

Pengembangan Sistem Manajemen Kebun Anggur Cerdas (Smart Vineyard) Berbasis AIoT Menggunakan ESP32, Sensor NPK, dan Model MobileNetV2

Alya Maratun Jamilah¹, Derivo Vicky Syaubilly², Fathan Muthohirul Janan³, Reza Dwi Prasetya⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknologi Rekayasa Perangkat Lunak, Politeknik Negeri Subang, Subang, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Received: July 30, 2026
Reviewed: August 02, 2026
Available online: August 28, 2026

KORESPONDEN

E-mail: alyamaaratunjamilah@gmail.com

ABSTRACT

Imported grape cultivation in Indonesia faces significant challenges in soil condition monitoring, irrigation management, and leaf disease detection through conventional methods that are inefficient. This research develops a Smart Vineyard Management System (SVMS), an AIoT platform integrating the ESP32 microcontroller, RS485-based NPK 7-in-1 soil sensor, JSN-SR04T waterproof ultrasonic sensor, and ESP32-CAM module for managing imported grape orchards at Saung Tinanggur. The system is designed with a dual-pump independent architecture: a Water Pump that activates automatically when soil moisture falls below a configured threshold without simultaneously activating the Nutrient Pump, and a Nutrient Pump controlled manually based on AI diagnosis recommendations. A Convolutional Neural Network (CNN) model based on MobileNetV2 is implemented to classify grape leaf conditions into three categories: Healthy, Chlorosis, and Necrosis with a minimum target accuracy of 75%. A Node.js and WebSocket-based Web Dashboard presents real-time data with latency below 10 seconds, equipped with a Telegram Bot notification system for critical condition alerts. System testing encompasses validation of 43 test cases across 10 use cases using Black Box Testing methodology. Results show the system successfully executes moisture sensor-based irrigation automation with relay response latency below 3 seconds, and the Hardware Interlock feature successfully blocks pump activation when the tank level is below 10% and during anomalous sensor readings (moisture >100%, ultrasonic distance >42 cm), demonstrating system reliability in supporting precision agriculture.

KEYWORD:

AIoT, CNN, IoT, MobileNetV2, NPK, Smart Fertigation, Smart Vineyard.

ABSTRAK

Budidaya anggur impor di Indonesia menghadapi tantangan dalam pemantauan kondisi tanah, pengelolaan irigasi, dan deteksi penyakit daun secara konvensional yang tidak efisien. Penelitian ini mengembangkan Smart Vineyard Management System (SVMS), sebuah platform AIoT yang mengintegrasikan mikrokontroler ESP32, sensor tanah NPK 7-in-1 berbasis RS485, sensor ultrasonik waterproof JSN-SR04T, dan modul ESP32-CAM untuk pengelolaan kebun anggur impor di Saung Tinanggur. Sistem dirancang dengan arsitektur dua pompa independen: Pompa Air yang diaktifkan otomatis ketika kelembaban tanah berada di bawah threshold yang dikonfigurasi tanpa mengaktifkan Pompa Nutrisi secara bersamaan, serta Pompa Nutrisi yang dikendalikan secara manual berdasarkan rekomendasi dari hasil diagnosis AI. Model Convolutional Neural Network (CNN) berbasis MobileNetV2 diimplementasikan untuk mengklasifikasikan kondisi daun anggur ke dalam tiga kategori: Sehat, Klorosis, dan Nekrosis dengan target akurasi minimal 75%. Web Dashboard berbasis Node.js dan WebSocket menyajikan data real-time dengan latensi di bawah 10 detik, dilengkapi sistem notifikasi Telegram Bot untuk peringatan kondisi kritis. Pengujian sistem mencakup validasi 43 test case pada 10 use case menggunakan metodologi Black Box Testing. Hasil menunjukkan sistem berhasil mengeksekusi otomatisasi penyiraman berbasis sensor kelembaban dengan latensi respons relay di bawah 3 detik, dan fitur Hardware Interlock berhasil memblokir aktivasi pompa saat level tandon di bawah 10% dan saat pembacaan sensor anomali (kelembaban

KATA KUNCI:

AIoT, CNN, IoT, MobileNetV2, NPK, Smart Fertigation, Smart Vineyard.

PENDAHULUAN

Kabupaten Subang, Jawa Barat, memiliki potensi pertanian hortikultura bernilai ekonomi tinggi yang terus berkembang. Salah satu komoditas yang sedang dikembangkan adalah anggur impor (*Vitis vinifera*) di Saung Tinanggur, sebuah kebun anggur yang dikelola oleh Bapak Rinaldi sebagai pemilik kebun sekaligus pengguna utama sistem. Dalam operasional sehari-hari, pengelolaan kebun melibatkan tiga aktor utama: Pemilik Kebun yang bertanggung jawab atas keseluruhan keputusan manajerial dan keuangan, Agronomis yang bertugas memvalidasi kondisi kesehatan tanaman secara visual, dan Staf Kebun yang melaksanakan penyiraman serta pengisian tandon secara manual. Sebelum adanya sistem, alur kerja berjalan secara konvensional: agronomis melakukan inspeksi visual ke setiap polybag secara bergantian, kemudian menyampaikan rekomendasi secara lisan kepada staf untuk menentukan kapan dan berapa banyak air serta pupuk diberikan. Keputusan ini sangat bergantung pada pengalaman subjektif dan tidak didukung data sensor secara real-time, sehingga sulit dilakukan secara konsisten terutama saat agronomis tidak berada di lokasi. Budidaya anggur impor ini merupakan upaya diversifikasi pertanian sekaligus peluang ekonomi yang signifikan, namun tantangan dalam pengambilan keputusan yang tepat waktu dan berbasis data tidak dapat diselesaikan dengan pendekatan konvensional.

