SIDANG SKRIPSI**

Yang bertanda tangan di bawah ini adalah Pembimbing skripsi :

Nama Mahasiswa : Raden Muhammad Fadil Azhar
NIM : 2207421005
Program Studi : Teknik Multimedia dan Jaringan
Judul Skripsi : Klasifikasi dan Analisis Tingkat Kesuburan Tanah Menggunakan Metode
Random Forest Berbasis Edge Computing

Sesuai dengan persyaratan yang diatur dalam Pedoman Skripsi Jurusan Teknik informatika dan Komputer, maka dengan ini menyetujui mahasiswa tersebut di atas untuk mengikuti sidang skripsi Tahun Akademik 2025 / 2026.

Depok, 08 Juni 2026
Pembimbing,

Maria Agustin, S.Kom., M.Kom.
NIP. 197509152003122003



Lampiran 2 Konsultasi Ahli (BRIN)

Konsultasi Mengenai Hara Tanah

Nama Narasumber : Dr. Ir. Junita Barus, M.Si
 Jabatan : Peneliti Ahli Utama
 Bidang : Kesuburan tanah dan pemupukan

Penelitian ini menggunakan soil sensor 7 in 1 untuk mengukur parameter tanah. Unsur kimia yang digunakan yaitu pH, NPK, kelembaban, suhu, dan EC. Untuk NPK yang digunakan menggunakan pengukuran tersedia.

1. Kategori kesuburan tanah mengikuti pedoman dari Balai Penelitian Tanah yang membaginya ke dalam lima tingkat, yaitu: sangat tinggi, tinggi, sedang, rendah, dan sangat rendah.
2. Penggunaan buku standar Balai Penelitian Tanah sudah sangat tepat. Referensi tersebut merupakan acuan terbaru yang diakui, mengingat pembaruan pedoman pengujian tanah berskala nasional membutuhkan proses dan biaya yang sangat besar.
3. Parameter pengujian yang digunakan pada penelitian ini (pH, EC, NPK, suhu, dan kelembapan) dinilai sudah memadai untuk merepresentasikan tingkat kesuburan tanah.
4. Berdasarkan parameter-parameter tersebut, penelitian ini diizinkan untuk menarik klasifikasi atau kesimpulan akhir secara objektif (misalnya, menentukan apakah tanah tersebut tergolong subur atau tidak subur).
5. Penentuan rentang nilai batas (*threshold* atau *range*) pada sistem harus mengacu secara ketat pada standar dari buku Balai Penelitian Tanah.
6. Referensi mengenai batas operasional dan variabel eksternal pengganggu pada sensor harus dipaparkan secara rinci. Sebagai analogi: sensor oksigen air akan gagal membaca dengan akurat jika airnya keruh. Sama halnya dengan metode ini, harus diakui bahwa pembacaan sensor bisa menjadi lemah atau bias akibat adanya variabel eksternal di dalam tanah.
7. Spesifikasi alat beserta seluruh keterbatasannya seperti jangkauan maksimal sensor atau kondisi yang membuat pembacaan tidak terdeteksi wajib dijelaskan secara detail dan transparan di dalam laporan penelitian.
8. Pengujian difokuskan pada pengklasifikasian spesifik untuk jenis tanah sawah mineral.
9. Unsur hara di dalam tanah secara alami saling terikat, sehingga uji akurat idealnya membutuhkan proses destruksi (*digest*) kimia. Oleh karena itu, pembacaan sensor wajib dikalibrasi menggunakan hasil uji laboratorium standar sebagai pembanding. Dengan adanya standar kalibrasi tersebut, estimasi nilai ketersediaan unsur (seperti P-Tersedia menggunakan metode Bray/Olsen) dapat diperkirakan dengan akurat.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

(Lanjutan)

10. Selain faktor Karbon Organik (C-Organik), kesuburan tanah juga sangat dipengaruhi dan ditentukan oleh tingkat pH serta ketersediaan unsur NPK.
11. Kondisi pH tanah yang rendah (asam) dapat mengikat unsur hara. Hal ini sangat berdampak pada parameter Fosfor (P), yang akan terikat oleh mineral tanah sehingga tidak dapat diukur/diserap dengan maksimal.

Dokumentasi dengan pihak BRIN Cibinong





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 3 Konsultasi Petani dan Standarisasi (Balittanah)

Konsultasi Mengenai Hara Tanah

Nama Narasumber : Ibu Lina (Petani di Serang)
 Jabatan : Ketua Poktan Priangan Mukti I
 Bidang : Pertanian

1. Untuk memastikan akurasi data, pengambilan sampel tanah tidak boleh dilakukan hanya di satu titik. Sampel harus diambil dari beberapa titik yang tersebar, kemudian dicampur rata sebelum diukur menggunakan sensor atau dikirim untuk uji laboratorium.
2. Kondisi keasaman (pH) tanah sangat menentukan keberhasilan pemupukan. Jika pembacaan sensor menunjukkan pH tanah terlalu asam (misal: 5,3), unsur hara tidak akan terserap oleh tanaman. Langkah mitigasi yang harus dilakukan sebelum memberikan pupuk NPK adalah menaburkan kapur dolomit untuk menetralkan pH tanah.
3. Siklus pemupukan padi yang ideal dilakukan cukup dua kali, yakni pada fase 15 Hari Setelah Tanam (HST) dan 25-30 HST. Jika terdapat tanaman yang mengalami gangguan pertumbuhan (kerdil), pemupukan susulan cukup diberikan secara spesifik (*spot treatment*) pada area yang bermasalah saja.
4. Pemberian pupuk Urea (Nitrogen) harus dikontrol dengan ketat, terutama saat musim hujan di mana air hujan sudah menyuplai Nitrogen alami. Kelebihan Nitrogen akan menyebabkan daun menjadi terlalu hijau pekat dan sukulen, yang sangat rentan mengundang serangan hama seperti wereng dan penggerek batang.
5. Narasumber menetapkan standar indikasi dan tindakan agronomi untuk kondisi hara dan pH tanah sebagai acuan logika sistem, dengan rincian:
 - a. Nitrogen (N): Jika $N < 80\%$, direkomendasikan penambahan pupuk Urea atau Kompos.
 - b. Fosfor (P): Jika $P < 80\%$, direkomendasikan penambahan pupuk SP-36 atau *Rock Phosphate*.
 - c. Kalium (K): Jika $K < 80\%$, direkomendasikan penambahan pupuk KCl atau Abu Kayu.
 - d. pH Tanah: Jika $pH < 5.5$ (Kondisi Asam), wajib ditambahkan Kapur Dolomit. Jika $pH > 7.5$ (Kondisi Basa), ditambahkan Belerang/Sulfur.
6. Selain bergantung pada alat ukur, kebutuhan Nitrogen tanaman di lapangan juga divalidasi secara visual menggunakan metode Bagan Warna Daun (BWD). Warna daun menjadi indikator utama apakah tanaman masih membutuhkan tambahan pupuk atau harus dihentikan.



