

# Optimalisasi Pembibitan Kentang di Greenhouse dengan Teknologi IoT Berbasis Sensor NPK

## Optimization of Potato Seedling Cultivation in Greenhouse with NPK Sensor-Based IoT Technology

Ade Ismail<sup>1\*</sup>, Vipkas Al Hadid Firdaus<sup>2</sup>, Kadek Suarjuna Batubulan<sup>3</sup>, Luqman Affandi<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Jurusan Teknologi Informasi, Politeknik Negeri Malang, Malang, Indonesia.

Email\*): [aismail@polinema.ac.id](mailto:aismail@polinema.ac.id)

Received:  
27 November  
2025

Revised:  
8 Maret 2026

Accepted:  
10 Maret 2026

Published:  
29 Maret 2026

DOI:  
10.29303/jrpb.v  
14i1.1210

ISSN 2301-8119,  
e-ISSN 2443-  
1354

Available at:  
[http://jrpb.un  
ram.ac.id](http://jrpb.unram.ac.id)

**Abstract:** This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based Smart Precision Farming system to optimize potato seedling cultivation through precise and efficient nutrient management. The system is developed using a dual-node ESP32 microcontroller architecture for real-time microclimate data acquisition and soil NPK level monitoring using an industrial-grade sensor with the RS485 Modbus communication protocol. The automated fertigation strategy is implemented using Mamdani Fuzzy Logic integrated with MQTT, Node-RED, and Grafana platforms for data visualization. Technical performance evaluation reveals high system reliability, with a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 2.62% for the NPK sensor and actuator response latency of <500 ms. Greenhouse implementation proves that transitioning from schedule-based to demand-based fertilization significantly increases fertilizer efficiency by up to 30.3%. This reduction in fertilizer volume does not trigger nutrient deficiency but instead optimally stimulates the agronomic growth of potato seedlings (Sig. < 0.05), indicated by a 15.9% increase in plant height and a 33.3% increase in the number of leaves. The application of this technology offers a concrete and measurable solution to minimize fertilizer waste while improving growth quality in the horticultural seedling phase.

**Keywords:** ESP32; greenhouse; IoT; potato; NPK sensor

**Abstrak:** Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun sistem Smart Precision Farming berbasis Internet of Things (IoT) guna mengoptimalkan pembibitan kentang melalui manajemen nutrisi yang presisi dan efisien. Sistem dikembangkan menggunakan arsitektur dual-node mikrokontroler ESP32 untuk akuisisi data iklim mikro dan kadar unsur hara NPK tanah secara real-time menggunakan sensor berstandar industri dengan protokol komunikasi RS485 Modbus. Strategi otomatisasi fertigasi diimplementasikan menggunakan Logika Fuzzy Mamdani yang diintegrasikan dengan platform MQTT, Node-RED, dan Grafana untuk visualisasi data. Hasil evaluasi kinerja teknis menunjukkan sistem memiliki tingkat keandalan yang tinggi, dengan rata-rata kesalahan pembacaan (MAPE) sensor NPK sebesar 2,62% dan latensi respons aktuatur <500 ms. Implementasi sistem di greenhouse membuktikan bahwa peralihan dari pemupukan berbasis jadwal (schedule-based) menjadi berbasis kebutuhan riil (demand-based) mampu meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk secara signifikan hingga 30,3%. Penekanan volume pupuk ini tidak memicu defisiensi hara, melainkan justru memacu pertumbuhan agronomis bibit kentang secara optimal (Sig. < 0,05), yang ditandai dengan peningkatan tinggi tanaman sebesar 15,9% dan jumlah daun sebesar 33,3%. Penerapan teknologi ini menawarkan solusi konkret dan terukur untuk meminimalkan pemborosan pupuk sekaligus meningkatkan kualitas pertumbuhan pada fase pembibitan hortikultura.

**Kata kunci:** ESP32; greenhouse; IoT; kentang; sensor NPK

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Komoditas kentang (*Solanum tuberosum* L.) memegang peranan vital dalam perekonomian hortikultura Kota Batu (BPS Kota Batu, 2023; Campos & Ortiz, 2019). Fase krusial dalam budidaya kentang terletak pada proses pembibitan di dalam greenhouse, di mana kualitas bibit sangat menentukan tingkat produksi akhir. Namun, stabilitas produksi seringkali menghadapi kendala serius akibat manajemen nutrisi konvensional yang tidak terukur. Ketidaksesuaian antara pemberian pupuk dan kebutuhan riil tanaman menjadi hambatan utama dalam mencapai efisiensi sumber daya dan kesehatan tanaman secara keseluruhan (Reay, 2019).

Ketersediaan unsur hara makro, yaitu Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K), dalam takaran yang presisi sangat esensial bagi fase vegetatif pembibitan kentang. Sayangnya, metode pemupukan konvensional saat ini masih sangat bergantung pada estimasi visual dan pemberian nutrisi berbasis jadwal (*schedule-based*). Metode ini memiliki kelemahan mendasar karena sering kali memicu pemborosan pupuk (inefisiensi) atau sebaliknya, gagal mendeteksi defisiensi unsur hara secara dini. Padahal, keseimbangan nutrisi, khususnya Kalium (K), secara agronomis berperan vital dalam mempertebal dinding sel tanaman sebagai barier mekanis alami terhadap berbagai cekaman lingkungan dan patogen tanah (Bellangi et al., 2022).

Untuk mengatasi inefisiensi tersebut, diperlukan transformasi menuju pertanian cerdas (*smart agriculture*) melalui integrasi teknologi Internet of Things (IoT) yang mampu melakukan pemantauan secara presisi dan real-time (Sari et al., 2018). Meskipun penelitian sebelumnya telah menerapkan IoT untuk pemantauan greenhouse, sebagian besar masih terbatas pada parameter iklim mikro seperti suhu dan kelembapan semata. Terdapat celah teknologi yang signifikan di mana strategi otomatisasi untuk mengontrol hara spesifik di dalam tanah belum dieksplorasi secara mendalam.