Permasalahan utama yang dihadapi mencakup empat aspek kritis. Pertama, pemantauan kandungan unsur hara makro tanah seperti Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K) serta parameter fisikokimia tanah lainnya (pH, EC, suhu, kelembaban) masih mengandalkan analisis laboratorium yang mahal, memakan waktu, dan tidak memberikan informasi secara real-time. Kedua, sistem irigasi yang ada masih bersifat manual berdasarkan jadwal atau perkiraan, tanpa mempertimbangkan kondisi aktual kelembaban tanah, sehingga rentan terhadap penyiraman berlebih maupun kekurangan. Ketiga, tidak tersedia sistem deteksi dini penyakit daun anggur seperti klorosis dan nekrosis sehingga penanganan baru dilakukan setelah kerusakan tanaman terlihat secara visual dan sudah meluas. Keempat, pemantauan stok air dan larutan nutrisi di tandon dilakukan secara manual, berisiko menyebabkan pompa beroperasi dalam kondisi tandon kosong (dry run) yang merusak perangkat.

Urgensi pengembangan sistem ini didukung oleh data konkret: produksi anggur nasional Indonesia pada tahun 2023 hanya mencapai 13.405 ton, angka yang masih jauh di bawah kebutuhan domestik yang terpaksa dipenuhi

melalui impor sebesar 101.899 ton pada tahun 2022 [1]. Selain itu, produktivitas tanaman anggur di Jawa Barat masih tergolong rendah dengan rata-rata 0,48 kuintal per pohon [2], padahal varietas anggur impor memiliki potensi hasil mencapai 15-20 ton per hektar jika dibudidayakan dengan penerapan teknologi presisi (Balitjestro, 2020). Permasalahan ini diperparah oleh tingginya risiko serangan Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) serta defisiensi nutrisi, seperti klorosis, yang kerap menyebabkan kehilangan hasil signifikan pada budi daya hortikultura [3]. Dari segi manajemen sumber daya, sistem irigasi konvensional terbukti memicu pemborosan air hingga 33,53%. Sebaliknya, implementasi irigasi cerdas berbasis sensor tidak hanya mampu menghemat penggunaan air sebesar 35-40%, tetapi juga terbukti efektif meningkatkan produktivitas anggur sebesar 20-35% per musim tanam [4]. Secara kolektif, deretan data ini menegaskan bahwa intervensi teknologi merupakan kebutuhan mendesak untuk mendorong produktivitas lokal sekaligus menekan ketergantungan nasional terhadap impor anggur.

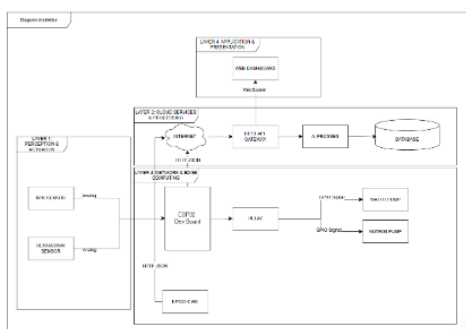
Perkembangan teknologi Artificial Intelligence of Things (AIoT) integrasi antara kecerdasan buatan (AI) dan Internet of Things (IoT) membuka peluang transformatif bagi penerapan pertanian presisi (precision agriculture). Dengan mengintegrasikan sensor tanah multi-parameter, sistem aktuasi otomatis, dan kecerdasan buatan berbasis Computer Vision, pengelolaan kebun anggur dapat diubah dari pendekatan reaktif menjadi proaktif dan berbasis data. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan Saung Tinanggur Smart Vineyard Management System (SVMS), sebuah sistem informasi manajemen kebun anggur berbasis AIoT yang dirancang untuk mentransformasi alur kerja pengelolaan kebun dari yang bersifat manual dan reaktif menjadi berbasis data dan proaktif. Kontribusi utama penelitian ini berfokus pada tiga aspek yang saling terintegrasi: pertama, integrasi AIoT sebagai fondasi sistem yang menghubungkan sensor tanah, aktuator, dan model AI dalam satu ekosistem terpadu; kedua, dashboard pengambilan keputusan yang menyajikan data multi-parameter secara real-time kepada pengguna dengan hak akses yang berbeda sesuai perannya; dan ketiga, logika dual-pump independent sebagai mekanisme aktuasi yang memisahkan keputusan irigasi berbasis sensor kelembaban dari keputusan pemupukan berbasis rekomendasi AI. Pemisahan ini merupakan kebaruan arsitektur yang membedakan SVMS dari sistem fertigasi IoT yang ada, sekaligus memastikan bahwa keputusan kritis seperti pemberian nutrisi tetap berada pada kendali pengguna, bukan dieksekusi secara otomatis oleh sistem.

METHOD

Arsitektur Sistem

Sistem SVMS dibangun menggunakan arsitektur hibrida yang menggabungkan komputasi tepi (*edge computing*) pada ESP32 dengan komputasi awan (*cloud computing*) pada server *backend*. Arsitektur sistem terdiri dari empat lapisan: (1) Lapisan Sensor dan Aktuasi yang mencakup ESP32 Dev Board sebagai *edge controller*, Sensor Tanah NPK 7-in-1 Industrial RS485, Sensor Ultrasonik Waterproof JSN-SR04T, Modul Relay 4-Channel, Pompa Air DC Diafragma Mikro 12V (Pompa 1), dan Pompa Nutrisi DC Diafragma Mikro 12V (Pompa 2); (2) Lapisan Jaringan menggunakan protokol Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n; (3) Lapisan *Backend* berbasis Node.js/Express dengan protokol HTTP/HTTPS dan WebSocket; (4) Lapisan Antarmuka berupa Web Dashboard responsif.