(Lanjutan)

7. Hama utama yang sering menyerang meliputi wereng coklat/hijau, tikus, burung, dan ulat penggerek batang (yang menyerang tanaman dari dalam batang). Jika populasi hama sudah melampaui batas toleransi dan pencegahan alami tidak lagi efektif, penggunaan pestisida kimia menjadi solusi kuratif yang harus diambil.
8. Logika sistem Kecerdasan Buatan (AI) yang mengklasifikasikan tanah sebagai "Sangat Subur" apabila kadar NPK-nya sangat tinggi harus direvisi. Kadar unsur hara yang berlebihan (*over-fertilized*) justru bersifat toksik, merusak keseimbangan tanah, dan memicu ledakan hama.

Tabel range parameter menggunakan standar Balai Tanah

Lampiran 3. Kriteria penilaian hasil analisis tanah

Parameter tanah *	Nilai				
	Sangat rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat tinggi
C (%)	<1	1-2	2-3	3-5	>5
N (%)	<0,1	0,1-0,2	0,21-0,5	0,51-0,75	>0,75
C/N	<5	5-10	11-15	16-25	>25
P ₂ O ₅ HCl 25% (mg/100g)	<15	15-20	21-40	41-60	>60
P ₂ O ₅ Bray (ppm P)	<4	5-7	8-10	11-15	>15
P ₂ O ₅ Olsen (ppm P)	<5	5-10	11-15	16-20	>20
K ₂ O HCl 25% (mg/100g)	<10	10-20	21-40	41-60	>60
KTK/CEC (me/100 g tanah)	<5	5-16	17-24	25-40	>40
Susunan kation					
Ca (me/100 g tanah)	<2	2-5	6-10	11-20	>20
Mg (me/100 g tanah)	<0,3	0,4-1	1,1-2,0	2,1-8,0	>8
K (me/100 g tanah)	<0,1	0,1-0,3	0,4-0,5	0,6-1,0	>1
Na (me/100 g tanah)	<0,1	0,1-0,3	0,4-0,7	0,8-1,0	>1
Kejenuhan Basa (%)	<20	20-40	41-60	61-80	>80
Kejenuhan Aluminium (%)	<5	5-10	10-20	20-40	>40
Cadangan mineral (%)	<5	5-10	11-20	20-40	>40
Salinitas/DHL (dS/m)	<1	1-2	2-3	3-4	>4
Persentase natrium dapat tukar/ESP (%)	<2	2-3	5-10	10-15	>15

Parameter tanah pada lahan sawah*	Nilai		
	Rendah	Sedang	Tinggi
P ₂ O ₅ HCl 25% (mg/100g)	<20	20-40	>40
K ₂ O HCl 25% (mg/100g)	<20	20-40	>40

	Sangat masam	Masam	Agak masam	Netral	Agak alkalis	Alkalis
pH H ₂ O	<4,5	4,5-5,5	5,5-6,5	6,6-7,5	7,6-8,5	>8,5

Unsur mikro DTPA*	Defisiensi	Marginal	Cukup
Zn (ppm)	0,5	0,5-1,0	1,0
Fe (ppm)	2,5	2,5-4,5	4,5
Mn (ppm)	1,0	-	1,0
Cu (ppm)	0,2	-	0,2

- Hak Cipta :**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
 2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



(Lanjutan)

Tabel Raw Data Sensor dan hasil konversi

Parameter Tanah	Data Awal	Data setelah dikonversi	Metode Konversi
Nitrogen (N)	292 mg/kg	29,2 mg/100g	/ 10
Fosfor (P)	721 mg/kg	72,1 mg/100g	/ 10
Kalium (K)	718 mg/kg	71,8 mg/100g	/ 10
Derajat Keasaman (pH)	6	6	-
Konduktivitas Elektrik (EC)	1584 μ S/cm	1,584 dS/m	/ 1000

Penggunaan metode konversi satuan (/10 untuk unsur hara, dan /1000 untuk EC) dapat dibenarkan agar sistem Kecerdasan Buatan (AI) mampu mengklasifikasikan tingkat kesuburan tanah (P, K, pH, dan EC) sesuai parameter Balai Penelitian Tanah. Namun, sebagai batasan penelitian (*limitation of study*), klasifikasi untuk parameter Nitrogen (N) memerlukan penyesuaian *threshold* (ambang batas) tersendiri, karena sensor membaca nilai N-Tersedia, bukan N-Total dalam bentuk persentase (%) seperti yang tertera pada pedoman acuan.

Selain itu, sebagai bentuk kepatuhan terhadap etika penelitian, rincian data hasil pengujian laboratorium tidak dilampirkan di dalam laporan ini guna memenuhi permintaan kerahasiaan (*confidentiality*) dari pihak narasumber agar data tersebut tidak disebarluaskan.

Dokumentasi dengan pihak Petani Serang



Hak Cipta :