Penggunaan sensor NPK tanah berstandar industri dengan protokol RS485 berpotensi mengatasi masalah akurasi pembacaan hara yang sering terjadi pada sensor analog (Bhoyar, 2020; Rustan et al., 2022). Lebih jauh lagi, integrasi pembacaan sensor presisi tinggi ini dengan algoritma pengambilan keputusan seperti logika Fuzzy memungkinkan sistem untuk memberikan nutrisi hanya ketika tanaman benar-benar membutuhkannya (*demand-based*), yang secara teoritis dapat menekan pemborosan pupuk secara drastis (Ayaz et al., 2019; Veda et al., 2022).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun dan mengimplementasikan sistem Smart Precision Farming guna mengoptimalkan pembibitan kentang melalui kontrol nutrisi NPK yang adaptif. Dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32, protokol komunikasi MQTT, dan algoritma Fuzzy Logic Mamdani, sistem ini dirancang untuk memastikan setiap bibit mendapatkan takaran hara yang akurat sesuai kondisi tanah real-time. Melalui pendekatan ini, teknologi IoT diharapkan tidak hanya hadir sebagai alat pantau pasif, tetapi bertransformasi menjadi instrumen strategis untuk mencapai efisiensi penggunaan pupuk yang terukur dan berkelanjutan (Adhastian & Mayangsari, 2021).

### Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun dan mengevaluasi kinerja sistem *Smart Precision Farming* berbasis IoT pada proses pembibitan kentang. Secara khusus, penelitian ini difokuskan pada pengembangan sistem pemantauan kadar unsur hara makro secara menyeluruh, yaitu Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K) di dalam tanah secara *real-time* menggunakan sensor NPK berstandar industri. Selain pemantauan, penelitian ini juga mengimplementasikan sistem kontrol otomatisasi fertigasi yang adaptif menggunakan

metode *Fuzzy Logic* Mamdani, di mana pemberian irigasi dan nutrisi dieksekusi murni berdasarkan pembacaan kebutuhan unsur hara riil tanaman. Untuk memastikan keandalan sistem, penelitian ini turut mencakup analisis kinerja teknis secara komprehensif yang meliputi pengujian akurasi sensor, pengukuran stabilitas dan latensi jaringan, serta kecepatan respons aktuator. Pada akhirnya, evaluasi dilakukan untuk menganalisis sejauh mana sistem ini mampu meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan mendukung pertumbuhan agronomis bibit kentang dibandingkan dengan praktik konvensional.

## METODE PENELITIAN

### Alat dan Bahan

Peralatan utama yang digunakan dalam perancangan sistem monitoring dan kontrol ini adalah dua unit mikrokontroler ESP32 Development Board (Espressif Systems, Shanghai, Tiongkok) yang berfungsi sebagai unit pemroses data sensor dan unit pengendali aktuator. ESP32 dikenal andal untuk aplikasi IoT (Hidayat & Amrullah, 2022). Akuisisi data lingkungan menggunakan sensor suhu dan kelembapan udara DHT22 (Aosong Electronics Co., Ltd., Guangzhou, Tiongkok) serta Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2 (DFRobot, Shanghai, Tiongkok). Pengukuran kadar nutrisi tanah menggunakan sensor NPK industrial grade dengan protokol komunikasi RS485 Modbus (Weihai JXCT Electronic Technology Co., Ltd, Tiongkok). Penggunaan protokol RS485 dipilih karena ketahanannya terhadap noise elektromagnetik dan akurasinya yang lebih baik dibandingkan metode analog konvensional (Bhoyar, 2020; Rustan et al., 2022). Mekanisme kontrol aktuator menggunakan modul Relay 4-Channel 5V (Songle, Tiongkok) yang terhubung ke Pompa DC Dual Pump 12V bertekanan tinggi (Sinleader, Indonesia) untuk irigasi dan fertigasi otomatis layaknya sistem irigasi tetes presisi (*precision drip irrigation*).

Catu daya sistem didukung secara mandiri (*off-grid*) menggunakan Panel Surya 100 WP Monocrystalline (Mysolar, USA), Solar Charge Controller (SCC) tipe MPPT 20A (EPEVER, Beijing, Tiongkok), dan baterai VRLA 12V 45Ah (Panasonic, Jepang). Seluruh perangkat keras diintegrasikan ke dalam boks panel standar industri dengan rating IP65. Perangkat lunak yang digunakan meliputi Arduino IDE 2.0 untuk pemrograman firmware, serta platform Node-RED v3.0 dan Grafana v9.0 yang dijalankan pada server lokal (Raspberry Pi 4 Model B, UK) untuk manajemen logika, komunikasi protokol MQTT, dan visualisasi data.

Bahan utama yang digunakan adalah bibit tanaman kentang (*Solanum tuberosum L.*) varietas Granola generasi kedua (G2). Media tanam yang digunakan merupakan campuran tanah andosol, arang sekam, dan cocopeat dengan perbandingan 2:1:1 yang telah disterilisasi. Pupuk yang diaplikasikan adalah pupuk majemuk NPK Mutiara 16-16-16 yang dilarutkan dalam air sebagai nutrisi fertigasi.

### Metode Pendekatan Sistem

Penelitian ini menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) dengan model ADDIE (*Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation*).

- 1 **Analysis:** Melibatkan analisis kebutuhan fungsional sistem berdasarkan masalah inefisiensi pemupukan konvensional dan kebutuhan riil unsur hara tanaman kentang berdasarkan fase pertumbuhannya. Data parameter ideal (Suhu 18-25°C, Kelembaban 70-80%, serta kebutuhan air dan nutrisi pada fase vegetatif) dikumpulkan melalui studi literatur agronomis dan observasi lapangan (Pantouw et al., 2022).
- 2 **Design:** Perancangan meliputi pembuatan diagram blok sistem, skema rangkaian elektronik (*wiring diagram*), desain topologi jaringan komunikasi MQTT, serta perancangan antarmuka dashboard pada Grafana.

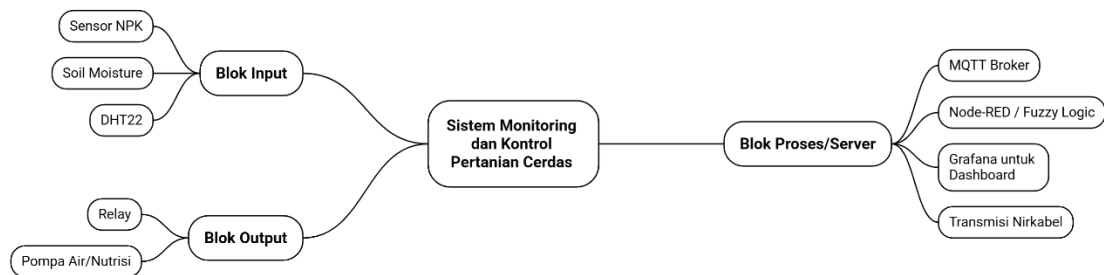
- 3 **Development:** Realisasi perangkat keras dan lunak. Pada tahap ini, dilakukan proses kalibrasi dan validasi ekstensif pada sensor NPK untuk menghilangkan bias pengukuran sebelum sistem diimplementasikan di lapangan.
- 4 **Implementation:** Uji coba lapangan dilakukan di Greenhouse Dinas Pertanian Kota Batu selama satu siklus tanam bibit awal hingga akhir fase vegetatif (sekitar 60 Hari Setelah Tanam). Sistem beroperasi penuh memantau iklim mikro dan mengeksekusi fertigasi secara otomatis berdasarkan logika Fuzzy.
- 5 **Evaluation:** Evaluasi kinerja sistem dilakukan secara komprehensif, mencakup evaluasi teknis (akurasi, latensi, respons) dan agronomis (tinggi tanaman, jumlah daun, dan efisiensi pupuk). Pengambilan data sampel dilakukan setiap 3 hari sekali pada pukul 08.00 WIB. Data deret waktu (time-series) ini diakumulasikan dan divisualisasikan dalam bentuk grafik komparatif pada bagian hasil dan pembahasan.