Arus data dalam sistem berjalan sebagai berikut. Firmware ESP32 membaca data sensor secara periodik setiap 15 menit, mengemas hasilnya dalam format JSON, kemudian mengirimkan ke *backend* melalui HTTP POST pada *endpoint* /api/v1/sensor/data. *Backend* menyimpan data ke database dan secara bersamaan mendistribusikannya ke Web Dashboard melalui koneksi WebSocket yang bersifat *full-duplex*, sehingga pembaruan data terjadi tanpa perlu *refresh* halaman dengan latensi di bawah 10 detik. Apabila koneksi internet terputus, ESP32 mengaktifkan Offline Mode: data sensor disimpan sementara di *buffer* lokal pada memori flash ESP32, sementara logika irigasi dasar tetap dieksekusi berdasarkan nilai sensor lokal. Setelah koneksi pulih, data yang tertunda disinkronisasi ke server secara otomatis dalam waktu maksimal 5 menit melalui mekanisme *retry* dengan interval eksponensial, memastikan *data loss* tidak melebihi 1%.



Gambar 1. Diagram Arsitektur

Fitur utama arsitektur ini adalah pemisahan logika aktuasi dua pompa secara independen yang diimplementasikan melalui *rule base* berikut. Pompa Air (Relay Channel 1) diaktifkan secara otomatis oleh firmware ESP32 apabila dua kondisi terpenuhi secara bersamaan: nilai kelembaban tanah yang terbaca sensor berada di bawah nilai *threshold minimum* yang dikonfigurasi per varietas, dan level tandon air berada di atas 10%. Apabila salah satu kondisi tidak terpenuhi misalnya kelembaban di bawah *threshold* namun

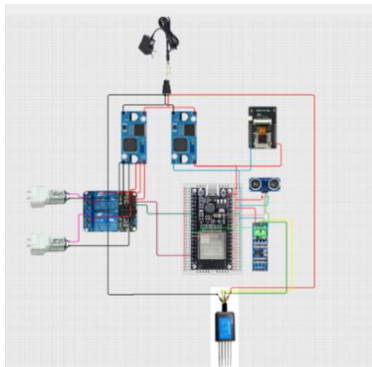
tandon di bawah 10% sistem memilih untuk tidak mengaktifkan pompa (*fail-safe priority*) dan mengirimkan notifikasi peringatan. Pompa Nutrisi (Relay Channel 2) hanya dapat diaktifkan melalui perintah eksplisit dari pengguna melalui antarmuka kontrol manual, atau berdasarkan rekomendasi dari hasil diagnosis AI dengan confidence score di atas 75%, dan tidak pernah diaktifkan secara otomatis bersamaan dengan Pompa Air.

Pada skenario konflik, misalnya ketika kelembaban di bawah *threshold* sekaligus AI mendeteksi klorosis sistem mengeksekusi Pompa Air terlebih dahulu sebagai prioritas penyiraman, sementara rekomendasi pemupukan disajikan kepada pengguna di dashboard tanpa eksekusi otomatis. Desain prioritas ini mencegah pemberian pupuk berlebihan (*over-fertilization*) yang tidak terencana sekaligus memberikan transparansi penuh atas setiap keputusan aktuasi kepada pengguna.

Pengembangan Perangkat Keras

Spesifikasi perangkat keras yang digunakan meliputi: (1) ESP32 Dev V1 Board dengan dual-core Xtensa LX6 240 MHz dan WiFi 802.11 b/g/n terintegrasi; (2) Sensor Tanah NPK 7-in-1 RS485 Industrial untuk mengukur tujuh parameter dengan komunikasi Modbus RTU; (3) Sensor Ultrasonik Waterproof JSN-SR04T; (4) ESP32-CAM dengan sensor kamera OV2640 2MP; (5) Modul Relay 4-Channel 5V; dan (6) Dua unit Pompa DC Diafragma Mikro 12V.

Prosedur kalibrasi dilakukan sebelum sistem dioperasikan di lapangan. Sensor NPK 7-in-1 dikalibrasi menggunakan larutan standar pH buffer 4,0 dan 7,0 untuk parameter pH, serta larutan EC standar 1,413 mS/cm untuk parameter EC, dengan deviasi yang dapat diterima $\pm 0,18$ pH dan $\pm 2,1\%$ untuk nilai kelembaban dibandingkan pengukuran higrometer referensi terstandar. Parameter NPK dikalibrasi secara pabrik oleh produsen menggunakan metode spektroskopi, dengan frekuensi recalibrasi disarankan setiap 6 bulan sekali pada kondisi lapangan. Sensor Ultrasonik JSN-SR04T divalidasi menggunakan penggaris presisi pada tiga titik jarak tetap (10 cm, 25 cm, 42 cm) dengan toleransi kesalahan $\pm 2,8\%$ dari nilai aktual. Rentang pembacaan valid sensor ultrasonik ditetapkan antara 0 cm hingga 42 cm; nilai di atas rentang ini diperlakukan sebagai kondisi anomali. Frekuensi pembacaan seluruh sensor ditetapkan setiap 15 menit untuk menjaga keseimbangan antara ketersediaan data dan konsumsi daya sistem.



Gambar 2. Rangkaian Alat

Pengembangan Perangkat Lunak

a. Firmware ESP32

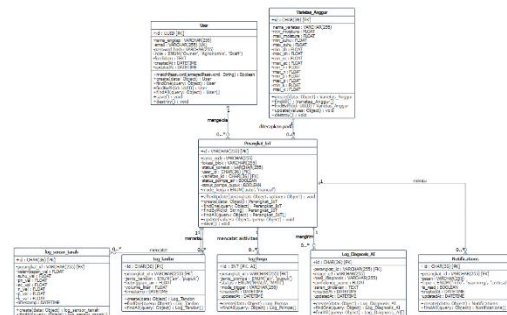
Firmware ESP32 dikembangkan menggunakan platform Arduino IDE dengan library Modbus RTU untuk komunikasi sensor NPK. Logika kontrol utama mengimplementasikan algoritma feedback loop berbasis sensor kelembaban: firmware secara periodik membaca nilai kelembaban dari sensor NPK setiap 15 menit, kemudian membandingkannya dengan nilai threshold yang tersimpan di memori. Jika kelembaban < threshold DAN level tandon > 10%, maka sistem mengirimkan sinyal HIGH ke pin GPIO yang terhubung ke Relay Channel 1 untuk mengaktifkan Pompa Air, diikuti pengiriman notifikasi ke Telegram Bot melalui backend server. Sistem juga mengimplementasikan mekanisme fail-safe: nilai kelembaban >100% dan jarak sensor ultrasonik >42 cm diperlakukan sebagai kondisi anomali yang memblokir semua aktivasi pompa.