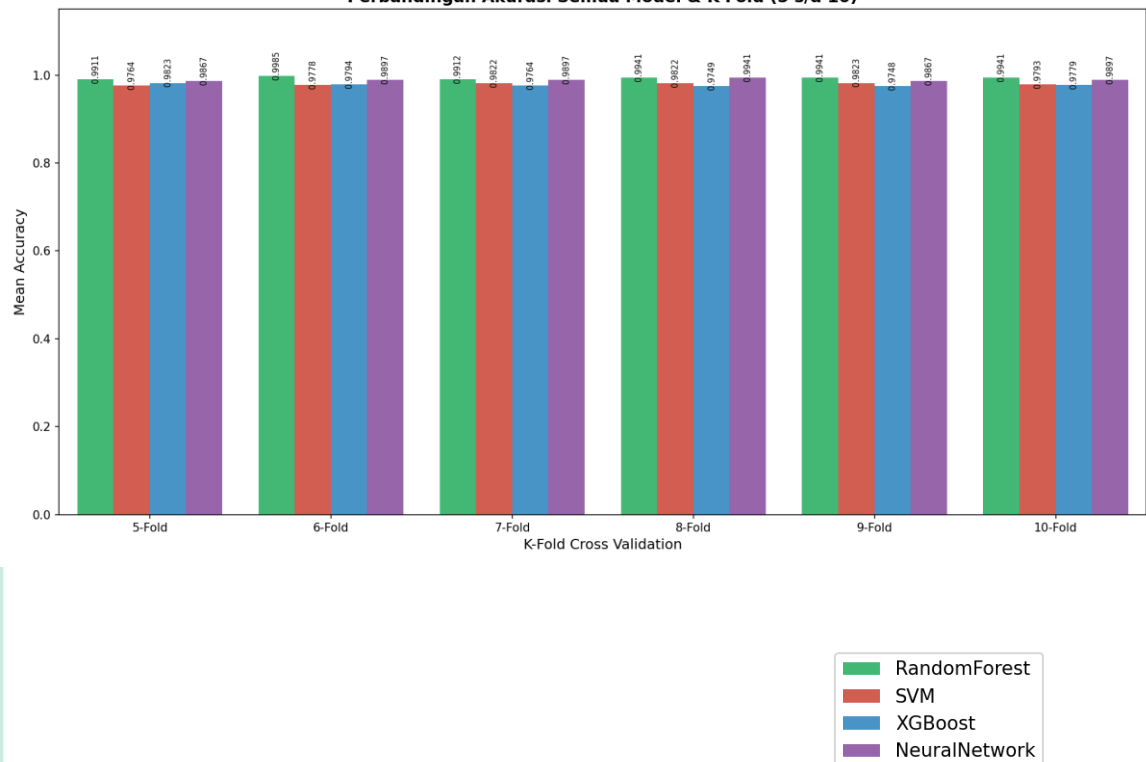
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Lampiran 4 Perbandingan Hasil Model 5 - 10 K-Fold

K-Fold	Model	Mean Accuracy	Std Accuracy	Mean Precision	Mean Recall	Mean F1-Score
5	Random Forest	0.9911	±0,0109	0.9918	0.9911	0.9911
5	SVM	0.9764	±0,0086	0.9776	0.9764	0.9763
5	XGBoost	0.9823	±0,0137	0.9834	0.9823	0.9823
5	Neural Network	0.9867	±0,0126	0.9871	0.9867	0.9867
6	Random Forest	0.9985	±0,0033	0.9986	0.9985	0.9985
6	SVM	0.9778	±0,0151	0.9787	0.9778	0.9777
6	XGBoost	0.9794	±0,0196	0.9808	0.9794	0.9794
6	Neural Network	0.9897	±0,0094	0.9904	0.9897	0.9896
7	Random Forest	0.9912	±0,0140	0.992	0.9912	0.9911
7	SVM	0.9822	±0,0121	0.9835	0.9822	0.9822
7	XGBoost	0.9764	±0,0218	0.9784	0.9764	0.9764
7	Neural Network	0.9897	±0,0146	0.99	0.9897	0.9897
8	Random Forest	0.9941	±0,0102	0.9945	0.9941	0.9941
8	SVM	0.9822	±0,0146	0.9836	0.9822	0.9822
8	XGBoost	0.9749	±0,0190	0.9768	0.9749	0.9748
8	Neural Network	0.9941	±0,0083	0.9944	0.9941	0.9941
9	Random Forest	0.9941	±0,0168	0.9949	0.9941	0.994
9	SVM	0.9823	±0,0154	0.9839	0.9823	0.9823
9	XGBoost	0.9748	±0,0231	0.9781	0.9748	0.9745
9	Neural Network	0.9867	±0,0108	0.9873	0.9867	0.9867
10	Random Forest	0.9941	±0,0098	0.9946	0.9941	0.9941
10	SVM	0.9793	±0,0179	0.9818	0.9793	0.9792
10	XGBoost	0.9779	±0,0231	0.9796	0.9779	0.9778
10	Neural Network	0.9897	±0,0148	0.9908	0.9897	0.9896

Perbandingan Akurasi Semua Model & K-Fold (5 s/d 10)