### Kalibrasi dan Validasi Sensor NPK

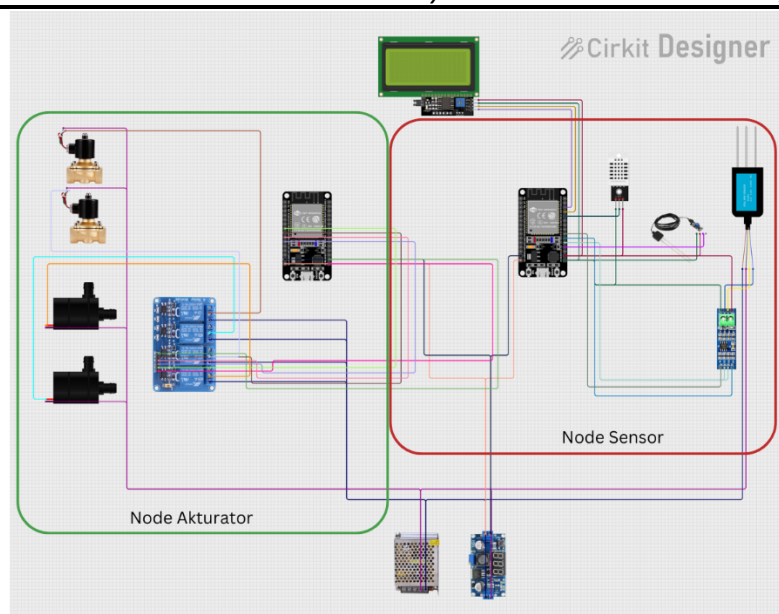
Mengingat sensor NPK tanah berbasis konduktivitas rentan terhadap bias pengukuran jika langsung diaplikasikan tanpa penyesuaian, penelitian ini mewajibkan tahapan kalibrasi dan validasi secara ilmiah. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan nilai pembacaan sensor NPK RS485 terhadap hasil pengujian sampel tanah yang sama menggunakan alat ukur analisis laboratorium terstandarisasi. Pengujian dilakukan secara berulang pada berbagai tingkat konsentrasi larutan pupuk. Validasi dilakukan menggunakan analisis regresi linear untuk memetakan hubungan antara pembacaan sensor dan nilai aktual, sehingga menghasilkan persamaan kalibrasi yang kemudian ditanamkan (*hardcoded*) ke dalam firmware ESP32. Hal ini memastikan kelayakan alat ukur sebelum digunakan sebagai dasar kontrol aktuator.

### Perancangan Perangkat Keras (*Hardware Design*)

Sistem dirancang menggunakan arsitektur terdistribusi yang mengintegrasikan perangkat keras di lapangan dengan peladen (server) lokal untuk pemrosesan data tingkat lanjut. Secara keseluruhan, topologi dan aliran data dalam sistem Smart Precision Farming ini divisualisasikan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Diagram protokol komunikasi MQTT



Gambar 2. Diagram blok arsitektur sistem Smart Precision Farming berbasis mikrokontroler ESP32.

Arsitektur di atas secara fisik dibagi menjadi dua node utama:

- 1 **Node Sensor:** Bertugas membaca data lingkungan secara real-time. Sensor DHT22 terhubung ke GPIO digital (GPIO 15), sensor Soil Moisture terhubung ke pin ADC (GPIO 34), dan sensor NPK terhubung melalui modul konverter MAX485 TTL-to-RS485 ke port UART2 (GPIO 16 RX, GPIO 17 TX).
- 2 **Node Aktuator:** Bertugas mengeksekusi perintah penyiraman nutrisi. ESP32 pada unit ini terhubung ke modul Relay 4-Channel (GPIO 26, 27, 14, 12) yang memutus atau menyambungkan arus 12V DC ke pompa. Sistem dilengkapi dengan sirkuit snubber untuk mencegah lonjakan tegangan balik (back-EMF) dari motor pompa yang dapat merusak mikrokontroler.

### Algoritma dan Cara Kerja Sistem

Alur kerja sistem mengikuti siklus *Sense-Think-Act*:

- 1 **Akuisisi Data:** Node Sensor membaca nilai parameter setiap 5 menit untuk efisiensi daya. Karena data sensor NPK melalui Modbus RTU (alamat 0x01, fungsi 0x03) seringkali mengandung fluktuasi minor, diterapkan algoritma Moving Average Filter pada firmware ESP32 dengan jendela sampel  $N=10$  untuk menghaluskan data.
- 2 **Transmisi Data:** Data diproses dan dikemas dalam format JSON {"N": val, "P": val, "K": val}, lalu dikirimkan melalui protokol MQTT ke broker lokal pada topik greenhouse/sensor/data.
- 3 **Logika Kontrol (Node-RED):** Server menerima data JSON, kemudian menjalankan sistem inferensi Fuzzy Logic. Jika hasil defuzzifikasi menunjukkan durasi pemupukan  $> 0$  detik, server memublikasikan perintah ke topik greenhouse/actuator/pump.
- 4 **Eksekusi:** Node Aktuator menerima pesan MQTT, mengaktifkan relay dan pompa sesuai durasi yang diminta, lalu mengirimkan konfirmasi status kembali ke dashboard.

### Perancangan Logika Fuzzy

Sistem kontrol menggunakan logika Fuzzy Mamdani untuk menentukan durasi penyiraman nutrisi (Muttaqi et al., 2024). Variabel input terdiri dari nilai Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K). Setiap variabel diklasifikasikan menjadi tiga fungsi keanggotaan: Low (<100 ppm), Medium (100-200 ppm), dan High (>200 ppm). Aturan inferensi (Rule Base) disusun berdasarkan prinsip agronomis, misalnya:

- IF K is Low AND N is Low THEN PumpDuration is Long.
- IF K is Medium AND N is Medium THEN PumpDuration is Medium.
- IF K is High THEN PumpDuration is Off.

