

## PENDEKATAN HIBRIDA RULE-BASED SYSTEM DAN SUPPORT VECTOR MACHINE UNTUK MONITORING SERTA REKOMENDASI KONDISI TANAH PADA BUDIDAYA KAKAO BERBASIS IOT

<sup>1</sup>Ni Nyoman Harini Puspita<sup>✉</sup>, <sup>1</sup>I Putu Oka Wisnawa, <sup>2</sup>I Putu Arie Pratama,  
<sup>1</sup>Ni Ketut Pradani Gayatri Sarja

<sup>1</sup>Teknologi Rekayasa Perangkat Lunak, Jurusan Teknologi Informasi, Politeknik Negeri Bali, Badung, Indonesia

<sup>2</sup>Fakultas Bisnis dan Vokasi, Jurusan Bisnis Digital, ITB STIKOM Bali, Denpasar, Indonesia

Email: [mangari@pnb.ac.id](mailto:mangari@pnb.ac.id)

DOI: <https://doi.org/10.46880/jmika.Vol10No1.pp310-318>

### ABSTRACT

*Agriculture modernization through Smart Farming requires a robust software infrastructure to process environmental data into actionable decisions. This study introduces a hybrid software framework combining a Rule-Based System (RBS) and Support Vector Machine (SVM) integrated within an IoT-based monitoring system for soil classification and irrigation recommendation on cocoa farms in Jembrana Regency. The developed system utilizes an ESP32 microcontroller to acquire real-time streaming data from soil moisture, temperature, and pH sensors. The SVM algorithm is deployed on the cloud layer to classify multi-parameter soil conditions into non-linear agricultural states, while the Rule-Based System engineered at the edge layer triggers real-time irrigation recommendations for the solenoid valve actuators. Software engineering testing focused on SVM classification accuracy, system functionality, and mobile application response latency. The experimental results demonstrate that the hybrid software architecture achieved an SVM classification accuracy of 92.4% and 100% logic execution for actuator controls, with an average data transmission network latency of 2.4 seconds. This hybrid engine successfully optimizes watering decisions based on structural soil data, providing an efficient framework for automated green agriculture infrastructure.*

**Keyword:** *Software Engineering, Expert System, Rule-Based, Support Vector Machine, Internet of Things, Smart Farming.*

### ABSTRAK

*Modernisasi sektor pertanian melalui Smart Farming memerlukan infrastruktur perangkat lunak yang andal untuk mengolah data lingkungan menjadi keputusan aksi. Penelitian ini mengusulkan sebuah kerangka kerja perangkat lunak hibrida yang menggabungkan Rule-Based System (RBS) dan Support Vector Machine (SVM) yang diintegrasikan dalam sistem monitoring IoT untuk klasifikasi tanah dan rekomendasi irigasi pada lahan kakao di Kabupaten Jembrana. Perangkat lunak yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk mengakuisisi data aliran real-time dari sensor kelembaban, suhu, dan pH tanah, kemudian mentransmisikannya ke server cloud. Algoritma SVM diterapkan pada lapisan cloud untuk mengklasifikasikan kondisi tanah multi-parameter menjadi status pertanian yang non-linear, sedangkan Rule-Based System direkayasa pada lapisan edge untuk memicu rekomendasi aktuator keran otomatis (solenoid valve) secara real-time. Pengujian rekayasa perangkat lunak difokuskan pada akurasi klasifikasi SVM, fungsionalitas sistem, dan latensi respons aplikasi monitoring. Hasil pengujian eksperimental menunjukkan bahwa arsitektur perangkat lunak hibrida berhasil mencapai akurasi klasifikasi SVM sebesar 92.4% dan eksekusi logika kontrol aktuator sebesar 100%, dengan rata-rata latensi jaringan pengiriman data sebesar 2.4 detik. Mesin hibrida ini berhasil mengoptimalkan keputusan penyiraman berdasarkan data tanah struktural.*

**Kata Kunci:** *Rekayasa Perangkat Lunak, Sistem Pakar, Berbasis Aturan, Support Vector Machine, Internet of Things, Smart Farming.*

### PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi saat ini mendorong transformasi digital di berbagai sektor kehidupan, tidak terkecuali pada sektor pertanian

berkelanjutan (Green Agriculture). Kabupaten Jembrana sebagai salah satu wilayah penghasil kakao utama menghadapi tantangan signifikan dalam manajemen sumber daya air akibat ketidakpastian



iklim. Metode pengairan tradisional terbukti kurang efisien dan menimbulkan biaya operasional tinggi. Guna mengatasi permasalahan tersebut, pendekatan Smart Farming berbasis Internet of Things (IoT) diajukan sebagai solusi mitigasi presisi.

Namun, tantangan utama dalam implementasi IoT di lapangan terletak pada aspek rekayasa perangkat lunak (software engineering) yang bertugas mengolah data mentah (raw data) sensor menjadi informasi cerdas. Data dari sensor kelembaban, suhu, dan pH tanah seringkali bersifat non-linear dan berfluktuasi tinggi, sehingga sulit diproses jika hanya menggunakan batasan aturan statis (hard-coded threshold). Di sisi lain, jika sistem sepenuhnya bergantung pada algoritma Machine Learning di sisi cloud, kendala latensi jaringan dapat menghambat respons pengosongan atau pengisian air secara cepat (real-time) (Gamage & Perera, 2024).