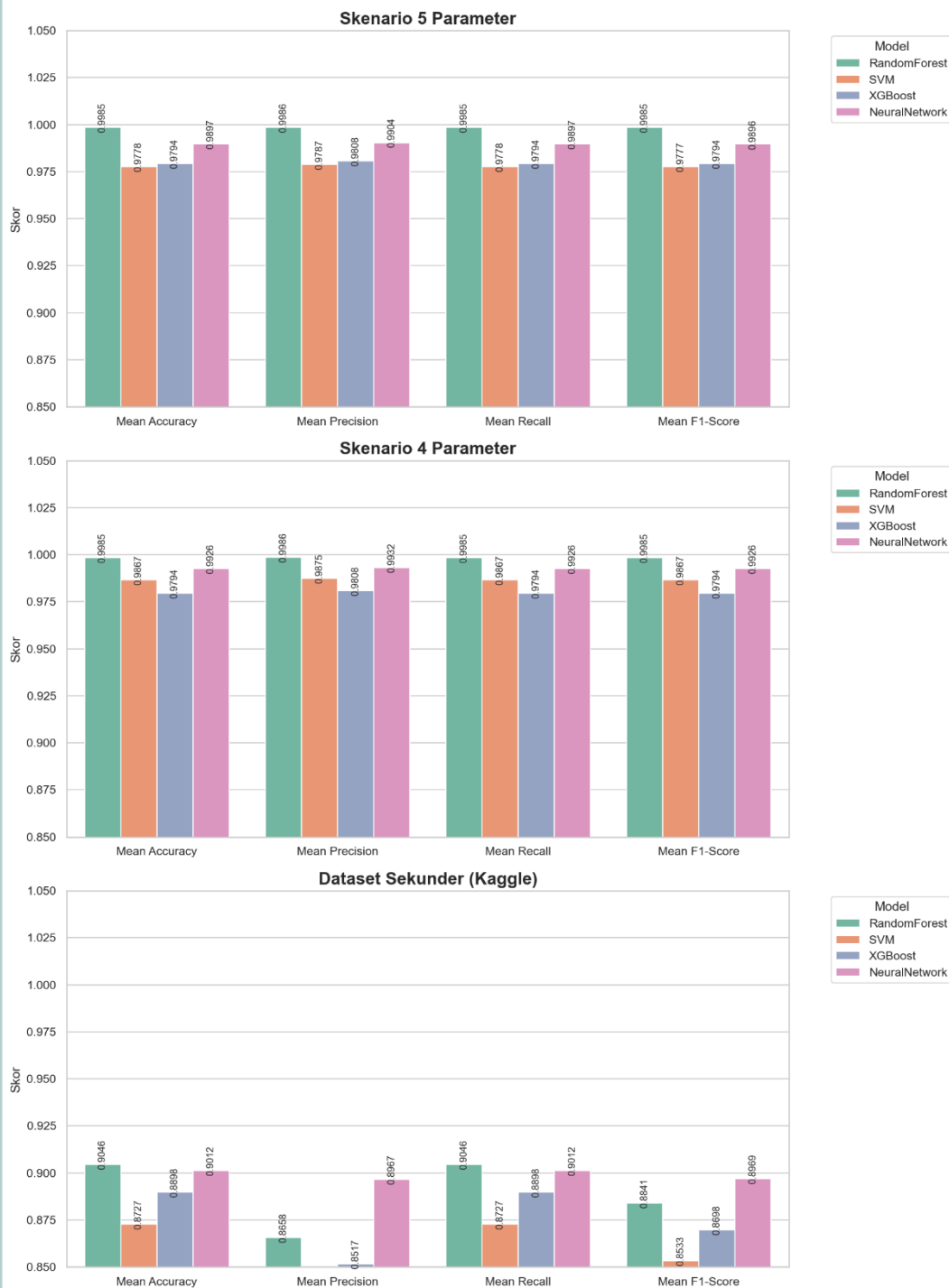


- Hak Cipta :**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
 2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



(Lanjutan)

Perbandingan Metrik Evaluasi Semua Model (K=6)





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 5 Hasil Pengujian Usability

A. DESKRIPSI PENGUJIAN

Pengujian *usability* ini dilakukan untuk mengevaluasi pengalaman pengguna dan tingkat penerimaan terhadap purwarupa alat portabel pemantau tanah dan sistem klasifikasi AI yang telah dikembangkan. Pengujian melibatkan 12 responden dan menggunakan dua instrumen evaluasi utama, yaitu *System Usability Scale* (SUS) dan *Net Promoter Score* (NPS).

B. HASIL SYSTEM USABILITY SCALE (SUS)

Perhitungan skor SUS didasarkan pada 10 pernyataan kuesioner. Berikut adalah hasil rekapitulasi perhitungan skor individu responden:

No. Responden	Skor Ganjil (X-5)	Skor Genap (25-Y)	Total Skor SUS
1	18	18	90.0
2	15	7	55.0
3	18	18	90.0
4	17	19	90.0
5	15	11	65.0
6	17	11	70.0
7	15	10	62.5
8	13	13	65.0
9	13	15	70.0
10	18	17	87.5
11	19	14	82.5
12	16	9	62.5
Rata-rata			74.17

Kesimpulan SUS: Berdasarkan rata-rata skor sebesar 74.17, sistem masuk ke dalam Grade B dengan *Adjective Rating* "Good" (Baik).

Grafik menyajikan distribusi jawaban dari 12 responden terhadap pernyataan pertama pada instrumen *System Usability Scale* (SUS), yaitu mengenai tingkat antisipasi atau minat pengguna untuk sering menggunakan fitur sistem di masa mendatang. Skala penilaian yang digunakan bergerak dari angka 1 (Sangat Tidak Setuju) hingga angka 5 (Sangat Setuju). Serta pengukuran seberapa besar kemungkinan pengguna akan merekomendasikan sistem pemantauan dan klasifikasi AI ini kepada kolega atau rekan sesama petani, dengan menggunakan rentang skala 1 hingga 10.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

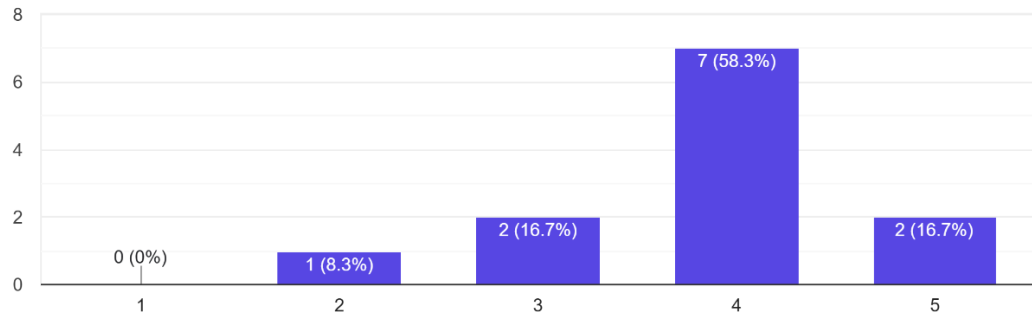
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

(Lanjutan)

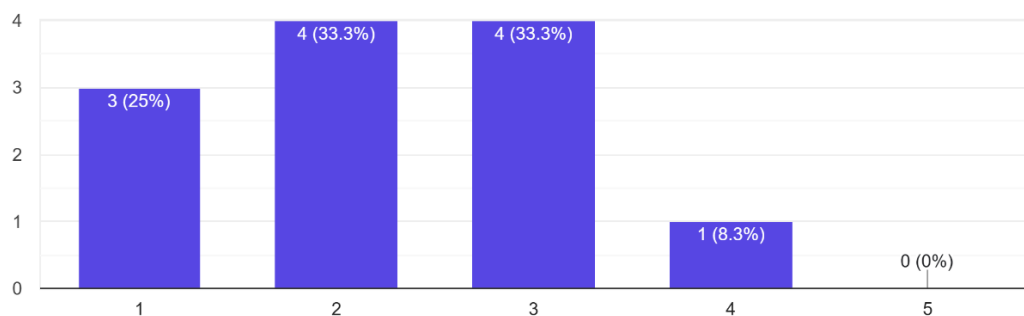
Saya pikir saya akan sering menggunakan fitur ini