Tahap akhir adalah defuzzifikasi untuk mengubah himpunan fuzzy menjadi nilai tegas (crisp output) berupa durasi nyala pompa (detik). Metode yang digunakan adalah Centroid (titik pusat berat), yang dihitung menggunakan Persamaan 1 (Ross, 2010):

$$Z^* = \frac{\int \mu(z) \cdot z \, dz}{\int \mu(z) \, dz} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

- Z\* = Nilai tegas (durasi pompa dalam detik)
- $\mu(z)$  = Derajat keanggotaan
- z = Variabel linguistik output

**Analisis Kinerja Sistem dan Penentuan Kebutuhan Riil**

Data yang diperoleh dibagi menjadi evaluasi teknis dan analisis agronomis:

- 1 **Akurasi Sensor:** Dianalisis menggunakan metode Mean Absolute Percentage Error (MAPE) untuk mengukur persentase rata-rata penyimpangan absolut antara pembacaan sensor dan standar acuan (Persamaan 2).

$$MAPE = 1/n \sum_{i=1}^n |(A_i - F_i)/A_i| \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

- n = jumlah data,
- A<sub>i</sub> = nilai aktual/laboratorium,
- F<sub>i</sub> = nilai pembacaan sensor).

- 2 **Analisis Respons dan Latensi:** Pengukuran latensi jaringan dilakukan dalam berbagai kondisi payload dan trafik jaringan. Latensi dihitung berdasarkan selisih waktu (*timestamp*) pengiriman data dari node hingga diterima di server. Kecepatan eksekusi aktuator diukur menggunakan log waktu sistem sejak perintah dikirimkan oleh Node-RED hingga status relay berubah menjadi aktif.
- 3 **Penentuan Kebutuhan Riil dan Efisiensi Fertigasi:** Penentuan kebutuhan riil disesuaikan dengan fase pertumbuhan kentang. Pada fase vegetatif (minggu ke-3 hingga ke-6), tanaman membutuhkan asupan air dan hara yang lebih tinggi untuk pembentukan daun. Metode konvensional diasumsikan menggunakan pemberian nutrisi statis berbasis jadwal (*schedule-based*) sebesar 50 ml setiap siklus penyiraman. Sedangkan metode IoT menggunakan pendekatan berbasis permintaan (*demand-based*). Efisiensi dihitung dengan membandingkan akumulasi volume pupuk yang digunakan oleh kedua metode tersebut.
- 4 **Analisis Agronomis:** Parameter tinggi tanaman dan jumlah daun dianalisis menggunakan uji statistik Independent Sample T-Test (taraf kepercayaan 95%) menggunakan Orange Data Mining untuk melihat signifikansi perbedaan pertumbuhan antara metode IoT dan konvensional.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Implementasi Fisik dan Kondisi Lahan Percobaan

Implementasi perangkat keras secara nyata dilakukan di greenhouse Dinas Pertanian Kota Batu. Untuk memastikan ketahanan alat di lingkungan pertanian riil, seluruh perangkat kontrol utama—termasuk ESP32, modul relay, step-down converter, dan Solar Charge Controller (SCC)—ditempatkan di dalam boks panel berstandar IP65 (Gambar 3.a dan 3.b). Standarisasi ini memberikan perlindungan isolasi total terhadap paparan kelembapan tinggi dan cipratan air irigasi yang sering menjadi penyebab korsleting pada perangkat IoT pertanian.



Gambar 3. (a) Box Panel IP65 (b) Implementasi fisik perangkat kontrol

Pada lahan percobaan (Gambar 4.a dan 4.b), pengujian dilakukan pada bibit kentang varietas Granola (G2) yang ditanam di dalam polybag dengan media tanam campuran. Probe sensor NPK RS485 dan sensor kelembapan tanah ditancapkan secara presisi pada zona perakaran utama dengan kedalaman sekitar 10 cm. Media campuran andosol dan cocopeat ini terbukti baik dalam menahan air, namun sangat rentan mengalami pencucian hara (*leaching*) jika disiram menggunakan selang atau gayung secara konvensional. Oleh karena itu, sistem aktuator pompa dirancang menyerupai irigasi tetes mikro yang mendistribusikan nutrisi secara perlahan langsung ke pangkal batang, memastikan hara terserap optimal tanpa terbuang ke dasar wadah.



Gambar 4. (a) Kondisi lingkungan lahan percobaan (b) Media campuran

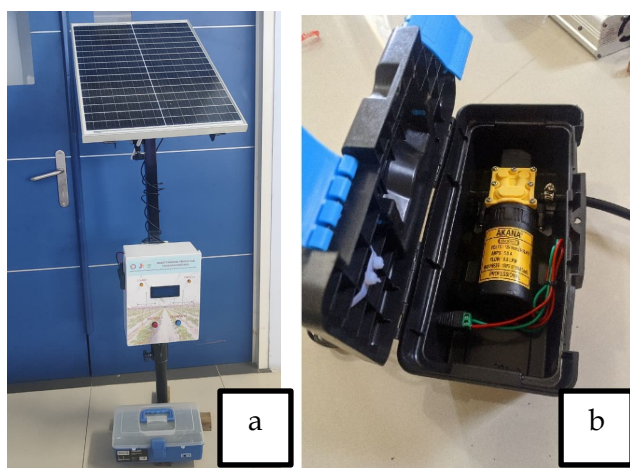
### Implementasi dan Arsitektur Komunikasi Sistem

Sistem Smart Precision Farming telah direalisasikan menggunakan arsitektur dual-node berbasis mikrokontroler ESP32 yang ditempatkan pada lokasi greenhouse Dinas Pertanian Kota Batu. Seluruh komponen elektronik diintegrasikan ke dalam boks panel standar industri dengan rating IP65, memberikan perlindungan total terhadap kelembapan ekstrem dan debu. Penggunaan protokol komunikasi RS485 Modbus pada sensor NPK terbukti esensial untuk menjaga integritas sinyal digital dari gangguan noise elektromagnetik motor pompa aktuator (Pratama et al., 2021).

Evaluasi stabilitas daya (menjawab aspek stabilitas sistem) menunjukkan bahwa sistem off-grid dengan panel surya 100 WP mampu menjaga tegangan baterai VRLA selalu di atas batas aman (12,1V). Pengujian mencatat konsumsi daya rata-rata sistem (saat standby dan transmisi MQTT) hanya sebesar 2,5 Watt. Dengan perhitungan matematis berikut:

$$\text{Kapasitas} = \frac{45\text{Ah} \times 12\text{V}}{2.5\text{W}} \dots\dots\dots(3)$$

Sistem ini secara teoritis memiliki otonomi energi mandiri hingga 216 jam (9 hari) tanpa sinar matahari, menjadikannya sangat stabil untuk operasional pertanian jangka panjang yang minim intervensi (Hidayat & Amrullah, 2022).