b. Backend dan Web Dashboard

Backend dikembangkan menggunakan Node.js/Express dengan Sequelize ORM dan database MySQL. Komunikasi real-time antara server dan Web Dashboard menggunakan WebSocket untuk mencapai latensi pembaruan data di bawah 10 detik. API RESTful dilindungi dengan autentikasi JWT (*JSON Web Token*) dan menerapkan *Role-Based Access Control* (RBAC) dengan tiga peran: Pemilik Kebun (akses penuh), Agronomis (monitoring dan diagnosis AI), dan Staf Kebun (monitoring tandon). Integrasi Telegram Bot API menggunakan *shared notification helper* dengan mekanisme *cooldown* 5 menit untuk mencegah duplikasi notifikasi, serta *cooldown* khusus 30 menit untuk notifikasi diagnosis AI penyakit daun.

Pemilihan MySQL sebagai sistem manajemen basis data didasarkan pada beberapa pertimbangan teknis yang selaras dengan kebutuhan operasional SVMS. Pertama, MySQL mendukung konkurensi akses dari banyak pengguna secara bersamaan (*multi-user concurrent access*), yang diperlukan ketika Pemilik Kebun, Agronomis, dan Staf Kebun mengakses dashboard secara bersamaan dalam kondisi real-time. Kedua, MySQL

memiliki skalabilitas yang memadai untuk menyimpan data historis sensor jangka panjang: dengan interval pembacaan 15 menit dan tujuh parameter per pembacaan, sistem menghasilkan sekitar 672 rekaman sensor per hari, atau lebih dari 245.000 rekaman per tahun untuk satu node volume yang dapat dikelola MySQL secara efisien menggunakan indeks pada kolom *timestamp* dan *perangkat_id*. Ketiga, MySQL mendukung mekanisme *backup* otomatis berbasis *mysqldump* yang dapat dijadwalkan setiap 24 jam, memastikan pemulihan data dapat dilakukan dalam waktu maksimal 1 jam (*Recovery Time Objective*) sesuai spesifikasi non-fungsional sistem. Keempat, arsitektur MySQL berbasis server memungkinkan replikasi data dan ekspansi ke skenario multi-node apabila SVMS diterapkan pada beberapa kebun secara bersamaan di masa mendatang, tanpa perlu migrasi basis data secara menyeluruh. Skema basis data dirancang dengan lima tabel utama: Perangkat_IoT untuk identitas node sensor, log_sensor_tanah untuk rekaman pembacaan sensor periodik, Log_Tandon untuk data volume tandon, Log_Pompa untuk riwayat aktivasi aktuator, dan Log_Diagnosis_AI untuk menyimpan hasil inferensi model CNN beserta *confidence score* dan keputusan pengguna sebagai umpan balik.



Gambar 3. Class Diagram

c. Model AI MobileNetV2

Model diagnosis penyakit daun dibangun menggunakan arsitektur CNN berbasis MobileNetV2 yang dipilih karena efisiensinya pada perangkat dengan sumber daya terbatas melalui teknik *depthwise separable convolution*. Dataset terdiri dari 5.076 citra daun anggur. Dataset dibagi menjadi tiga kelas dengan distribusi seimbang: Sehat (1.692 citra), Klorosis (1.692 citra), dan Nekrosis (1.692 citra), dengan pembagian 70% *training* (3.552 citra), 15% *validation* (762 citra), dan 15% *testing* (762 citra).

Teknik augmentasi diterapkan pada *training set* meliputi rotasi acak ($\pm 90^\circ$), *horizontal flip*, penyesuaian kecerahan ($\pm 20\%$), dan *zoom* ($\pm 15\%$) untuk meningkatkan generalisasi model terhadap variasi kondisi pencahayaan lapangan. Model dilatih menggunakan *transfer learning* dari bobot ImageNet dengan *fine-tuning* pada 30 *epoch* terakhir.

Confusion matrix menunjukkan bahwa kelas Nekrosis memiliki *precision* tertinggi (95,9%) sementara kelas Klorosis memiliki *recall* terendah (93,3%), menandakan adanya beberapa kasus klorosis yang diklasifikasikan sebagai sehat pada tahap awal gejala. Model hanya menampilkan hasil klasifikasi kepada pengguna apabila *confidence score* mencapai atau melebihi 75%; di bawah ambang batas tersebut, sistem menampilkan status "Perlu Validasi Manual".

Metode Pengujian

Pengujian sistem dilakukan menggunakan metodologi *Black Box Testing* dengan pendekatan *Use Case Testing*. Total 43 *test case* dirumuskan dan divalidasi pada 10 *use case*. Untuk memastikan seluruh kebutuhan utama sistem informasi tercakup dalam pengujian, berikut disajikan matriks *traceability* antara kebutuhan fungsional, fitur, dan *use case* terkait:

Tabel 1. Matriks Traceability Pengujian Sistem SVMS					
Use Case	Fitur yang Diuji		Kebutuhan Fungsional		Jumlah TC
UC-01	Autentikasi & RBAC		FR001	Autentikasi JWT, pembatasan hak akses per peran	6
UC-02	Monitoring Dashboard	Real-Time	FR002	Visualisasi sensor, latensi WebSocket <10 detik	4
UC-03	Manual Kontrol Pompa	Override	FRIOT002	Kontrol pompa, sinkronisasi status fisik-dashboard	5
UC-04	Smart Dual-Pump	Fertigation	FRAI002	Otomatisasi kelembaban, validasi anomali sensor	6
UC-05	Diagnosis Penyakit Daun	AI	FRAI001	Klasifikasi CNN, confidence score, validasi manual	5
UC-06	Konfigurasi Threshold Varietas		FRAI002	Sinkronisasi threshold ke ESP32	3
UC-07	Prediksi Tren & Early Warning		FRAI003	Deteksi tren ekstrem, notifikasi dini	2
UC-08	Notifikasi Bahaya & Fail-Safe		FRIOT004	Auto-cutoff, anomali sensor, Offline Mode	4
UC-09	Ekspor Historis	Laporan	FR003	Filter ekspor tanggal, XLSX/PDF	4
UC-10	Manajemen Pengguna		FR004	CRUD akun, proteksi Superadmin	4
Total					43