12 responses



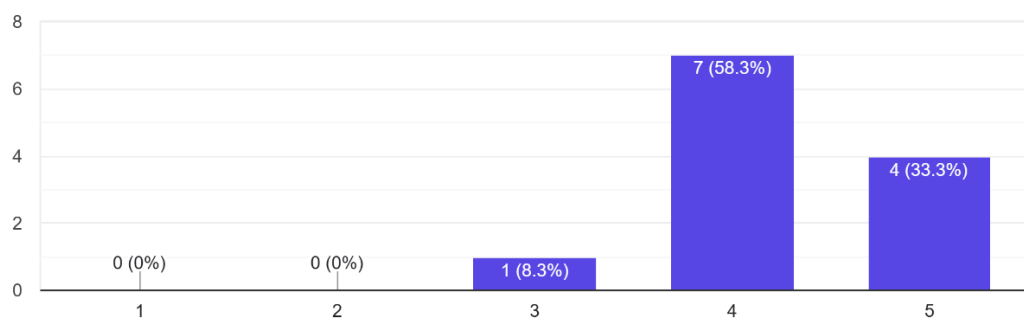
Saya merasa fitur ini terlalu rumit padahal dapat dibuat lebih sederhana

12 responses



Saya rasa fitur ini mudah untuk digunakan

12 responses





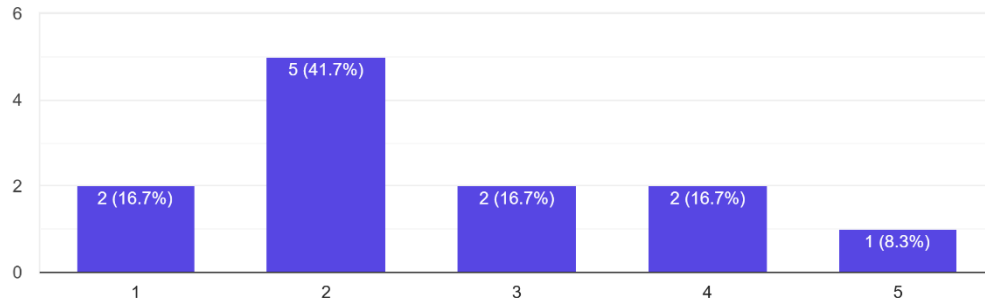
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

(Lanjutan)

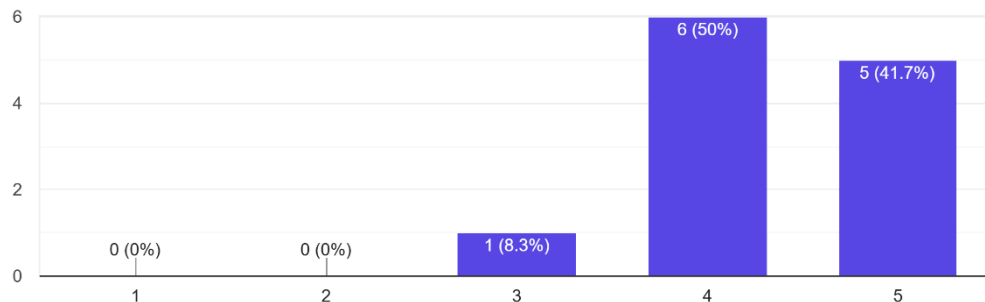
Saya pikir saya membutuhkan bantuan dari orang teknis untuk dapat menggunakan fitur ini

12 responses



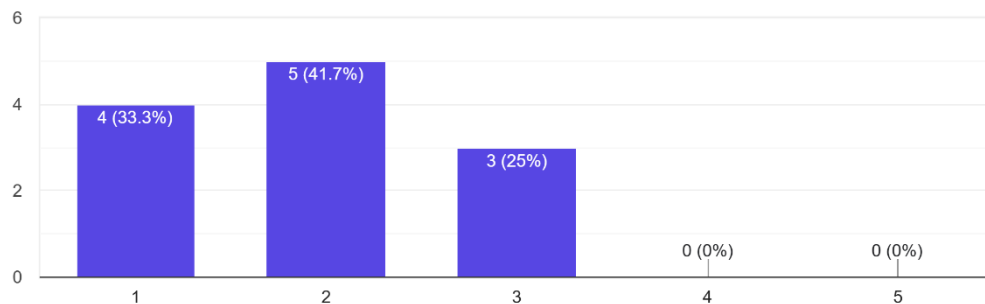
Saya menemukan bahwa terdapat berbagai macam fitur yang terintegrasi dengan baik dalam sistem

12 responses



Saya rasa banyak hal yang tidak konsisten terdapat pada fitur ini

12 responses





© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

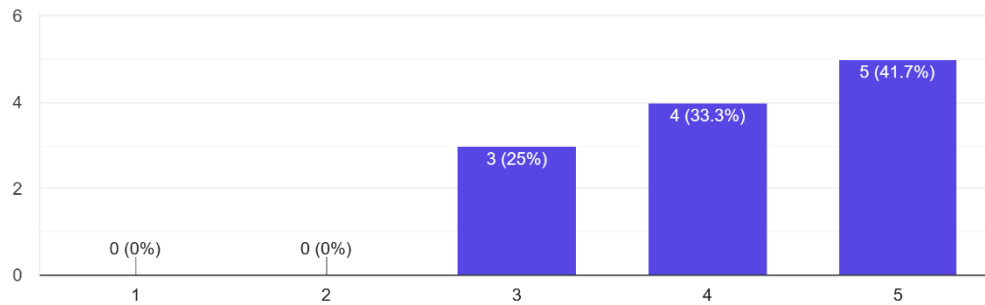
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

(Lanjutan)

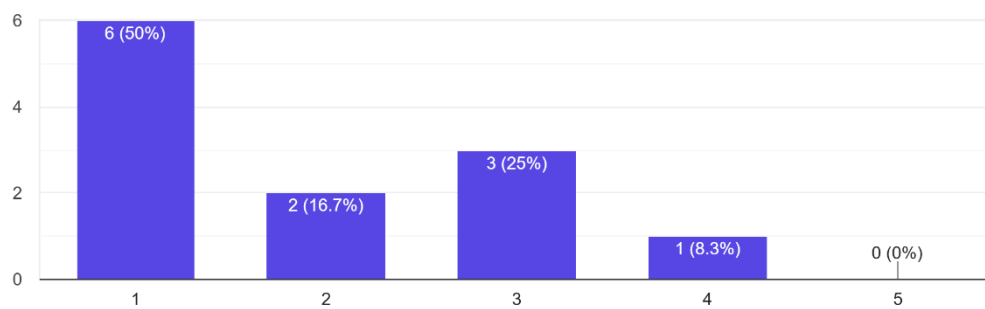
Saya rasa mayoritas pengguna akan dapat mempelajari fitur ini dengan cepat