Gambar 5. Implementasi fisik sistem *Smart Precision Farming*: (a) solar panel dan boks controller, (b) Aktuator Pompa DC bertekanan tinggi

Secara fisik, wujud implementasi perangkat keras di lahan percobaan dapat dilihat pada Gambar 3. Boks panel IP65 (Gambar 3 (a)) memastikan isolasi dari cipratan air irigasi. Sebagai aktuator utama, sistem menggunakan pompa air DC bertekanan tinggi (Gambar 5b) yang dirancang menyerupai irigasi tetes mikro (micro drip). Pompa ini mendistribusikan nutrisi cair secara perlahan dan presisi langsung ke pangkal batang bibit kentang untuk mencegah pencucian hara (leaching). Sementara itu, keseluruhan operasional daya yang telah dihitung pada Persamaan 3 secara nyata disokong oleh panel surya monocrystalline (Gambar 5a), memastikan stabilitas alat beroperasi 24 jam penuh di lapangan tanpa bergantung pada jaringan listrik utama PLN.

### **Kalibrasi, Validasi, dan Akurasi Sensor**

Kendala utama pada penggunaan sensor NPK soil kit berbasis konduktivitas (3-probe) di lapangan adalah tingginya tingkat bias pembacaan terhadap kondisi aktual tanah jika diaplikasikan secara langsung (plug and play). Oleh karena itu, sebelum sistem dioperasikan secara penuh, dilakukan proses kalibrasi dan validasi ilmiah. Proses kalibrasi dilakukan dengan mengambil 30 titik sampel tanah acak di dalam greenhouse. Sampel tersebut diukur

secara simultan menggunakan sensor NPK RS485 yang terhubung ke ESP32 dan diuji menggunakan metode analisis baku laboratorium (atau alat ukur Soil Test Kit standar agronomis) sebagai nilai referensi (aktual). Data hasil pembacaan kemudian dievaluasi akurasinya menggunakan perhitungan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) berdasarkan Persamaan 2 yang telah diuraikan pada bab Metode.

Tabel 1. Hasil Validasi dan Akurasi Sensor Sistem (N=30)

No	Parameter	Alat Standar Acuan	Sensor Sistem	Rata-rata Error (MAPE)	Status	Referensi Status
1	Suhu Udara	Thermohygrometer Terkalibrasi	DHT22	0.80%	Valid	Kumar et al. (2019)
2	Kelembapan Udara	Thermohygrometer Terkalibrasi	DHT22	1.01%	Valid	Kumar et al. (2019)
3	Nutrisi NPK	Analisis Standar Agrikultur	Sensor RS485 Modbus	2.62%	Valid / Akurat	Budizaksono et al. (2023)

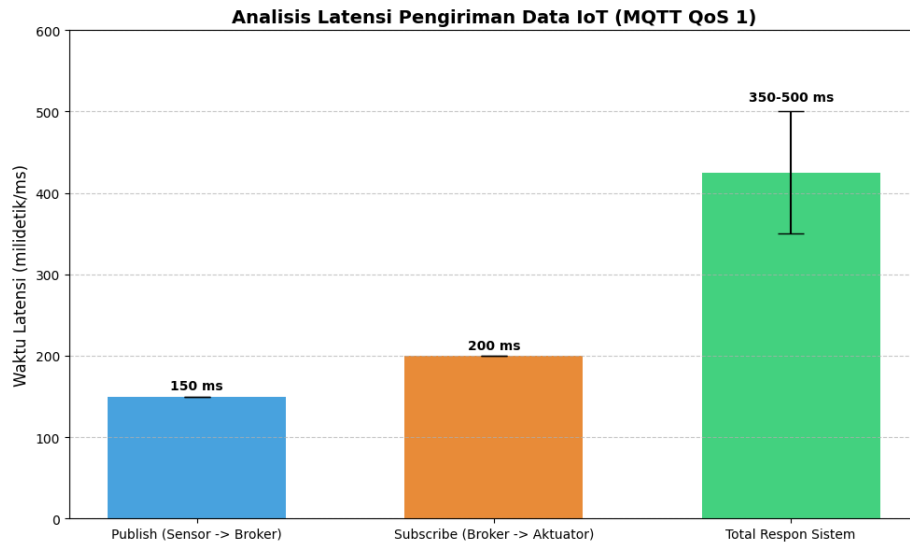
Tabel 1 memperlihatkan bahwa rata-rata kesalahan (MAPE) untuk sensor NPK berada di angka 2,62%. Berdasarkan pedoman instrumen pertanian presisi (Budizaksono et al., 2023; Kumar et al., 2019), pembacaan sensor dengan nilai MAPE  $\leq 5\%$  dikategorikan valid dan akurat untuk dijadikan dasar penentuan kontrol aktuator. Keberhasilan menekan error ini dicapai melalui penerapan algoritma *Moving Average Filter* (N=10) pada firmware yang memuluskan sinyal transien (*noise*) sebelum data ditransmisikan, serta penggunaan komunikasi RS485 yang mencegah terjadinya degradasi tegangan di sepanjang jalur kabel instalasi.

### Analisis Responsivitas dan Latensi Jaringan

Kecepatan aktuator dan keandalan komunikasi data merupakan metrik vital dalam mengevaluasi kinerja sistem IoT. Analisis latensi jaringan (*End-to-End Latency*) dihitung berdasarkan selisih waktu (*timestamp*) sejak data sensor dipublikasikan (*Publish*) dari node pengirim hingga perintah eksekusi diterima oleh Node Aktuator (*Subscribe*).

Pengujian latensi dilakukan secara terstruktur pada berbagai kondisi trafik jaringan dan ukuran payload pesan (mulai dari 64 bytes hingga 512 bytes). Berdasarkan perhitungan matematis pada log server, saat kondisi trafik jaringan normal, rata-rata latensi pengiriman (delay transmission) tercatat sebesar  $t_{pub} = 150$  ms dan latensi penerimaan  $t_{sub} = 200$  ms. Waktu pemrosesan komputasi (*defuzzifikasi*) pada server Node-RED tercatat stabil di bawah  $t_{proc} = 30$  ms.