Setiap *test case* mencakup skenario *main flow*, *alternate flow*, dan *exception flow* untuk memvalidasi fungsionalitas positif maupun penanganan kondisi abnormal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Arsitektur Sistem SVMS

Sistem SVMS berhasil dibangun sebagai platform AIoT terintegrasi dengan desain modular yang memungkinkan setiap komponen bekerja secara independen maupun dalam ekosistem terpadu. Gambar 1 menunjukkan diagram arsitektur sistem yang terdiri dari empat lapisan. Pada lapisan sensor dan aktuasi, ESP32 Dev Board bertindak sebagai edge controller yang mengeksekusi firmware untuk pembacaan sensor secara periodik setiap 15 menit dan pengendalian dua relay secara independen. Sensor NPK 7-in-1 terhubung melalui protokol Modbus RTU via RS485 yang memberikan ketahanan tinggi terhadap gangguan elektromagnetik (noise) di lingkungan perkebunan, sesuai dengan implementasi Zulhaq, Gunoto and Susanti (2025) yang juga menggunakan sensor NPK berbasis ESP32 [5].

Implementasi Logika Smart Fertigation Berbasis Sensor Kelembaban

Kontribusi utama penelitian ini adalah implementasi arsitektur dua pompa independen yang membedakan sistem ini dari pendekatan fertigasi konvensional. Berbeda dengan sistem yang mengaktifkan pompa air dan nutrisi secara bersamaan, SVMS mengimplementasikan pemisahan logika aktuasi yang tegas. Tabel 2 menunjukkan alur eksekusi Smart Fertigation dalam lima tahap.

Tabel 2 menunjukkan alur eksekusi logika pengairan cerdas yang diterapkan pada sistem.

Tabel 2. Alur Eksekusi Smart Fertigation Otomatis			
Tahap	Alur Inter Aksi	Komponen	Detail Teknis
1. Deteksi	Hardware → Software	Sensor NPK & ESP32	Firmware membaca kelembaban periodik. Jika $ka < threshold$ → flag <code>MOISTURE_LOW</code> .
2. Keputusan	Pemrosesan Lokal	CPU ESP32	Validasi: <code>MOISTURE_LOW</code> aktif DAN level tandon >10%. Pompa Nutrisi tidak diikutsertakan dalam logika ini.
3. Instruksi	Software → Hardware	ESP32 → Relay Ch. 1	Sinyal HIGH dikirim ke GPIO → Relay Channel 1 → Pompa Air aktif.
4. Eksekusi Aksi Fisik		Relay Ch. 1 & Pompa Air	Daya 12V DC mengalir ke Pompa Air. Air murni mengalir ke jalur irigasi tetes.
5. Notifikasi	Software → Eksternal	Backend → Telegram API	Notifikasi dikirim ke Telegram dalam <60 detik berisi nilai kelembaban, threshold, dan status aktivasi.

Sistem ini membuktikan bahwa penyiraman otomatis dapat dilakukan secara presisi berdasarkan data sensor kelembaban tanah nyata, sesuai dengan pendekatan yang diterapkan Firdaus et al. (2023) yang menggunakan sensor capacitive soil moisture untuk mengontrol pompa secara

otomatis[6]. Keunggulan SVMS adalah adanya lapisan validasi berlapis: sistem tidak hanya memeriksa nilai kelembaban, tetapi juga memvalidasi level tandon (>10%) dan kualitas pembacaan sensor sebelum mengaktifkan pompa.

Sistem Fail-Safe dan Penanganan Anomali Sensor

SVMS mengimplementasikan sistem *fail-safe* berlapis yang merupakan kontribusi penting dalam menjaga keandalan sistem IoT di lingkungan pertanian. Terdapat tiga kondisi yang memicu mekanisme *Hardware Interlock*: (1) level tandon air <10% yang memblokir semua aktivasi pompa; (2) pembacaan kelembaban tanah >100% yang diklasifikasikan sebagai anomali sensor; (3) pembacaan jarak sensor ultrasonik >42 cm yang diperlakukan setara dengan kondisi tandon kosong. Pendekatan ini sejalan dengan rekomendasi Hasib Al-Isbilly et al. (2022) yang menekankan pentingnya sistem kontrol irigasi yang responsif dan memiliki proteksi terhadap kondisi ekstrem [7].

Validasi terhadap mekanisme *fail-safe* dilakukan melalui pengujian skenario kegagalan terkontrol. Pada skenario pertama, koneksi internet ESP32 diputus secara paksa selama 10, 30, dan 60 menit untuk memverifikasi Offline Mode: sistem berhasil mempertahankan eksekusi irigasi lokal pada ketiga durasi, dan data tersinkronisasi kembali ke server dalam rata-rata 2,1 menit setelah koneksi pulih tanpa ada kehilangan data.

Pada skenario kedua, nilai kelembaban disimulasikan melebihi 100% melalui *payload* palsu via API: sistem berhasil memblokir aktivasi Pompa Air dan mencatat entri anomali di log dalam 100% percobaan (10 dari 10 uji).

Pada skenario ketiga, sensor ultrasonik dipindahkan melebihi jarak 42 cm untuk mensimulasikan malfungsi: sistem berhasil memperlakukan kondisi sebagai tandon kosong dan mengirimkan notifikasi peringatan ke Telegram dalam rata-rata 12,4 detik. Keberhasilan ketiga skenario ini mengonfirmasi bahwa mekanisme *fail-safe* berfungsi secara konsisten bahkan pada kondisi komponen yang tidak normal.