12 responses



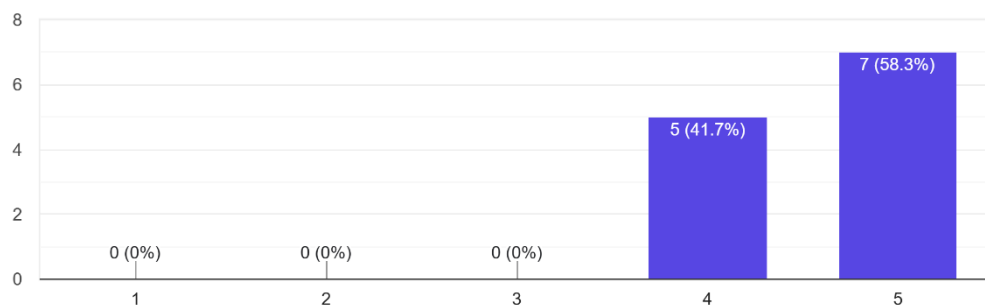
Saya menemukan bahwa fitur ini sangat tidak praktis ketika digunakan

12 responses



Saya sangat yakin dapat menggunakan fitur ini

12 responses





Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

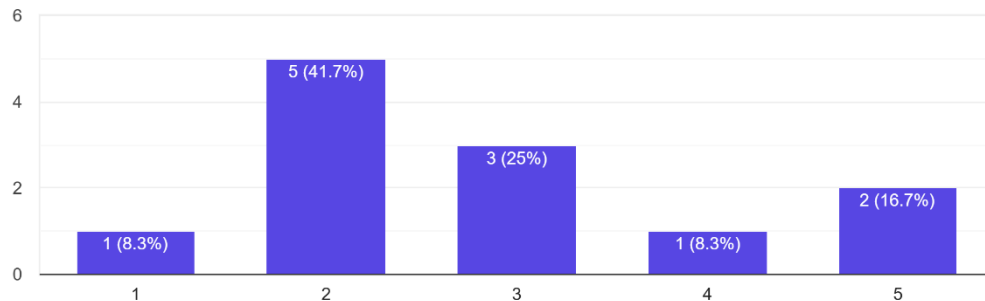
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

(Lanjutan)

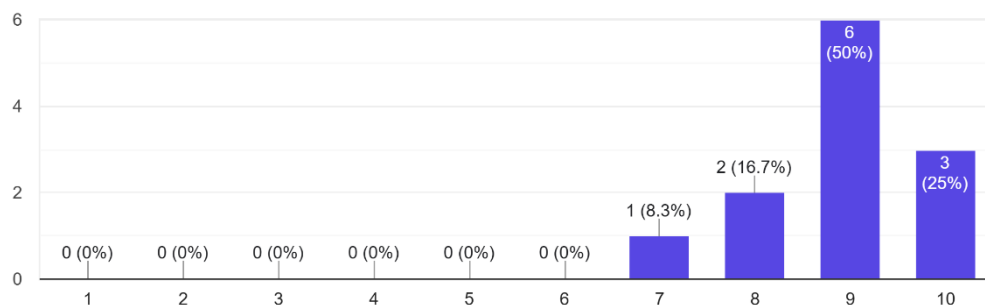
Saya harus banyak belajar banyak hal terlebih dahulu sebelum saya dapat menggunakan fitur ini

12 responses



Seberapa besar kemungkinan Anda akan merekomendasikan produk kami kepada teman Anda?
(How is the possibility of you will be recommending our product to your friends?)

12 responses



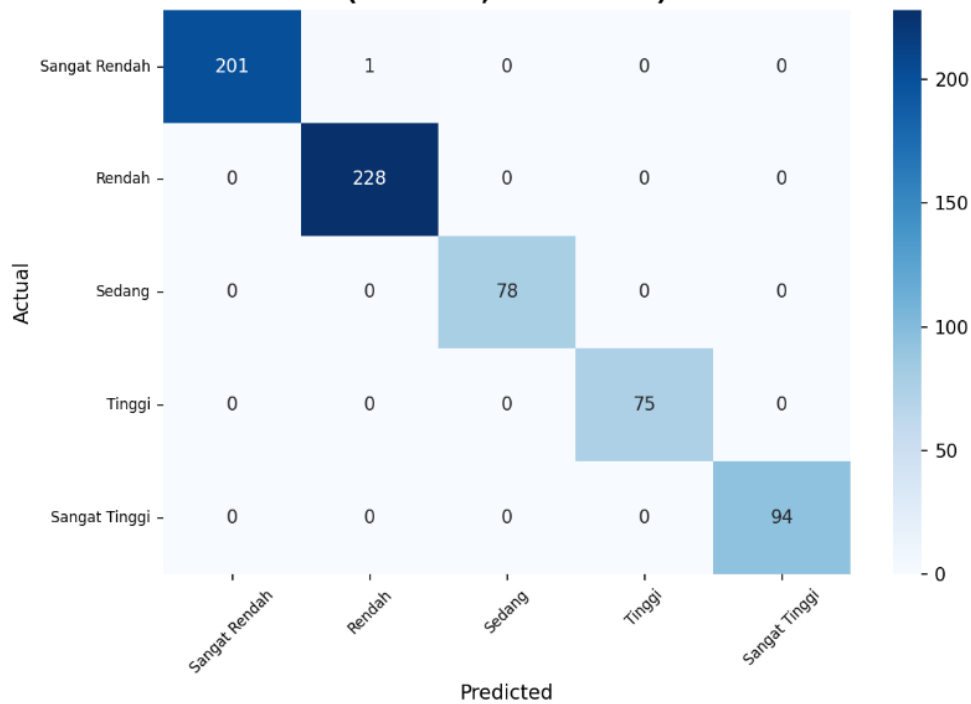


Hak Cipta :