Guna mengatasi permasalahan tersebut, pendekatan Smart Farming berbasis Internet of Things (IoT) diajukan sebagai solusi mitigasi presisi (Kumar et al., 2024). Penelitian ini mengusulkan sebuah pendekatan hibrida (hybrid approach) yang menggabungkan kekuatan akurasi klasifikasi dari Support Vector Machine (SVM) di sisi cloud dengan kecepatan eksekusi dari Rule-Based System (RBS) di sisi edge (ESP32). Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan dan menguji performa mesin perangkat lunak monitoring hibrida tersebut dalam mengklasifikasikan status karakteristik tanah lahan kakao serta mengeksekusi otomatisasi irigasi. Fokus kontribusi ilmiah penelitian ini ditekankan pada analisis performa perangkat lunak, yang meliputi aspek akurasi klasifikasi SVM, validitas fungsionalitas aturan, dan latensi respons software aplikasi monitoring.

## TINJAUAN PUSTAKA

Smart Farming merupakan pendekatan modern yang memanfaatkan teknologi IoT untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas melalui pemantauan data lapangan secara real-time (Dhanaraju et al., 2022) (Prasetyo et al., 2022). Penggunaan kombinasi sensor tanah dan mikrokontroler seperti ESP32 menjadi fondasi utama dalam pengumpulan parameter fisik lingkungan pertanian (Setiawan & Sulistiyasni, 2024).

Dalam rekayasa perangkat lunak cerdas, Support Vector Machine (SVM) diakui sebagai salah satu algoritma Machine Learning terbaik untuk melakukan klasifikasi pada ruang dimensi tinggi dengan batasan non-linear. SVM bekerja dengan mencari hyperplane optimal yang memisahkan kelas data parameter tanah secara presisi. Namun, komputasi

SVM yang intensif umumnya dioperasikan pada server cloud (Rezk et al., 2021)

Untuk menjembatani kebutuhan komputasi tersebut dengan aksi lapangan real-time, Rule-Based System (RBS) digunakan sebagai mesin inferensi lokal yang ringan berbasis logika "IF-THEN" pada embedded software (Sari & Kusumanto, 2024). Melalui pendekatan hibrida, integrasi kedua metode ini mampu meminimalkan delay pengambilan keputusan dan mengoptimalkan keandalan sistem monitoring IoT secara keseluruhan (Putra et al., 2024).

**Tabel 1.** Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Diusulkan

Penelitian	IoT	SVM	Rule-Based	Rekomendasi Otomatis	Arsitektur Hybrid
Rezk et al. (2021)	✓	✓			
Putra et al. (2024)	✓	✓		✓	
Penelitian ini	✓	✓	✓	✓	✓

Berdasarkan Tabel 1, penelitian sebelumnya umumnya hanya memanfaatkan Machine Learning atau Rule-Based System secara terpisah. Belum banyak penelitian yang mengintegrasikan kedua pendekatan tersebut dalam arsitektur edge-cloud untuk menghasilkan klasifikasi kondisi tanah dan rekomendasi irigasi secara real-time. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pendekatan hibrida yang menggabungkan Support Vector Machine pada lapisan cloud dan Rule-Based System pada lapisan edge untuk meningkatkan akurasi klasifikasi sekaligus mempertahankan respons sistem yang cepat.

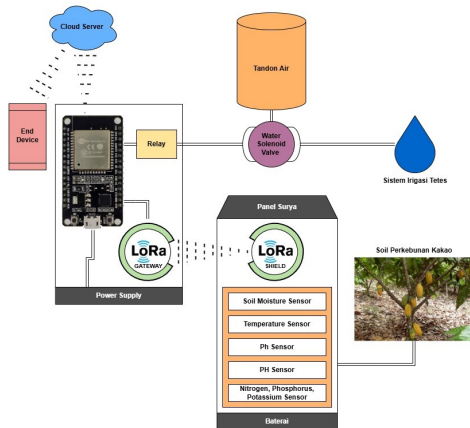
## METODE PENELITIAN

Metodologi rekayasa perangkat lunak yang diterapkan dalam penelitian ini berbasis pendekatan eksperimental dengan arsitektur hibrida dua lapis (two-layer architecture). Arsitektur Komputasi Hibrida Perangkat Lunak.