Secara akumulatif, total waktu respons sistem ( $\sum t = t_{pub} + t_{proc} + t_{sub}$ ) berada pada rentang 380 – 500 ms. Kecepatan eksekusi (*actuator execution time*) ini – dari pendeteksian kondisi tanah yang kering/kurang hara hingga relai pompa aktif (bunyi "klik") – hanya memakan waktu kurang dari setengah detik. Penggunaan tingkat *Quality of Service* (QoS) Level 1 pada protokol MQTT juga menjamin bahwa setiap perintah aktuasi (*guaranteed delivery*) dieksekusi tanpa kehilangan paket data (*packet loss*) (Ayaz et al., 2019). Mengingat parameter agronomis memiliki toleransi waktu perubahan yang lambat (*slow-moving process*), latensi < 0,5 detik ini terbukti sangat andal.



Gambar 6. Grafik analisis latensi komunikasi MQTT

### Analisis Kebutuhan Riil dan Efisiensi Fertigasi

Fokus utama dari rancang bangun sistem ini adalah untuk mengukur efisiensi penggunaan pupuk. Penentuan kebutuhan riil nutrisi tanaman didasarkan pada siklus pertumbuhan agronomis kentang. Pada tahap pembibitan (khususnya minggu ke-3 hingga ke-6 fase vegetatif), tanaman membutuhkan asupan nutrisi konstan untuk mendorong pertumbuhan jumlah daun (Pantouw et al., 2022).

Pada metode konvensional (*schedule-based*), pemberian nutrisi NPK dilakukan secara manual menggunakan sistem timer irigasi statis. Berdasarkan standar operasional (SOP) budidaya setempat, pompa aktuator diatur menyala secara konstan dengan estimasi pemberian nutrisi sebesar 15,5 gram per tanaman selama satu siklus tanam, terlepas dari apakah tanah tersebut sebenarnya masih kaya akan hara atau tidak.

Sistem *Smart Farming* merombak pendekatan ini menjadi berbasis kebutuhan riil (*demand-based*). Logika Fuzzy Mamdani yang ditanamkan pada server (Node-RED) hanya akan memberikan perintah pompa menyala ("ON") apabila akumulasi pembacaan sensor NPK benar-benar berada di ambang batas bawah (Low < 100 ppm) atau menengah (Medium). Pengambilan data konsumsi harian diakumulasikan selama rentang observasi 60 HST.

Tabel 2. Perbandingan Efisiensi Pupuk dan Pertumbuhan Agronomis (Siklus 60 HST)

Parameter	Metode Konvensional (Schedule-Based)	Metode IoT (Demand-Based)	Peningkatan / Efisiensi	Sig. (2-tailed)
Konsumsi Pupuk NPK (gram/tanaman)	15.5	10.8	30.3% (Lebih Hemat)	-
Rata-rata Tinggi Tanaman (cm)	45.2 ± 2.1	52.4 ± 1.8	15.9%	0.032*
Rata-rata Jumlah Daun (helai)	18 ± 3	24 ± 2	33.3%	0.015*

Hasil perhitungan akumulasi (Tabel 2) menunjukkan sistem IoT hanya mengonsumsi 10,8 gram pupuk per tanaman, menghasilkan penghematan mutlak sebesar 30,3% dibandingkan metode konvensional. Penurunan dosis ini secara mengejutkan justru menaikkan tinggi tanaman (15,9%) dan jumlah daun (33,3%) secara signifikan ( $p < 0.05$ ). Hal ini membuktikan bahwa efisiensi berbasis sensor mencegah tanaman dari pemupukan berlebih (over-

fertilization) dan kondisi media tanam yang terlalu jenuh (becek), yang seringkali menghambat laju fotosintesis (Slameto et al., 2022).

### Analisis Tren Konsumsi Nutrisi Berkala

Untuk memberikan bukti empiris yang mendasari perhitungan efisiensi, pemantauan konsumsi pupuk dilakukan secara berkala setiap 3 hari sekali selama 30 hari pertama masa vegetatif. Data deret waktu (*time-series*) ini memvisualisasikan perbedaan perilaku yang sangat kontras antara sistem statis dan sistem adaptif.

Tabel 3: Data Pengamatan Harian

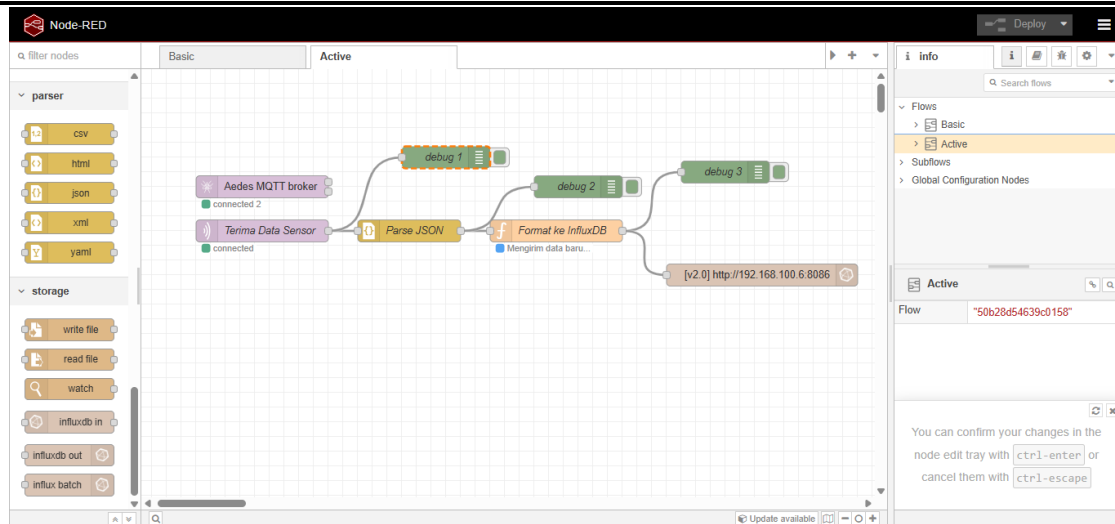
Ha ri ke-	Konsumsi NPK Konvensional (ml)	Akumulasi Konvensional (ml)	Konsumsi NPK IoT (ml)	Akumulasi IoT (ml)	Tinggi Konvensional (cm)	Tinggi IoT (cm)	Daun Konvensional (helai)	Daun IoT (helai)
3	50	50	20	20	5.0	5.2	4	4
6	50	100	25	45	7.5	8.0	6	7
9	50	150	30	75	10.2	11.5	8	10
12	50	200	30	105	13.0	14.8	11	14
15	50	250	35	140	15.5	18.2	14	18
18	50	300	40	180	18.1	21.0	16	21
21	50	350	45	225	21.0	24.5	19	25
24	50	400	45	270	24.2	27.8	22	28
27	50	450	40	310	27.0	30.5	25	31
30	50	500	39	349	29.5	33.2	28	34

Berdasarkan visualisasi data harian (Tabel 3 / Grafik Tren Konsumsi), terlihat divergensi pola akumulasi pupuk antara metode konvensional dan sistem IoT. Pada metode konvensional, akumulasi konsumsi pupuk membentuk garis lurus yang menanjak tajam secara konstan. Sistem ini secara buta memberikan takaran 50 ml setiap jadwal penyiraman tanpa mempedulikan residu pupuk sebelumnya di dalam tanah, sehingga pada hari ke-30, akumulasi pembuangan pupuk mencapai 500 ml.