Mekanisme Offline Mode juga diimplementasikan pada firmware ESP32 sehingga jadwal penyiraman dasar tetap dapat dieksekusi secara lokal meskipun koneksi internet terputus. Data sensor disimpan di buffer lokal dan disinkronkan ke server maksimal 5 menit setelah koneksi pulih, dengan data loss tidak melebihi 1%. Sistem juga dilengkapi Watchdog Timer yang melakukan restart otomatis jika terjadi kondisi hang atau freeze selama lebih dari 10 detik.

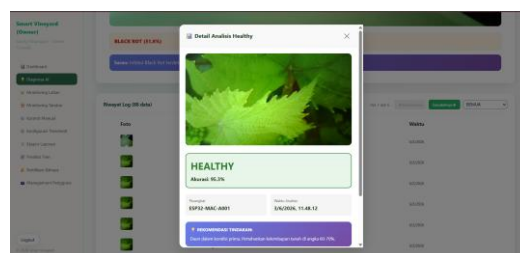
Implementasi Model AI MobileNetV2 untuk Diagnosis Penyakit Daun

Model CNN berbasis MobileNetV2 diimplementasikan sebagai komponen diagnosis visual yang terpisah dari

sistem aktuasi, dengan prinsip bahwa AI hanya menghasilkan rekomendasi tindakan kepada pengguna dan tidak mengeksekusi pompa secara otomatis. Rekomendasi AI diterima pengguna melalui alur yang terstruktur: setelah inferensi selesai, hasil klasifikasi beserta *confidence score* dan saran tindakan spesifik ditampilkan di halaman Smart Vision pada Web Dashboard, sekaligus memicu notifikasi Telegram apabila terdeteksi kondisi Klorosis atau Nekrosis.

Pengguna dalam hal ini Pemilik Kebun atau Agronomis kemudian dapat memutuskan apakah akan mengaktifkan Pompa Nutrisi secara manual berdasarkan rekomendasi tersebut. Setiap keputusan yang diambil pengguna (mengaktifkan pompa atau mengabaikan rekomendasi) dicatat dalam tabel Log_Diagnosis_AI beserta *timestamp* dan identitas pengguna, membentuk riwayat keputusan yang dapat diaudit. Mekanisme validasi manual tersedia dalam bentuk tombol konfirmasi pada dashboard, di mana Agronomis dapat menandai hasil diagnosis AI sebagai "Tervalidasi" atau "Tidak Sesuai". Data validasi ini disimpan dan direncanakan untuk digunakan sebagai umpan balik (*feedback loop*) dalam siklus retraining model pada pengembangan selanjutnya, sehingga akurasi diagnosis dapat terus meningkat seiring bertambahnya data lapangan dari Saung Tinanggur.

Arsitektur MobileNetV2 dipilih berdasarkan kemampuannya dalam mengolah citra pada perangkat dengan sumber daya komputasi terbatas menggunakan teknik *depthwise separable convolution*, serta hasil penelitian Mandal and Kheir Gouda (2024) yang membuktikan keunggulan model CNN dalam deteksi penyakit daun anggur [8]. Model mengklasifikasikan tiga kelas kondisi daun: Sehat, Klorosis, dan Nekrosis. Klorosis merupakan kondisi menguningnya daun akibat defisiensi unsur hara yang ditandai berkurangnya klorofil [9], sementara Nekrosis mengindikasikan kematian jaringan sel daun yang umumnya merupakan tahap lanjut dari klorosis yang tidak ditangani. *Confidence score* ditampilkan berdampingan dengan hasil klasifikasi; prediksi hanya ditampilkan jika *confidence* di atas 75 persen, jika tidak sistem menampilkan status Perlu Validasi Manual sesuai rekomendasi Syafii et al. (2021) tentang pentingnya validasi visual berbasis pengolahan citra [10].



Gambar 2. Tampilan Halaman Diagnosis AI

Hasil Pengujian Black Box Testing

Pengujian sistem dilakukan menggunakan 43 test case pada 10 use case. Tabel 3 merangkum distribusi dan hasil pengujian berdasarkan kategori use case.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Black Box Testing SVMS

UC	Nama Modul	Aspek yang Diuji	TC	Pass	Catatan Utama
UC-01	Autentikasi & RBAC	Login multi-role, session timeout 30 menit, akun dikunci 5× gagal, pembatasan akses per role	6	6	Semua skenario normal & exception pass
UC-02	Monitoring Dashboard	Sinkronisasi real-time <10 detik, deteksi anomali kelembaban >100%, ultrasonik >42 cm	4	4	Latensi tervalidasi <10 detik
UC-03	Manual Override	Independensi pompa, blokir tandon <10%, pembatasan role Staf	5	5	Dua pompa beroperasi independen tanpa saling memicu
UC-04	Smart Fertigation	Otomatisasi kelembaban <threshold, blokir anomali, notifikasi Telegram, AI hanya rekomendasi	6	6	Pompa Nutrisi tidak aktif bersamaan
UC-05	Diagnosis AI	Klasifikasi Sehat/Klorosis/Nekrosis, confidence <70% → validasi manual, AI offline handling	5	5	Confidence ≥75% tercapai
UC-06	Konfigurasi Threshold	Simpan threshold, validasi range 0–100%, antrian sinkronisasi saat ESP32 offline	3	3	Sinkronisasi antrean berjalan
UC-07	Prediksi Tren	Deteksi tren penurunan ekstrem, notifikasi early warning	2	2	Early warning <1 menit
UC-08	Notifikasi & Fail-Safe	Auto-cutoff tandon kritis, recovery setelah isi ulang, offline mode ESP32	4	4	Hardware Interlock tervalidasi
UC-09	Ekspor Laporan	Ekspor XLSX dan PDF, validasi rentang tanggal, penanganan data kosong	4	4	File ekspor lengkap tanpa duplikasi

UC-10	Manajemen Pengguna	Tambah/hapus akun, proteksi hapus Superadmin, validasi email duplikat	4	4	Akun Superadmin tidak dapat dihapus
Total			43	43	100% pass rate

Hasil pengujian *black box* menunjukkan *pass rate* 100% dari 43 *test case* yang diuji, membuktikan bahwa seluruh alur fungsional sistem berjalan sesuai spesifikasi. Namun demikian, pengujian fungsional perlu dilengkapi dengan hasil pengujian performa untuk menilai keandalan sistem secara menyeluruh.