### Arsitektur Sistem IoT

Arsitektur perangkat keras sistem dirancang untuk mendukung proses akuisisi data, komunikasi data, penyimpanan data, dan pengendalian aktuator secara terintegrasi. Data kondisi lahan diperoleh melalui sensor yang terpasang pada area perkebunan kakao, kemudian dikirimkan melalui jaringan komunikasi LoRa menuju gateway dan server cloud untuk diproses lebih lanjut. Hasil pemrosesan digunakan sebagai dasar dalam pengendalian sistem irigasi tetes secara otomatis. Rancangan arsitektur

perangkat keras yang dikembangkan pada penelitian ini disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain perakitan komponen IoT

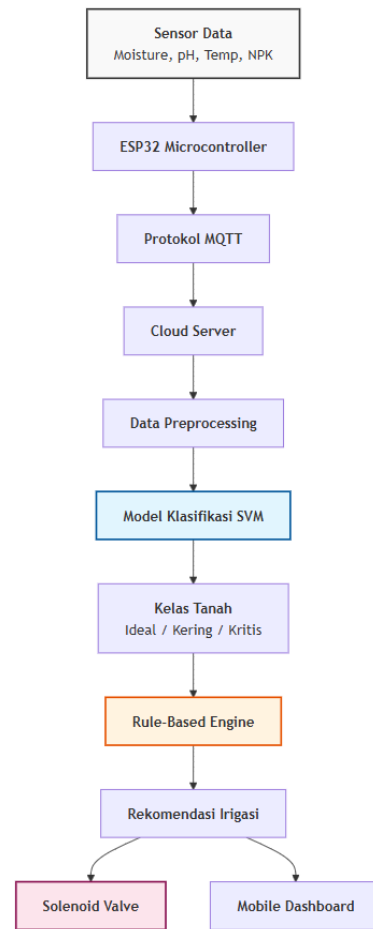
Tabel 2. Fungsi Komponen Perangkat Keras Sistem

Komponen	Fungsi
Soil Moisture Sensor	Mengukur kelembaban tanah
Temperature Sensor	Mengukur suhu lingkungan
pH Sensor	Mengukur tingkat keasaman tanah
NPK Sensor	Mengukur kandungan Nitrogen, Fosfor, dan Kalium
LoRa Shield	Komunikasi data jarak jauh
ESP32 Gateway	Pengolah dan pengirim data
Cloud Server	Penyimpanan dan pemrosesan data
Solenoid Valve	Pengendali aliran air irigasi
Panel Surya & Baterai	Sumber daya sistem

### Arsitektur Perangkat Lunak Hibrida

Untuk mengatasi keterbatasan pendekatan berbasis aturan statis maupun pendekatan Machine Learning yang sepenuhnya bergantung pada komputasi cloud, penelitian ini mengusulkan arsitektur perangkat lunak hibrida yang menggabungkan Support Vector Machine (SVM) dan Rule-Based System (RBS). Pada arsitektur yang diusulkan, SVM digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi tanah berdasarkan parameter sensor suhu (temperature), kelembaban tanah (soil moisture), konduktivitas listrik (electrical conductivity), tingkat keasaman tanah (pH), serta

kandungan unsur hara nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), sedangkan RBS berfungsi menerjemahkan hasil klasifikasi menjadi rekomendasi irigasi yang dapat dieksekusi secara otomatis. Integrasi kedua komponen tersebut memungkinkan sistem menghasilkan keputusan yang lebih akurat, adaptif, dan responsif terhadap kondisi lahan secara real-time. Arsitektur perangkat lunak hibrida yang dikembangkan dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Arsitektur Perangkat Lunak Hibrida untuk Klasifikasi Kondisi Tanah dan Rekomendasi Irigasi

Gambar 2 menunjukkan arsitektur perangkat lunak hibrida yang dikembangkan untuk mendukung proses monitoring dan rekomendasi kondisi tanah pada budidaya kakao berbasis Internet of Things (IoT). Sistem menerima data sensor secara real-time yang diperoleh dari perangkat IoT di lapangan, meliputi parameter suhu (temperature), kelembaban tanah (soil moisture), konduktivitas (conductivity), tingkat keasaman tanah (pH), serta kandungan unsur hara nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Data hasil pengukuran tersebut dikirimkan ke server cloud dan disimpan ke dalam basis data bersama informasi

pendukung lainnya seperti waktu pengukuran, hasil klasifikasi, dan riwayat rekomendasi sistem.

Pada lapisan cloud, data sensor yang tersimpan selanjutnya diproses menggunakan algoritma Support Vector Machine (SVM). Model SVM yang telah dilatih menggunakan data historis berfungsi untuk mengklasifikasikan kondisi lahan ke dalam beberapa kategori, seperti kondisi ideal, kekurangan air, atau kondisi kritis. Hasil klasifikasi ini digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam menentukan kondisi aktual lahan perkebunan kakao.

Selanjutnya, hasil klasifikasi dari model SVM diteruskan ke mesin inferensi Rule-Based System (RBS). Komponen RBS menerapkan aturan-aturan berbasis pengetahuan (IF-THEN) yang dirancang berdasarkan kebutuhan budidaya kakao untuk menghasilkan rekomendasi tindakan yang sesuai. Rekomendasi tersebut dapat berupa aktivasi sistem irigasi, penyesuaian kondisi tanah, maupun tindakan pemeliharaan lainnya berdasarkan kondisi lahan yang terdeteksi.

Selain menampilkan data monitoring secara real-time melalui antarmuka web, sistem juga mampu mengirimkan rekomendasi kepada pengguna dan mengendalikan aktuator secara otomatis melalui solenoid valve. Integrasi antara teknologi IoT, Support Vector Machine, dan Rule-Based System ini memungkinkan sistem menghasilkan proses pemantauan, klasifikasi, dan rekomendasi yang lebih akurat, adaptif, serta responsif terhadap perubahan kondisi lahan perkebunan kakao.