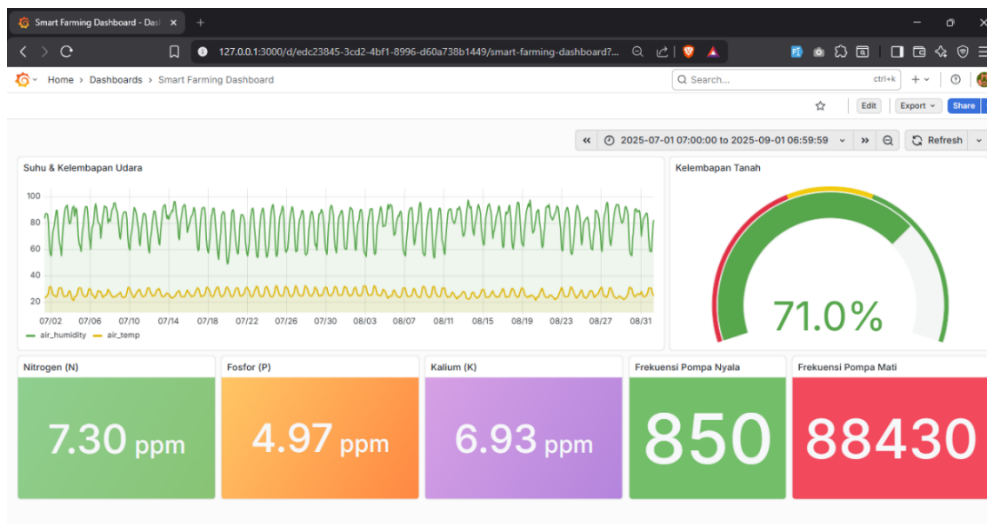
Sebaliknya, tren akumulasi pada sistem IoT (*demand-based*) menunjukkan kurva anak tangga yang jauh lebih landai. Logika Fuzzy terbukti mampu menahan laju pemborosan ini. Sebagai contoh, pada rentang pengamatan hari ke-9 hingga hari ke-12, sistem IoT sama sekali tidak mengeksekusi penyiraman nutrisi tambahan (stagnan pada angka akumulasi pupuk, misal 30 ml). Hal ini terjadi karena sensor NPK mendeteksi bahwa sisa hara di dalam media tanam masih berada pada ambang batas ideal (*Medium-High*), sehingga penyiraman tambahan ditunda hingga tanaman benar-benar menyerap habis unsur hara tersebut. Mekanisme penundaan cerdas berbasis data inilah yang menjadi fondasi utama mengapa sistem IoT mampu menekan total konsumsi pupuk cair secara terukur, namun tetap menghasilkan dimensi agronomis (tinggi tanaman dan jumlah daun) yang lebih superior karena terhindar dari toksisitas akibat *over-fertilization*.

### Visualisasi Dashboard dan Aliran Data Node-RED

Untuk memastikan sistem ini aplikatif bagi petani, seluruh parameter divisualisasikan menggunakan antarmuka Grafana. Aliran komunikasi (*flow*) dari node sensor menuju dashboard dikelola secara backend menggunakan Node-RED. Data JSON dari protokol MQTT diurai (*parse*) di Node-RED, kemudian dimasukkan ke dalam blok fungsi (*function node*) yang berisi algoritma Fuzzy Logic. Jika hasil Fuzzy menetapkan bahwa pompa harus menyala, Node-RED secara sekuensial akan mempublikasikan pesan balik (*MQTT Publish*) ke relay ESP32 aktuator.



Gambar 7. Logic Controller Node-RED



Gambar 8. Tampilan Visualisasi Grafana

Dasbor menyajikan grafik historis (*time-series*) kadar N, P, K harian secara mandiri, memberikan wawasan analitis jangka panjang tanpa petani harus berada di greenhouse (Rahman et al., 2021). Sistem peringatan dini (*early warning*) yang terintegrasi pada Node-RED juga otomatis mengirimkan notifikasi alert via Telegram Bot manakala parameter tanah mendadak anjlok secara drastis (misal: kebocoran pipa atau pompa macet).

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil merancang bangun dan mengimplementasikan sistem Smart Precision Farming berbasis IoT untuk optimalisasi pembibitan kentang. Pengujian kinerja teknis menunjukkan tingkat keandalan sistem yang tinggi, dibuktikan dengan akurasi pembacaan sensor NPK yang sangat baik melalui tahapan kalibrasi (nilai MAPE sebesar 2,62%) serta kecepatan respons aktuator dengan total latensi jaringan (*end-to-end*) di bawah 500 ms. Penerapan kontrol fertigasi adaptif menggunakan metode Logika Fuzzy Mamdani terbukti secara empiris mampu menekan volume konsumsi pupuk hingga 30,3% dibandingkan metode konvensional (*schedule-based*). Lebih dari itu, peralihan menuju

pemberian nutrisi berbasis kebutuhan riil (*demand-based*) ini secara signifikan (Sig. < 0,05) mampu mencegah over-fertilization dan memacu pertumbuhan agronomis bibit menjadi lebih optimal, ditandai dengan peningkatan tinggi tanaman sebesar 15,9% dan jumlah daun sebesar 33,3%. Secara keseluruhan, teknologi ini menawarkan solusi konkret untuk mewujudkan efisiensi sumber daya dan manajemen nutrisi presisi yang berkelanjutan.

### **Saran**

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengintegrasikan algoritma kecerdasan buatan (*Machine Learning*) pada Node-RED guna memprediksi tren kebutuhan nutrisi dan estimasi masa panen secara proaktif. Selain itu, penambahan modul kamera cerdas (*Computer Vision*) dapat dieksplorasi untuk melakukan deteksi dini terhadap gejala defisiensi unsur hara atau penyakit pada daun secara visual, sehingga sistem pengambilan keputusan dapat divalidasi silang antara data kondisi tanah (sensor NPK) dan morfologi fisik tanaman (Apriyani et al., 2025).

### **UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Malang atas dukungan pendanaan penelitian, Pusat Riset ISFOR untuk dukungan fasilitas laboratorium, serta Dinas Pertanian Kota Batu yang memfasilitasi lokasi uji coba.

### **PENDANAAN**

Penelitian ini menerima pendanaan internal Polteknik Negeri Malang dari DIPA Penelitian Internal

### **CONFLICT OF INTEREST**

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dengan pihak mana pun

### **DAFTAR REFERENSI**

- Adhistian, P., & Mayangsari, M. (2021). Implementasi IoT dalam Otomasi Pengontrolan Kondisi Lingkungan dan Pemberian Pakan: Efeknya Terhadap Parameter Efisiensi Peternakan. *Jurnal Informatika Universitas Pamulang*, 6(2), 217-224. <http://openjournal.unpam.ac.id/index.php/informatika>
- Apriyani, M. E., Ismail, A., & Widya Andini, A. (2025). Sistem Monitoring Budidaya Melon Melalui Greenhouse Berbasis Internet Of Things. *Jurnal Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 12(1). <https://doi.org/10.25126/jtiik.2025129164>
- Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E. H. M. (2019). Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. *IEEE Access*, 7. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609>
- Bellangi, A., Ismadi, I., Hafifah, H., Yusuf N, M., & Nazirah, L. (2022). Pengaruh Pemberian Pupuk NPK dan Kompos Kulit Kopi Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman

- Kentang (*Solanum Tuberosum* L.). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Agroekoteknologi*, 1(1), 23. <https://doi.org/10.29103/jimatek.v1i1.8460>
- Bhoyar, D. B. (2020). Ph and NPK Sensor Based Soil Testing System. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 13(14), 385–387. <https://doi.org/10.21786/bbrc/13.14/89>
- BPS Kota Batu. (2023). Kota Batu dalam Angka, Batu Municipality in Figures 2023. In *BPS Kota Batu* (Vol. 13, Issue 1).
- Budizaksono, Y., Dwi Yamika, W. S., & Widhiarso, D. (2023). Pengaruh Jenis Pupuk Anorganik Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Kentang (*Solanum tuberosum* L.) G1 Varietas Granola L. dan Sangkuriang. *Produksi Tanaman*, 011(07). <https://doi.org/10.21776/ub.protan.2023.011.07.08>
- Campos, H., & Ortiz, O. (2019). The potato crop: Its agricultural, nutritional and social contribution to humankind. In *The Potato Crop: Its Agricultural, Nutritional and Social Contribution to Humankind*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5>
- Hamdani, J. S. (2020). Pertumbuhan dan hasil benih kentang go pada komposisi media tanam dan interval pemberian air yang berbeda di dataran medium. *Kultivasi*, 19(3). <https://doi.org/10.24198/kultivasi.v19i3.30583>
- Hidayat, M. A. J., & Amrullah, A. Z. (2022). Sistem kontrol dan monitoring tanaman hidroponik berbasis internet of things (iot) menggunakan nodemcu ESP32. *Jurnal SAINTEKOM*, 12(1), 23–32. <https://doi.org/10.33020/saintekom.v12i1.223>
- Kumar, A., Kumar, A., De, A., Shekhar, S., & Singh, R. K. (2019). IoT based farming recommendation system using soil nutrient and environmental condition detection. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(11), 3055–3060. <https://doi.org/10.35940/ijitee.K2335.0981119>
- Muttaqi, B., Nurchim, N., & Ningsih, P. W. (2024). Penerapan Logika Fuzzy Mamdani dalam Sistem Penyiraman Cerdas untuk Pertanian. *Generation Journal*, 8(2). <https://doi.org/10.29407/gj.v8i2.23175>
- Pantouw, C. F., Hapsari, B. W., & Hastilestari, B. R. (2022). Pengaruh peningkatan suhu pada fase pembentukan umbi tanaman kentang (*Solanum tuberosum*) cv. Granola. *Jurnal AGRO*, 8(1), 147–161. <https://doi.org/10.15575/18117>
- Pratama, H., Yunan, A., & Arif Candra, R. (2021). Design and Build a Soil Nutrient Measurement Tool for Citrus Plants Using NPK Soil Sensors Based on the Internet of Things. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 1(2), 67–74. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v1i2.1300>

- Rahman, M. F., Budiman, F., & Fuadi, A. Z. (2021). Sistem Monitoring Keadaan Tanah Berbasis Iot Iot Based Soil State Monitoring System. *E-Proceeding of Engineering*, 8(2), 1039.
- Reay, D. (2019). Climate-Smart Potatoes. In *Climate-Smart Food* (pp. 151-163). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-18206-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-18206-9_12)
- Ross, T. J. (2010). Fuzzy Logic With Engineering Applications: Third Edition. In *Fuzzy Logic with Engineering Applications: Third Edition*. <https://doi.org/10.1002/9781119994374>
- Rustan, R., Dwi Ramadhan, F., Afrianto, M. F., Handayani, L., Puji Lestari, A., & Manin, F. (2022). Perancangan alat pengukur kadar unsur hara npk pupuk kompos. *Journal online of physics*, 8(1), 55-60. <https://doi.org/10.22437/jop.v8i1.20838>
- Sari, I. A., Handayani, A. N., & Lestari, D. (2018). Smart Greenhouse sebagai Media Pembibitan Kentang Granola Kembang Berbasis Mikrokontroler. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Elektro Terapan*, 02(01), 105-110. <https://prosiding.polinema.ac.id/sngbr/index.php/sntet/article/view/155>
- Slameto, S., Fariroh, I., & Rusdiana, R. Y. (2022). Penerapan teknologi aeroponik untuk produksi benih kentang di Desa Ngadisari Kabupaten Probolinggo. *Dharmakarya*, 11(1), 51. <https://doi.org/10.24198/dharmakarya.v11i1.36136>
- Sumarni, E., Farid, N., Soesanto, L., & Juansah, J. (2018). Pengaruh Waktu Pemberian Nutrisi Pada Produksi Benih Kentang Secara Aeroponik Dengan Aplikasi Root Zone Cooling Di Dataran Rendah Tropis. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 7(3), 142. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v7i3.142-150>
- Veda, J., Rivai, M., & Suwito, S. (2022). Sistem Kontrol dan Monitoring Pemupukan NPK Tanaman dengan Mikrokontroler ESP32. *Jurnal Teknik ITS*, 11(3). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i3.93954>
- Wulandari, & Neng Wina Sumiar. (2021). Pengembangan Sistem Pengaturan Larutan Nutrisi Otomatis Pada Budidaya Kentang Aeroponik. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Agri-Informatika*, 8(1), 57-68. <https://doi.org/10.29244/jika.8.1.57-68>