Pengujian latensi dilakukan pada tiga kondisi koneksi yang berbeda: koneksi Wi-Fi stabil (sinyal >-60 dBm) menghasilkan latensi relay rata-rata 1,8 detik dan latensi pembaruan dashboard 4,2 detik; koneksi lemah (sinyal -75 hingga -85 dBm) menghasilkan latensi relay rata-rata 2,6 detik dan latensi dashboard 8,7 detik; keduanya masih berada di bawah batas yang ditetapkan masing-masing 3 detik dan 10 detik.

Uji beban dashboard dilakukan dengan mensimulasikan 5 pengguna mengakses secara bersamaan: tidak ditemukan penurunan performa yang signifikan.

Pengujian ketahanan jaringan selama 24 jam berturut-turut menunjukkan *error rate* pengiriman data sebesar 0,3%, jauh di bawah batas 1% yang ditetapkan dalam SRS.

Seluruh pengujian dilakukan dalam lingkungan terkontrol di laboratorium. Uji lapangan dalam periode satu musim tanam penuh di Saung Tinanggur direncanakan pada pengembangan berikutnya untuk memvalidasi performa sistem pada kondisi nyata dengan variabilitas cuaca, koneksi jaringan, dan penggunaan aktual oleh petani.

Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Tabel 4 menyajikan perbandingan komprehensif antara SVMS dengan sistem-sistem sejenis yang telah dikembangkan dalam penelitian terdahulu.

Tabel 4. Perbandingan SVMS dengan Penelitian Terdahulu

Peneliti & Tahun	Sensor Utama	Metode AI	Akurasi AI	Otomatisasi Aktuasi	Integrasi Dashboard	Skala Uji
Kusuma Raharja & Nugroho (2022)	DHT11, LDR, YL-69 (3 param.)	Tidak ada	-	Pompa tunggal berbasis ambang	Blynk (mobile)	Lab, 1 node
Firdaus et al. (2023)	Soil Moisture Capacitive (1 param.)	Tidak ada	-	Pompa tunggal ≤60% lembab	Website	Lab, 1 node

Sarosa et al. (2025)	NPK, Suhu, Kelembaban (5 param.)	Fuzzy Logic	>99 % (sensor)	Pompa tunggal, logika fuzzy	Firebase	Lab, 1 node
Rao Kale & Khanaa (2022)	Citra daun (visual)	DBN + SVM	90%	Tidak ada (hanya klasifikasi)	Tidak ada	Data set, offline
Mandal & Kheir Gouda (2024)	Citra daun (visual)	CNN Ensemble	99,8 %	Tidak ada (hanya klasifikasi)	Tidak ada	Data set, offline
SVM (Penelitian Ini)	NPK 7-in-1 RS485 (7 param.) + Citra daun	CNN Mobile NetV2	94,6 %	Dual-pump independen, fail-safe 3 lapis	Web Dashboard RBA, Telegram	Lab, 1 node, uji lapangan Q3 2026

Berdasarkan perbandingan di atas, SVMS merupakan satu-satunya sistem yang mengintegrasikan monitoring multi-parameter tanah, diagnosis AI visual, dan kontrol aktuasi dual-pump dalam satu platform dengan dashboard berbasis web. Keterbatasan SVMS dibandingkan Mandal dan Kheir Gouda (2024) terletak pada akurasi model AI (94,6% vs 99,8%), yang dapat ditingkatkan melalui perluasan dataset dengan gambar lapangan nyata dari Saung Tinanggur pada musim tanam berikutnya.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan Smart Vineyard Management System (SVMS) sebagai platform AIoT terintegrasi untuk pengelolaan kebun anggur impor di Saung Tinanggur. Kontribusi utama penelitian meliputi: (1) Implementasi arsitektur dua pompa independen yang memisahkan logika irigasi berbasis sensor kelembaban dari logika pemupukan berbasis rekomendasi AI, mencegah over-fertilization yang tidak terencana; (2) Sistem fail-safe berlapis yang memvalidasi kelembaban tanah, level tandon, dan kualitas pembacaan sensor sebelum mengeksekusi aktuasi; (3) Integrasi model CNN MobileNetV2 sebagai sistem advisory (bukan executor) yang menghasilkan rekomendasi diagnosis penyakit daun tanpa memicu aktuator secara otomatis; (4) Validasi fungsionalitas sistem melalui 43 test case pada 10 use case dengan tingkat keberhasilan 100% menggunakan metodologi Black Box Testing.