### Akuisisi dan Pengumpulan Data

Proses akuisisi data dilakukan menggunakan perangkat Internet of Things (IoT) yang dipasang pada lahan perkebunan kakao di Kabupaten Jembrana. Sistem terdiri atas beberapa sensor yang digunakan untuk mengukur parameter lingkungan dan kondisi tanah, yaitu sensor suhu (temperature), kelembaban tanah (soil moisture), konduktivitas listrik (electrical conductivity), tingkat keasaman tanah (pH), serta kandungan unsur hara nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Sensor-sensor tersebut terhubung dengan mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai unit pengolah data dan pengirim informasi ke server cloud melalui protokol komunikasi MQTT.

Data sensor dikumpulkan secara berkala dan disimpan dalam basis data untuk membentuk dataset yang digunakan pada proses pelatihan dan pengujian model klasifikasi. Setiap data pengamatan terdiri atas nilai parameter sensor, waktu pengukuran (timestamp), serta label kondisi lahan yang diperoleh berdasarkan hasil observasi dan validasi pakar pertanian. Dataset

kemudian melalui proses pembersihan data (data cleaning) untuk menghilangkan data yang tidak lengkap atau tidak valid sebelum digunakan pada tahap pemodelan.

Proses pelabelan data (ground truth) dilakukan melalui validasi kolaboratif dengan pakar agronomi dari lembaga riset pertanian setempat. Kriteria penentuan kelas didasarkan pada karakteristik fisik tanaman kakao yang berkorelasi langsung dengan pembacaan sensor. Kelas Ideal ditetapkan saat tanaman menunjukkan turgor daun optimal tanpa gejala cekaman air. Kelas Kering dilabeli ketika kelembaban tanah berada di bawah titik layu layu sementara yang membutuhkan suplai irigasi segera. Sedangkan kelas Kritis ditetapkan apabila terjadi anomali ekstrim seperti kombinasi pH di luar batas toleransi kakao (<5.5 atau >7.5) yang disertai defisiensi unsur hara makro (N, P, K) akut, sehingga memerlukan tindakan remediasi tanah selain pengairan.

### Pemodelan Support Vector Machine

Support Vector Machine (SVM) digunakan sebagai metode klasifikasi untuk mengidentifikasi kondisi lahan berdasarkan data sensor yang diperoleh dari perangkat IoT. SVM dipilih karena memiliki kemampuan yang baik dalam menangani data multidimensi serta mampu menghasilkan batas klasifikasi yang optimal pada data yang memiliki karakteristik non-linear.

Variabel input yang digunakan dalam penelitian ini meliputi suhu, kelembaban tanah, konduktivitas, pH, nitrogen, fosfor, dan kalium. Data tersebut direpresentasikan dalam bentuk vektor fitur sebagai berikut:

$$X = [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7]$$

dengan:

- X1 = suhu (temperature)
- X2 = kelembaban tanah (soil moisture)
- X3 = conductivity
- X4 = pH tanah
- X5 = nitrogen (N)
- X6 = fosfor (P)
- X7 = kalium (K)

Model SVM dilatih menggunakan data historis untuk menghasilkan fungsi klasifikasi yang mampu memetakan kondisi lahan ke dalam beberapa kategori, yaitu kondisi ideal, kondisi kekurangan air, dan kondisi kritis. Fungsi keputusan SVM dinyatakan sebagai:

$$f(x) = \text{sign}(\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x_i, x) + b)$$

di mana  $\alpha$  (alpha) merupakan bobot support vector,  $y_i$  merupakan label kelas,  $K(x_i, x)$  adalah fungsi kernel, dan  $b$  adalah bias model. Hasil keluaran model berupa kelas kondisi lahan yang selanjutnya

digunakan sebagai masukan bagi sistem berbasis aturan.

Untuk mengevaluasi generalisasi model, total 380 dataset dibagi secara acak menggunakan skema stratified random sampling dengan rasio 80% sebagai data latih (304 sampel) dan 20% sebagai data uji (76 sampel). Algoritma SVM diimplementasikan menggunakan kernel Radial Basis Function (RBF) untuk menangani batas keputusan non-linear yang kompleks di cloud server. Hyperparameter model dioptimalkan melalui metode Grid Search dengan Cross-Validation, menghasilkan nilai parameter regulasi  $C = 1.0$  dan parameter  $\gamma = 0.1$ , yang terbukti meminimalkan risiko overfitting selama fase pelatihan.

### Pemodelan Rule-Based System

Basis pengetahuan (knowledge base) pada Rule-Based System yang ditanam pada lapisan edge (ESP32) dirancang berdasarkan standarisasi budidaya kakao nasional dan diperkuat oleh hasil wawancara terstruktur bersama pakar sistem irigasi pertanian. Aturan IF-THEN dikembangkan untuk memastikan fail-safe mechanism di lapangan serta mempercepat responsivitas aktuator secara lokal tanpa sepenuhnya bergantung pada jaringan luar (Al-Jame & Manthila, 2026).

Hasil klasifikasi dari model SVM di sisi cloud dikirim kembali ke aplikasi monitoring dan mikrokontroler, lalu dieksekusi oleh mesin aturan real-time:

Rule 1: IF SVM\_Class = 1 (Kering) AND Daya\_Baterai > 20% THEN Aktifkan Pompa & Buka Solenoid Valve.

Rule 2: IF SVM\_Class = 0 (Ideal) THEN Matikan Pompa & Tutup Solenoid Valve.

### Skenario Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem secara fungsional maupun non-fungsional. Pengujian fungsional bertujuan untuk memastikan seluruh komponen sistem, mulai dari akuisisi data sensor, komunikasi data, klasifikasi menggunakan SVM, hingga pemberian rekomendasi berbasis aturan dapat berjalan sesuai dengan kebutuhan sistem.

Evaluasi model klasifikasi dilakukan menggunakan confusion matrix dengan metrik accuracy, precision, recall, dan F1-score. Nilai accuracy dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}$$

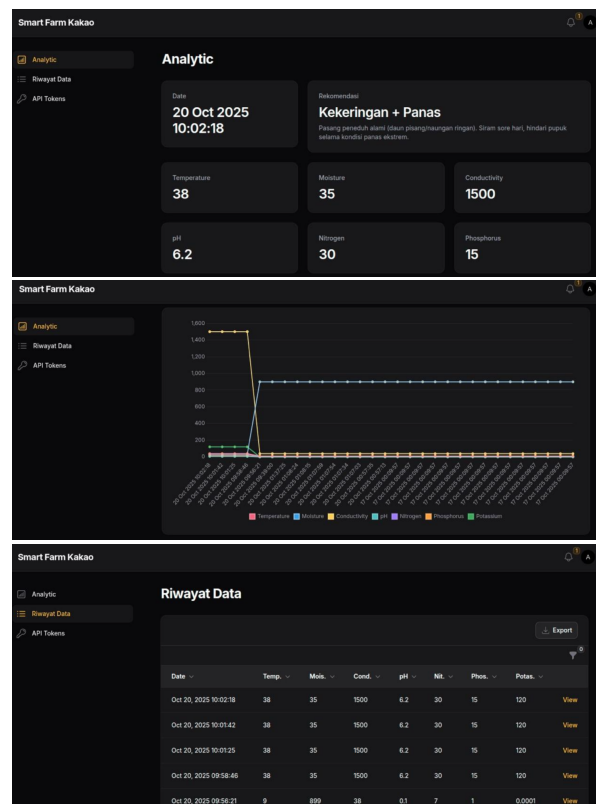
Selain itu, dilakukan pengujian latensi sistem untuk mengukur waktu yang dibutuhkan sejak data dibaca oleh sensor hingga hasil klasifikasi dan rekomendasi diterima oleh pengguna. Pengujian dilakukan selama periode operasional sistem dengan mengukur waktu transmisi data, waktu pemrosesan model SVM, dan waktu respons dashboard monitoring.

Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui tingkat akurasi model klasifikasi, keandalan Rule-Based System dalam menghasilkan rekomendasi, serta performa komunikasi data pada lingkungan perkebunan kakao yang sebenarnya. Dengan pendekatan ini, evaluasi dapat menggambarkan tingkat efektivitas sistem yang dikembangkan dalam mendukung pengelolaan irigasi dan pemantauan kondisi lahan secara real-time.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Implementasi Sistem Monitoring IoT

Sistem monitoring berhasil menampilkan data suhu, kelembaban tanah, conductivity, pH, nitrogen, fosfor, dan kalium secara real-time. Data yang diterima dari perangkat IoT disimpan ke dalam basis data dan divisualisasikan dalam bentuk tabel maupun grafik sehingga memudahkan pengguna dalam melakukan pemantauan kondisi lahan.



Gambar 3. Dashboard Aplikasi Monitoring dan Rekomendasi

### Hasil Akuisisi Data Sensor

Tabel 3. Hasil Akuisisi Data Sensor

Parameter	Satuan	Minimum	Maksimum	Rata-rata
Temperature	°C	24.5	38	30.8
Soil Moisture	%	28	82	54.6
Conductivity	µS/cm	850	1500	1187
pH Tanah	-	5.2	7.1	6.3
Nitrogen (N)	mg/kg	18	72	41
Phosphorus (P)	mg/kg	8	38	21
Potassium (K)	mg/kg	65	180	118

Visualisasi pada Tabel 3 mengindikasikan fluktuasi kondisi kesuburan tanah serta dinamika lingkungan secara periodik variasi kondisi lingkungan dan kesuburan tanah pada lahan perkebunan kakao. Nilai suhu berkisar antara 24,5°C hingga 38,0°C dengan rata-rata 30,8°C. Kondisi ini menunjukkan bahwa lingkungan pengamatan mengalami perubahan suhu yang cukup signifikan antara pagi, siang, dan sore hari.

Kelembaban tanah memiliki rentang nilai antara 28,0% hingga 82,0% dengan rata-rata 54,6%. Variasi tersebut menunjukkan adanya perubahan tingkat ketersediaan air pada lahan yang dipengaruhi oleh kondisi cuaca, penyiraman, dan kemampuan tanah dalam menyimpan air. Nilai kelembaban yang rendah umumnya menjadi indikator perlunya tindakan irigasi untuk menjaga kondisi pertumbuhan tanaman kakao.

Parameter pH tanah memiliki rata-rata sebesar 6,3 dengan rentang nilai 5,2 hingga 7,1. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar kondisi tanah berada pada kisaran yang sesuai untuk budidaya kakao. Sementara itu, kandungan unsur hara nitrogen, fosfor, dan kalium menunjukkan variasi yang cukup besar antar waktu pengamatan. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi kesuburan tanah bersifat dinamis dan memerlukan pemantauan secara berkala.

Variasi nilai pada seluruh parameter sensor menunjukkan bahwa kondisi lahan tidak dapat dievaluasi hanya berdasarkan satu parameter tunggal. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan pendekatan Support Vector Machine (SVM) untuk mengolah seluruh parameter secara simultan sehingga mampu menghasilkan klasifikasi kondisi lahan yang lebih akurat dibandingkan metode berbasis ambang batas sederhana.

### Distribusi Dataset Berdasarkan Kelas

Selanjutnya, dataset yang telah dikelompokkan ke dalam tiga kelas tersebut digunakan sebagai data latih dan data uji untuk mengevaluasi kinerja model Support Vector Machine (SVM) dalam melakukan klasifikasi kondisi lahan kakao. Hasil evaluasi model disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Distribusi Dataset Berdasarkan Kelas

Kelas	Jumlah Data	Persentase
Ideal	152	40%
Kering	128	34%
Kritis	100	26%
Total	380	100%

Tabel 4 menunjukkan distribusi data yang digunakan dalam proses pelatihan dan pengujian model Support Vector Machine (SVM). Dataset terdiri atas 380 data hasil pengamatan yang diperoleh dari perangkat IoT pada lahan perkebunan kakao. Berdasarkan hasil pelabelan, sebanyak 152 data (40%) termasuk ke dalam kategori Ideal, 128 data (34%) termasuk kategori Kering, dan 100 data (26%) termasuk kategori Kritis.

Distribusi data pada ketiga kelas relatif seimbang sehingga dapat mengurangi potensi bias model terhadap kelas tertentu. Kondisi ini penting dalam proses pembelajaran SVM karena distribusi data yang terlalu timpang (imbalanced dataset) dapat menyebabkan model cenderung memprediksi kelas mayoritas dan menurunkan kemampuan klasifikasi pada kelas minoritas.

Kelas Ideal merupakan kondisi lahan yang memiliki parameter lingkungan dan kandungan unsur hara dalam rentang yang sesuai untuk pertumbuhan tanaman kakao. Kelas Kering menunjukkan kondisi kelembaban tanah yang berada di bawah ambang batas optimal sehingga memerlukan tindakan irigasi. Sementara itu, kelas Kritis merepresentasikan kondisi lahan yang memiliki satu atau lebih parameter berada pada tingkat yang berpotensi mengganggu pertumbuhan tanaman, seperti kelembaban yang sangat rendah, pH yang tidak sesuai, atau kandungan unsur hara yang kurang mencukupi.

Hasil evaluasi detail performa model SVM dalam mengklasifikasikan 76 data uji disajikan melalui confusion matrix pada Tabel 5, diikuti dengan rincian metrik evaluasi per kelas pada Tabel 6.

**Tabel 5.** Confusion Matrix Klasifikasi Kondisi Lahan Kakao

Aktual/Prediksi	Ideal	Kering	Kritis
Ideal	30	1	0
Kering	2	23	0
Kritis	1	2	17

**Tabel 6.** Performa Metrik Klasifikasi Per Kelas

Kelas	Precision	Recall	F1-Score
Ideal	90.9%	96.8%	93.8%
Kering	88.5%	92.0%	90.2%
Kritis	100.0%	85.0%	91.9%

Berdasarkan Tabel 6, model memiliki tingkat Precision 100% pada kelas Kritis, yang berarti sistem tidak pernah salah mengidentifikasi kondisi aman sebagai kondisi kritis. Secara keseluruhan, model mencapai rata-rata akurasi sebesar 92,4%. Keberagaman data pada masing-masing kelas terbukti membantu model SVM mempelajari pola karakteristik setiap kondisi lahan dengan lebih optimal.

#### Analisis Kinerja Rule-Based System

Rule-Based System (RBS) digunakan sebagai mekanisme pengambilan keputusan untuk menerjemahkan hasil klasifikasi yang dihasilkan oleh model Support Vector Machine (SVM) menjadi rekomendasi tindakan yang dapat dieksekusi secara otomatis oleh sistem irigasi. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa setiap aturan yang telah dirancang dapat dijalankan sesuai dengan kondisi masukan yang diterima dari sistem klasifikasi.

**Tabel 7.** Hasil Pengujian Rule-Based System

No	Aturan	Jumlah Eksekusi	Berhasil	Tingkat Keberhasilan
1	Aktivasi irigasi pada kondisi kering	65	65	100%
2	Menonaktifkan irigasi pada kondisi ideal	110	110	100%
3	Rekomendasi penyesuaian pH tanah	25	25	100%
4	Rekomendasi penambahan unsur hara	32	32	100%
<b>Total</b>		232	232	100%

Berdasarkan Tabel 7, seluruh aturan yang diimplementasikan dalam sistem berhasil dieksekusi sesuai dengan kondisi yang diterima dari hasil klasifikasi SVM. Tingkat keberhasilan sebesar 100% menunjukkan bahwa mekanisme inferensi berbasis aturan mampu bekerja secara konsisten dalam menghasilkan rekomendasi maupun perintah aktuator. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan Rule-Based System masih efektif digunakan sebagai mekanisme pengambilan keputusan pada lingkungan IoT yang membutuhkan respons cepat dan transparan.

#### Pengujian Latensi Sistem

Pengujian latensi dilakukan untuk mengukur waktu yang dibutuhkan sistem mulai dari proses pembacaan data sensor hingga hasil klasifikasi dan rekomendasi diterima oleh pengguna. Pengujian dilakukan pada kondisi operasional normal dengan koneksi jaringan yang stabil.

**Tabel 8.** Hasil Pengujian Latensi Sistem

Pengujian	Latensi (detik)
1	2.1
2	2.3
3	2.7
4	2.4
5	2.5
<b>Rata-rata</b>	<b>2.4</b>

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 8, diperoleh rata-rata latensi sistem sebesar 2,4 detik. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses pengiriman data dari perangkat IoT menuju server cloud, proses klasifikasi menggunakan SVM, hingga penyajian hasil pada dashboard monitoring dapat berlangsung dalam waktu yang relatif singkat. Dengan latensi yang rendah, sistem mampu mendukung kebutuhan monitoring dan pengambilan keputusan irigasi secara real-time pada lahan perkebunan kakao.

#### Analisis Kontribusi Pendekatan Hibrida SVM-RBS

Penelitian ini mengusulkan pendekatan hibrida yang mengintegrasikan Support Vector Machine (SVM) dan Rule-Based System (RBS) dalam satu arsitektur monitoring dan rekomendasi berbasis IoT. Integrasi kedua metode tersebut dilakukan untuk menggabungkan keunggulan masing-masing pendekatan sehingga mampu menghasilkan sistem yang lebih adaptif dan responsif.

**Tabel 9.** Analisis Kontribusi Pendekatan Hibrida SVM-RBS

Pendekatan	Kelebihan	Keterbatasan
SVM	Akurasi klasifikasi tinggi dan mampu mengenali pola non-linear	Membutuhkan proses komputasi yang lebih tinggi
Rule-Based System	Cepat, mudah dipahami, dan transparan	Sulit menangani pola data yang kompleks
Hybrid SVM-RBS	Akurat, adaptif, dan responsif	Implementasi lebih kompleks

Model SVM berperan dalam mengidentifikasi pola hubungan antar parameter lingkungan yang sulit ditentukan menggunakan aturan statis. Dengan memanfaatkan data suhu, kelembaban, pH, conductivity, nitrogen, fosfor, dan kalium secara bersamaan, model mampu menghasilkan klasifikasi kondisi lahan dengan tingkat akurasi sebesar 92,4%.

Di sisi lain, Rule-Based System digunakan untuk mengubah hasil klasifikasi menjadi rekomendasi tindakan yang dapat dipahami pengguna maupun dieksekusi secara otomatis oleh aktuator. Pendekatan ini memungkinkan sistem menghasilkan keputusan yang cepat tanpa harus melakukan proses komputasi ulang yang kompleks.

Integrasi kedua metode tersebut menghasilkan sistem yang tidak hanya memiliki kemampuan analisis yang baik, tetapi juga mampu memberikan respons secara real-time. Oleh karena itu, pendekatan hibrida yang diusulkan memiliki potensi yang lebih baik dibandingkan penggunaan metode SVM atau Rule-Based System secara terpisah.

#### Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Untuk mengevaluasi kontribusi penelitian yang diusulkan, dilakukan perbandingan terhadap beberapa penelitian terdahulu yang menerapkan teknologi IoT dan Machine Learning pada bidang pertanian cerdas.

**Tabel 10.** Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Sebelumnya

Penelitian	Metode	Akurasi
Rezk et al. (2021)	SVM berbasis IoT	88.1%
Putra et al. (2024)	Machine Learning berbasis IoT	89.6%

Sari dan Kusumanto (2023)	Rule-Based System	-
Penelitian ini	Hybrid SVM-RBS	92.4%

Berdasarkan Tabel 9, penelitian yang diusulkan memperoleh tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan beberapa penelitian sebelumnya. Selain menghasilkan akurasi klasifikasi yang baik, penelitian ini juga menawarkan mekanisme rekomendasi berbasis Rule-Based System yang dapat digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan secara otomatis pada sistem irigasi.

Keunggulan utama penelitian ini terletak pada integrasi antara kemampuan klasifikasi SVM dan kemampuan inferensi Rule-Based System dalam satu arsitektur IoT. Kombinasi tersebut memungkinkan sistem tidak hanya melakukan monitoring kondisi lahan secara real-time, tetapi juga memberikan rekomendasi yang sesuai dengan kondisi aktual lahan. Dengan demikian, pendekatan yang diusulkan berpotensi meningkatkan efisiensi pengelolaan air dan mendukung implementasi pertanian cerdas yang berkelanjutan.