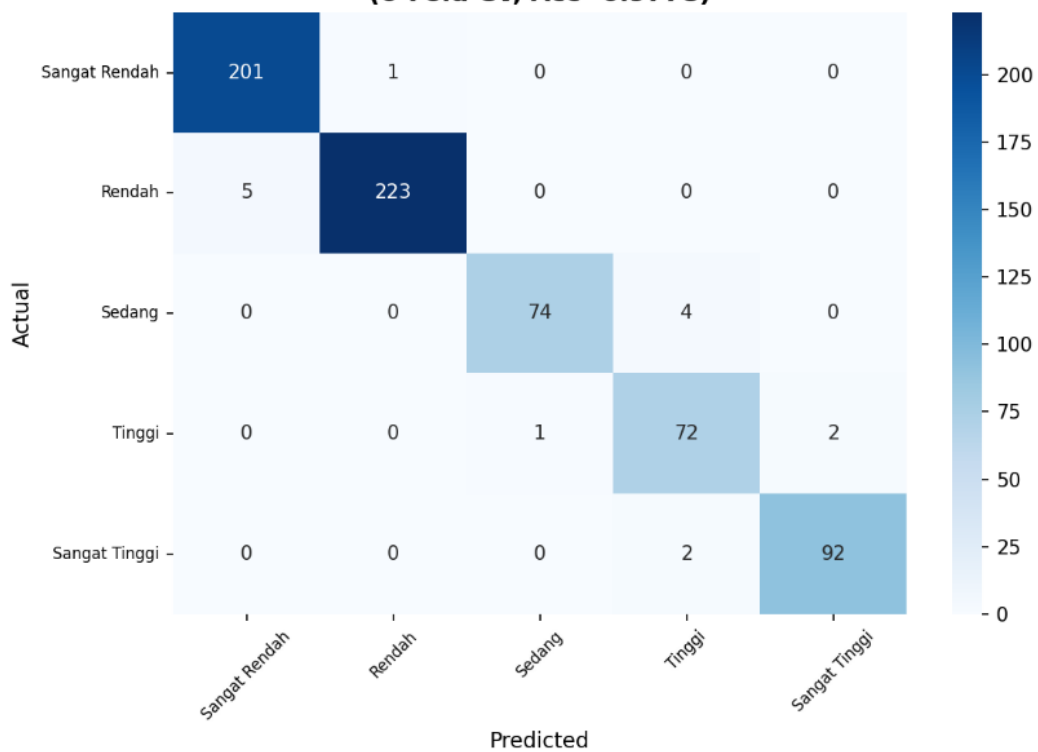
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 6 Hasil Evaluasi Performa Model Klasifikasi

**Confusion Matrix - RandomForest
(6-Fold CV, Acc=0.9985)**



**Confusion Matrix - SVM
(6-Fold CV, Acc=0.9778)**



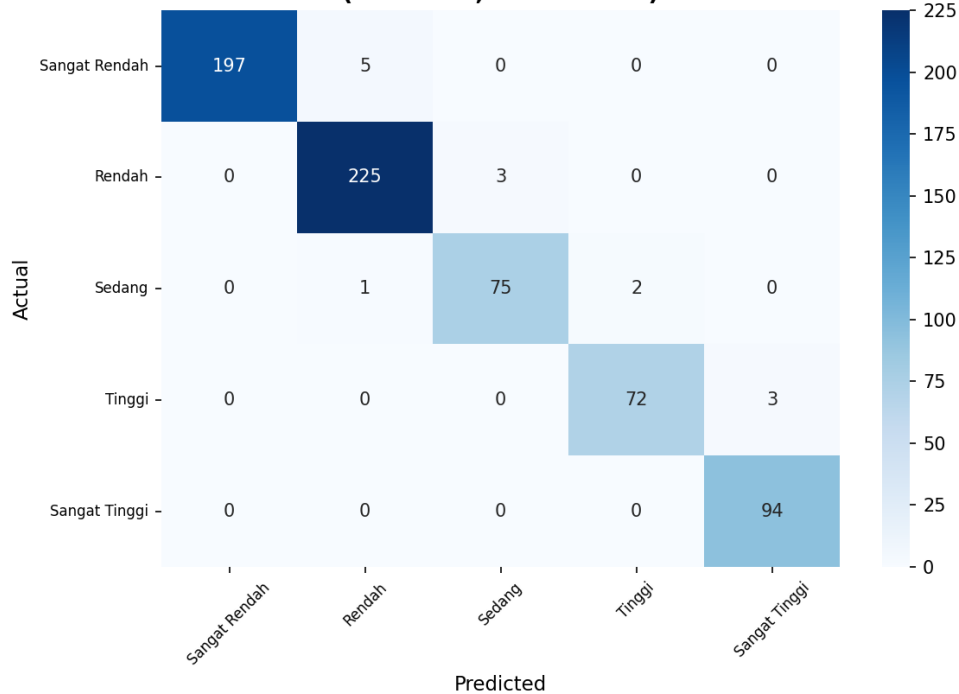


Hak Cipta :

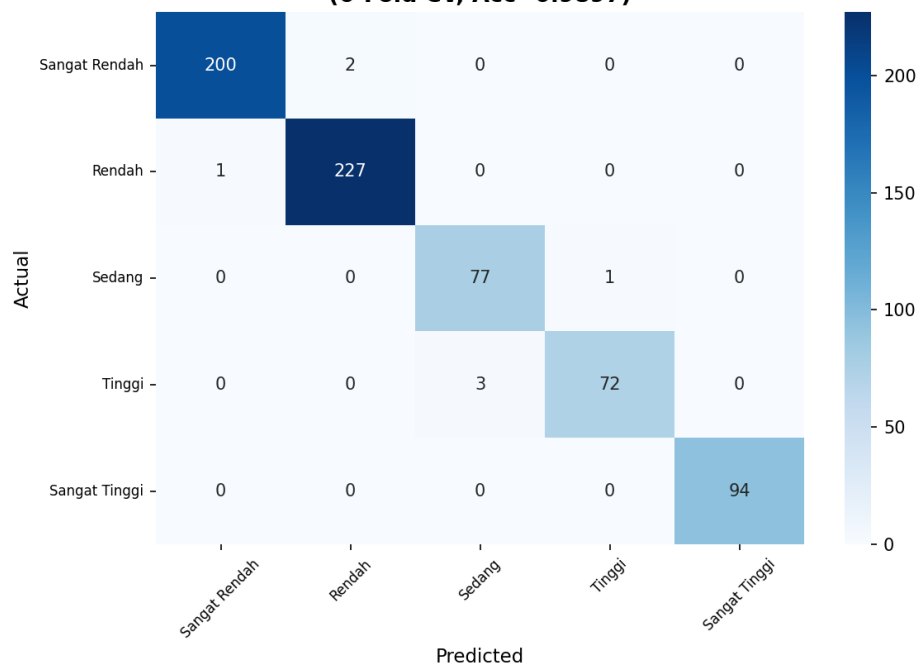
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

(Lanjutan)