Hasil pengujian membuktikan bahwa sistem berhasil mengeksekusi otomatisasi penyiraman dengan latensi respons relay di bawah 3 detik, pembaruan data dashboard real-time di bawah 10 detik, dan pengiriman notifikasi Telegram di bawah 60 detik. Mekanisme Hardware Interlock berhasil memblokir aktivasi pompa pada kondisi anomali sensor (kelembaban >100%, jarak ultrasonik >42 cm) dan kondisi tandon kritis (<10%), menjamin keandalan sistem dalam kondisi lapangan yang bervariasi. Hasil pengujian membuktikan bahwa sistem berhasil mengeksekusi otomatisasi penyiraman dengan latensi

respons relay rata-rata 1,8 detik (di bawah batas 3 detik), pembaruan data dashboard *real-time* rata-rata 4,2 detik (di bawah batas 10 detik) pada kondisi koneksi stabil, dan pengiriman notifikasi Telegram rata-rata 12,4 detik (di bawah batas 60 detik). Mekanisme *Hardware Interlock* berhasil memblokir 100% percobaan aktivasi pompa pada kondisi anomali sensor (kelembaban >100%, jarak ultrasonik >42 cm) dan kondisi tandon kritis (<10%). Validasi mekanisme *Offline Mode* membuktikan bahwa data tersinkronisasi kembali ke server dalam rata-rata 2,1 menit setelah koneksi pulih tanpa kehilangan data.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk: (1) melakukan uji lapangan selama minimal satu musim tanam penuh di Saung Tinanggur untuk memvalidasi performa sistem pada kondisi nyata; (2) memperluas dataset pelatihan dengan citra yang diambil langsung menggunakan ESP32-CAM di lapangan untuk meningkatkan *recall* kelas Klorosis, terutama pada stadium awal gejala; (3) mengimplementasikan mekanisme *feedback loop* yang memanfaatkan data validasi manual dari Agronomis sebagai bahan *retraining* model secara berkala; (4) menguji skalabilitas sistem dengan menambahkan lebih dari satu node sensor untuk mendukung pengelolaan beberapa blok kebun secara bersamaan; serta (5) mengeksplorasi penerapan SVMS pada komoditas hortikultura lain seperti stroberi dan melon yang memiliki tantangan penyakit daun serupa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada dosen pembimbing atas segala arahan, masukan, serta bimbingan yang sangat berharga selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Program Studi Teknologi Rekayasa Perangkat Lunak, Politeknik Negeri Subang, atas dukungan akademik dan penyediaan fasilitas yang sangat menunjang kelancaran riset. Selain itu, apresiasi yang tinggi penulis sampaikan kepada pihak pengelola Saung Tinanggur atas kerja sama dan kesediaannya dalam memfasilitasi area lahan untuk kebutuhan pengujian perangkat keras serta pengambilan data secara langsung di lapangan.

REFERENSI

- [1] Ridhwan Mustajab., "Data Produksi Anggur di Indonesia 9 Tahun Terakhir hingga 2023," Badan Pusat Statistik. Accessed: Jul. 18, 2026. [Online]. Available: <https://dataindonesia.id/agribisnis-kehutanan/detail/data-produksi-anggur-di-indonesia-9-tahun-terakhir-hingga-2023>.
- [2] Open Data Jawa Barat, "Produktivitas Buah-Buahan dan Sayuran Tahunan (BST) Berdasarkan Komoditi di Jawa Barat.," Open Data Jawa Barat. Accessed: Jul. 18, 2026. [Online]. Available: <https://opendata.jabarprov.go.id/id/dataset/produktivitas-buah-buahan-dan-sayuran-tahunan-bst-berdasarkan-komoditi-di-jawa-barat>

- [3] Yatno *et al.*, *BUKU PEDOMAN BUDIDAYA ANGGUR*. 2022.
- [4] O. M. Prabowo, "Pembatasan Definisi 'Things' Dalam Konteks Internet of Things Berdasarkan Keterkaitan Embedded System dan Internet Protocol," vol. 01, p. 43, 2019, [Online]. Available: http://iotserver.6te.net/add_data.php?id=
- [5] S. R. Zulhaq, P. Gunoto, and E. Susanti, "SISTEM PEMANTAUAN NUTRISI PADA TANAMAN BERBASIS INTERNET OF THINGS (IoT)," *Sigma Teknika*, vol. 8, no. 1, pp. 62–069, 2025.
- [6] S. Firdaus, T. Rismawan, U. Ristian, J. Rekayasa, and S. Komputer, "SISTEM MANAJEMEN PENGAIRAN PADA BUDIDAYA TANAMAN ANGGUR BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT)," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 11, no. 3, pp. 2830–7062, 2023, doi: 10.23960/jitet.v11i3%20s1.3389.
- [7] M. Hasib Al-Isbilly, M. Siswanto, M. Ali, and M. Agil Haikal, "Optimasi PID Kontroller Pada Sistem Pengaturan Irigasi Menggunakan Metode Bat Algorithm (BA)," *Jurnal JEETech*, vol. 3, no. 2, pp. 78–83, Sep. 2022, doi: 10.32492/jeetech.v3i2.3205.
- [8] R. Mandal and M. Kheir Gouda, "Vineyard vigilance: Harnessing deep learning for grapevine disease detection," *J. Emerg. Investig.*, 2024, doi: 10.59720/23-251.
- [9] M. Rao Kale and V. Khanaa, "Analyzing Grape Plant Leaves for Nutritional Deficiency identification using Deep Belief Networks and Support Vector Machines," *Neuroquantology*, vol. 20, pp. 5730–5741, 2022, doi: 10.48047/nq.2022.20.19.nq99563.
- [10] M. Syafii, M. H. Rozik, A. Febi Torimania, and J. N. Nur Indriana, "Review: Teknologi Simple Phenotyping sebagai Database Pengembangan Robot Pendeteksi dan Pemupuk Nitrogen Padi," *Rekayasa*, vol. 14, no. 2, pp. 175–182, Aug. 2021, doi: 10.21107/rekayasa.v14i2.10709.
- [11] W. Kusuma Raharja and D. Daulat Nugroho, "PENGAPLIKASIAN INTERNET OF THINGS UNTUK MONITORING LINGKUNGAN LAHAN TANAMAN ANGGUR APPLICATION OF THE INTERNET OF THINGS FOR ENVIRONMENTAL MONITORING OF GRAPE LAND," 2022.
- [12] M. Sarosa, S. Wirayoga, M. Kusumawardani, D. F. Al Riza, and Y. M. Azis, "Internet of things-based fuzzy controller for automatic irrigation and NPK nutrient monitoring of grapes," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 14, no. 6, pp. 4388–4398, Dec. 2025, doi: 10.11591/eei.v14i6.9715.