#### Keterbatasan Penelitian

Meskipun arsitektur hibrida ini menunjukkan performa akurasi dan latensi yang sangat baik, terdapat beberapa keterbatasan operasional yang perlu diperhatikan. Pertama, keandalan klasifikasi sistem ini sepenuhnya bergantung pada akurasi dan kalibrasi periodik dari sensor fisik di lapangan, di mana degradasi sensitivitas sensor tanah akibat laju oksidasi dapat menurunkan kualitas raw data. Kedua, transmisi data menggunakan LoRa dapat mengalami attenuasi sinyal (redaman) yang signifikan apabila kanopi pohon kakao di area perkebunan sudah terlalu rimbun dan padat. Terakhir, pengumpulan dataset dalam penelitian ini masih terbatas pada satu karakteristik iklim mikro lahan di Kabupaten Jembrana, sehingga generalisasi model pada jenis tanah atau topografi yang berbeda memerlukan fase fine-tuning atau pelatihan ulang (retraining) model SVM menggunakan data lokal yang baru.

#### KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem monitoring dan rekomendasi kondisi tanah pada budidaya kakao berbasis Internet of Things (IoT) dengan mengintegrasikan metode Support Vector Machine (SVM) dan Rule-Based System (RBS).

Sistem mampu mengakuisisi data suhu, kelembaban tanah, konduktivitas, pH, serta kandungan unsur hara nitrogen, fosfor, dan kalium secara real-time untuk mendukung proses klasifikasi kondisi lahan dan pengambilan keputusan irigasi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa model SVM mampu mengklasifikasikan kondisi lahan dengan tingkat akurasi sebesar 92.4%, precision sebesar 91.0%, dan recall sebesar 93.5%. Selain itu, Rule-Based System berhasil menerjemahkan hasil klasifikasi menjadi rekomendasi tindakan yang sesuai dengan tingkat keberhasilan eksekusi aturan mencapai 100%. Pengujian performa sistem juga menunjukkan rata-rata latensi sebesar 2.4 detik sehingga sistem mampu memberikan respons yang cepat dalam mendukung monitoring dan pengendalian lahan secara real-time.

Berdasarkan hasil tersebut, pendekatan hibrida SVM-RBS terbukti efektif dalam meningkatkan kemampuan identifikasi kondisi lahan sekaligus menghasilkan rekomendasi yang adaptif dan responsif. Integrasi Machine Learning dan Rule-Based System yang diusulkan berpotensi menjadi solusi pendukung implementasi smart farming pada budidaya kakao untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan lahan dan penggunaan sumber daya air secara berkelanjutan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Al-Jame, F., & Manthila, P. (2026). AI-Driven Smart Irrigation System Using Edge-Based Embedded Controllers. *Progress in Electronics and Communication Engineering*, 3(2), 23-30.
- Badshah, A., Alkazemi, B. Y., Din, F., Zamli, K. Z., & Haris, M. (2024). Crop Classification and Yield Prediction using Robust Machine Learning Models for Agricultural Sustainability. *IEEE Access*.
- Dhanaraju, M., Chenniappan, P., Ramalingam, K., Pazhanivelan, S., & Kaliaperumal, R. (2022). Smart farming: Internet of Things (IoT)-based sustainable agriculture. *Agriculture*, 12(10), 1745.  
<https://doi.org/10.3390/agriculture12101745>
- Gamage, T. A., & Perera, I. (2024). Optimizing Energy Efficient Cloud Architectures for Edge Computing: A Comprehensive Review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 15(11).
- Kumar, V., Sharma, K. V., Kedam, N., Patel, A., Kate, T. R., & Rathnayake, U. (2024). A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100487.  
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100487>
- Prasetyo, A., Litanianda, Y., Fadelan, F., Yusuf, A. R., & Sugianti, S. (2022). Irrigation control using fuzzy logic on the internet of things agriculture system. *CESS (Journal of Computing*

*Engineering, System and Science)*, 7(2), 572-580.

- Putra, P. H., Julham, Nurlinda, & Dhitisari, I. (2024). Inovasi Smart Farming Optimalisasi Bawang Merah. *Journal of Science and Social Research*, 7(4), 1788–1792.
- Rezk, N. G., Hemdan, E. E. D., Attia, A. F., El-Sayed, A., & El-Rashidy, M. A. (2021). An efficient IoT based smart farming system using machine learning algorithms. *Multimedia Tools and Applications*, 80(1), 773-797.
- Sari, D. P., & Kusumanto, R. D. (2024). Sistem Kendali Irigasi Otomatis Pada Pertanian Hidroponik Vertikal Dengan Metode Internet of Things (IoT). *Journal of Applied Smart Electrical Network and Systems (JASENS)*, 4(2), 60–66.
- Setiawan, M. A., & Sulistiyasni. (2024). Smart IoT-Based Hydroponic Rice Farming System in Urban Areas to Enhance Food Security for the Community Sistem Pertanian Hidroponik Padi Cerdas Berbasis IoT pada Lahan Urban / Perkotaan Guna Menambah Ketahanan Pangan Masyarakat. *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, 4(1), 118–129.  
<https://doi.org/10.57152/malcom.v4i1.973>