**Confusion Matrix - XGBoost
(6-Fold CV, Acc=0.9794)**



**Confusion Matrix - NeuralNetwork
(6-Fold CV, Acc=0.9897)**





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 7 Penggunaan Memori ESP32

```
Output Serial Monitor
Sketch uses 1231814 bytes (93%) of program storage space. Maximum is 1310720 bytes.
Global variables use 54980 bytes (16%) of dynamic memory, leaving 272700 bytes for local variables. Maximum is 327680 bytes.
```

Angka 1.231.814 bytes (sekitar 1,2 MB) merupakan total keseluruhan kode program yang berjalan di ESP32. Total ini mencakup pustaka (*library*) komunikasi jaringan (WiFi dan MQTT), pembacaan sensor RS485, antarmuka LCD, serta model *Random Forest* yang telah dikonversi menggunakan *micromlgen*. Batas maksimal sebesar 1.310.720 bytes (1,3 MB) merupakan batas partisi aplikasi utama bawaan (*default partition scheme*) pada ESP32, di mana sisa dari total 4 MB *Flash Memory* dialokasikan untuk sistem antrean *file* lokal (SPIFFS) dan *Over-The-Air* (OTA). Model AI final yang hanya berukuran 27,97 KB terbukti sangat aman dan menyumbang porsi beban yang sangat kecil di dalam partisi aplikasi utama tersebut.

Sistem hanya menggunakan 54.980 bytes (sekitar 54 KB) atau 16% dari total kapasitas SRAM (*Static Random Access Memory*). Hal ini membuktikan bahwa implementasi *TinyML* pada penelitian ini beroperasi dengan sangat efisien. Arsitektur model klasifikasi dieksekusi hampir sepenuhnya di dalam *Flash Memory* (menggunakan makro *PROGMEM*) sehingga tidak membebani memori dinamis. Ketersediaan sisa memori dinamis (*free heap*) yang sangat besar (84%) ini menjadi faktor krusial yang menjamin mikrokontroler tetap stabil dan tidak *crash* saat harus memproses antrean data sensor secara terus-menerus.

Lampiran 8 Pengujian Waktu Inferensi Kecerdasan Buatan

Output Serial Monitor X	Output Serial Monitor X
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM12')	Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM12')
17:42:16.957 -> Status: SANGAT RENDAH	17:42:16.957 -> Status: SANGAT RENDAH
17:42:17.564 -> - N Rendah (0 mg/kg) -> Tambah Urea	17:42:17.564 -> - N Rendah (0 mg/kg) -> Tambah Urea
17:42:18.175 -> - P Rendah (8 mg/kg) -> Tambah SP-36	17:42:18.175 -> - P Rendah (8 mg/kg) -> Tambah SP-36
17:42:18.696 -> - K Rendah (0 mg/kg) -> Tambah KCl	17:42:18.696 -> - K Rendah (0 mg/kg) -> Tambah KCl
17:42:19.296 -> [MQTT] Data terkirim ke ThingsBoard. (Latensi: 2 ms)	17:42:19.296 -> [MQTT] Data terkirim ke ThingsBoard. (Latensi: 2 ms)
17:42:20.515 -> [AI Latency: 0.000042 seconds]	17:42:20.515 -> [AI Latency: 0.000042 seconds]
17:42:20.515 -> [AI Class: 0 = Sangat Rendah]	17:42:20.515 -> [AI Class: 0 = Sangat Rendah]
17:42:20.515 -> HASIL ANALISIS KUALITAS TANAH	17:42:20.515 -> HASIL ANALISIS KUALITAS TANAH
17:42:20.515 -> Kelembaban : 41.7 %	17:42:20.515 -> Kelembaban : 41.7 %
17:42:20.515 -> Suhu : 23.7 degC	17:42:20.515 -> Suhu : 23.7 degC
17:42:20.515 -> N : 0 mg/kg	17:42:20.515 -> N : 0 mg/kg
17:42:20.515 -> P : 8 mg/kg	17:42:20.515 -> P : 8 mg/kg
17:42:20.515 -> K : 0 mg/kg	17:42:20.515 -> K : 0 mg/kg
17:42:20.515 -> pH : 6.5	17:42:20.515 -> pH : 6.5
17:42:20.550 -> EC : 107 us/cm	17:42:20.550 -> EC : 107 us/cm



Lampiran 9 Pengujian Latensi dan Forwarding Data

Histori Monitoring Smart Farming

History - last 30 days | WIB

Timestamp ↓	Nitrogen	Fosfor	Kalium	pH Tanah	Suhu	Kelembaban	EC
2026-06-06 18:40:32	14 mg/kg	80 mg/kg	72 mg/kg	9.0 pH	30.9 °C	76 %	255 µS/cm
2026-06-06 18:40:17	14 mg/kg	80 mg/kg	72 mg/kg	9.0 pH	30.9 °C	76 %	255 µS/cm
2026-06-06 18:40:03	14 mg/kg	80 mg/kg	72 mg/kg	9.0 pH	30.9 °C	76 %	255 µS/cm
2026-06-06 18:39:48	14 mg/kg	80 mg/kg	73 mg/kg	9.0 pH	30.9 °C	76 %	256 µS/cm
2026-06-06 18:39:34	14 mg/kg	80 mg/kg	72 mg/kg	9.0 pH	30.9 °C	76 %	255 µS/cm
2026-06-06 18:39:19	14 mg/kg	80 mg/kg	72 mg/kg	9.0 pH	30.9 °C	76 %	255 µS/cm
2026-06-06 18:39:05	14 mg/kg	80 mg/kg	72 mg/kg	9.0 pH	30.9 °C	76 %	255 µS/cm
2026-06-06 18:38:50	14 mg/kg	80 mg/kg	72 mg/kg	9.0 pH	30.9 °C	76 %	255 µS/cm
2026-06-06 18:38:36	14 mg/kg	79 mg/kg	72 mg/kg	9.0 pH	30.9 °C	76 %	254 µS/cm
2026-06-06 18:38:21	14 mg/kg	80 mg/kg	72 mg/kg	9.0 pH	30.9 °C	76 %	255 µS/cm

☐	10356	2026-06-06 18:38:22.042842
☐	10357	2026-06-06 18:38:36.733588
☐	10358	2026-06-06 18:38:51.003378
☐	10359	2026-06-06 18:39:05.540919
☐	10360	2026-06-06 18:39:19.997462
☐	10361	2026-06-06 18:39:34.526284
☐	10362	2026-06-06 18:39:49.053061
☐	10363	2026-06-06 18:40:03.527558
☐	10364	2026-06-06 18:40:18.031396
☐	10365	2026-06-06 18:40:32.496266

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta