

# Rancang Bangun dan Uji Kinerja Smart Fertigation Berbasis IoT dengan Monitoring Kelembapan Tanah dan EC pada Budidaya Hortikultura

Novi Indah Pradasari <sup>1,\*</sup>, Eka Wahyudi <sup>2</sup> and Darmanto <sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Teknologi Informasi, Politeknik Negeri Ketapang; novi.ip@politap.ac.id;  
eka.wahyudi@politap.ac.id; darmanto@politap.ac.id

\* Korespondensi: novi.ip@politap.ac.id

## Info Artikel:

Dikirim: 20 April 2026

Direvisi: 20 Mei 2026

Diterima: 30 Mei 2026

**Abstract:** This study aims to design and evaluate the performance of an Internet of Things (IoT)-based smart fertigation system using soil moisture and electrical conductivity (EC) parameters as the basis for monitoring and controlling water and nutrient application. The system was developed using an ESP32 microcontroller, soil moisture and EC sensors, pump/valve actuators, and an IoT dashboard for real-time monitoring of cultivation conditions. The evaluation was conducted through several stages, including system design, sensor calibration, IoT communication testing, control logic testing, and a 30-day pakcoy cultivation trial. The results showed that the soil moisture sensor achieved an RMSE of 1.21 percentage points, while the EC sensor achieved an RMSE of 0.042 mS/cm. IoT communication performance demonstrated a data transmission success rate of 99.17% with an average latency of 1.64 seconds. The implementation of smart fertigation reduced water consumption by 22.34% and nutrient consumption by 24.10% compared with scheduled water and nutrient application. In addition, water productivity increased by 44.02%. These results demonstrate that the IoT-based smart fertigation system can effectively monitor and control water and nutrient application and has the potential to improve resource-use efficiency in horticultural cultivation.

**Keywords:** smart fertigation; Internet of Things; soil moisture; electrical conductivity; ESP32; horticulture

**Intisari:** Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji kinerja sistem *smart fertigation* berbasis Internet of Things (IoT) dengan memanfaatkan parameter kelembapan tanah dan *electrical conductivity* (EC) sebagai dasar pemantauan dan pengendalian pemberian air serta nutrisi. Sistem dikembangkan menggunakan ESP32, sensor kelembapan tanah, sensor EC, aktuator pompa/katup, serta dashboard IoT untuk memantau kondisi budidaya secara real-time. Pengujian dilakukan melalui tahapan perancangan sistem, kalibrasi sensor, pengujian komunikasi IoT, pengujian logika kendali, serta uji budidaya pakcoy selama 30 hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor kelembapan tanah memiliki nilai RMSE sebesar 1,21 poin persentase, sedangkan sensor EC

memperoleh RMSE sebesar 0,042 mS/cm. Kinerja komunikasi IoT menunjukkan tingkat keberhasilan pengiriman data sebesar 99,17% dengan latensi rata-rata 1,64 detik. Penerapan *smart fertigation* mampu menurunkan penggunaan air sebesar 22,34% dan penggunaan nutrisi sebesar 24,10% dibandingkan metode pemberian air dan nutrisi secara terjadwal. Selain itu, produktivitas air meningkat sebesar 44,02%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem *smart fertigation* berbasis IoT mampu melakukan monitoring dan pengendalian air serta nutrisi secara efektif serta berpotensi meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya pada budidaya hortikultura.

**Kata Kunci:** smart fertigation; Internet of Things; kelembapan tanah; electrical conductivity; ESP32; hortikultura

## 1. Pendahuluan

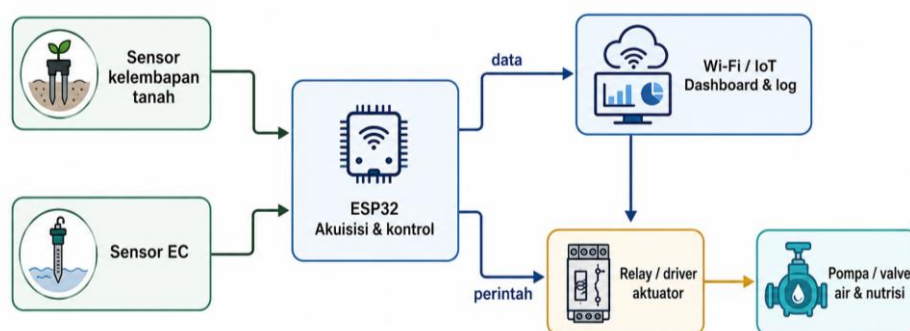
Efisiensi penggunaan air dan pupuk merupakan isu penting pada budidaya hortikultura karena aplikasi berbasis jadwal tetap dapat menyebabkan pemberian yang tidak sesuai dengan kondisi aktual zona perakaran. Fertigasi mengintegrasikan pemberian air dan pupuk terlarut melalui jaringan irigasi, sedangkan teknologi Internet of Things (IoT) memungkinkan kondisi media dipantau secara berkala sehingga keputusan pengelolaan dapat didasarkan pada data. Monitoring kelembapan dan konduktivitas listrik telah digunakan untuk merekam dinamika air dan ion terlarut pada sistem fertigasi [1]. Di Indonesia, sistem fertigasi otomatis berbasis ESP32 dan IoT juga telah dikembangkan dengan mengintegrasikan sensor serta aktuator untuk pemantauan melalui perangkat bergerak [2].

Kelembapan tanah menggambarkan ketersediaan air pada zona perakaran, sedangkan electrical conductivity (EC) digunakan sebagai indikator umum konsentrasi ion terlarut. EC tidak mengidentifikasi unsur hara secara individual, sehingga interpretasinya tetap harus dikaitkan dengan formulasi pupuk, media, kualitas air, dan komoditas. Pengembangan sistem fertigasi berbasis IoT pada selada menunjukkan bahwa sensor, kontrol lingkungan mikro, dan pemantauan jarak jauh dapat diintegrasikan dalam satu sistem [3]. Kerangka optimasi irigasi-fertigasi berbasis IoT juga menekankan pentingnya pemanfaatan data untuk mendukung distribusi air dan makronutrien secara lebih terukur [4].

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengembangkan prototipe *smart fertigation* berbasis Internet of Things (IoT) dengan memanfaatkan parameter kelembapan tanah dan *electrical conductivity* (EC) sebagai dasar pemantauan dan pengendalian pemberian air serta nutrisi. Pengujian dilakukan terhadap kinerja sensor melalui proses kalibrasi, keandalan komunikasi IoT, serta kemampuan sistem dalam mengendalikan aktuator berdasarkan kondisi media tanam. Evaluasi sistem mencakup penggunaan air, penggunaan nutrisi, kestabilan parameter kelembapan dan EC, serta respons pertumbuhan tanaman. Kontribusi penelitian diarahkan pada integrasi proses *sensing*, akuisisi dan pencatatan data secara real-time, komunikasi IoT, serta kendali aktuator dalam satu sistem *smart fertigation* yang terintegrasi untuk mendukung pengelolaan air dan nutrisi secara lebih terukur dan efisien pada budidaya hortikultura.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Rancangan Sistem



**Gambar 1.** Arsitektur prototipe smart fertigation berbasis IoT.

Penelitian menggunakan pendekatan rancang bangun dan eksperimen. Tahapan penelitian meliputi identifikasi kebutuhan, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, kalibrasi sensor, integrasi sistem, uji komunikasi, uji logika kendali, uji budidaya, dan analisis data. Arsitektur prototipe pada Gambar 1 menggunakan sensor kelembapan tanah dan sensor EC sebagai masukan, ESP32 sebagai unit akuisisi dan kendali, koneksi Wi-Fi untuk dashboard dan histori data, serta relay/driver untuk mengendalikan pompa atau katup air dan nutrisi.

**Tabel 1.** Komponen utama prototipe dan fungsi.

| Komponen                    | Fungsi                                              |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------|
| ESP32                       | Akuisisi data, logika kendali, dan komunikasi Wi-Fi |
| Sensor kelembapan kapasitif | Mengukur kondisi kelembapan media tanam             |
| Sensor EC dan probe         | Mengukur konduktivitas listrik larutan/media        |
| Relay/MOSFET driver         | Mengendalikan pompa atau solenoid valve             |
| Pompa/solenoid valve        | Menyalurkan air dan larutan nutrisi                 |
| Dashboard IoT               | Monitoring, penyimpanan histori, dan status sistem  |

## 2.2. Kalibrasi Sensor dan Uji Komunikasi

Sensor kelembapan diuji pada 30 tingkat pembacaan dan dibandingkan dengan nilai referensi, sedangkan sensor EC dibandingkan dengan nilai referensi pada rentang 0,5-3,0 mS/cm. Kinerja sensor dievaluasi dengan mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE), dan koefisien determinasi ( $R^2$ ). Persamaan yang digunakan dituliskan sebagai berikut:

$$MAE = (1/n) \sum |\hat{y}_i - y_i| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{(1/n) \sum (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (2)$$

$$MAPE = (100/n) \sum |(\hat{y}_i - y_i)/y_i| \quad (3)$$

Pengujian komunikasi mencatat jumlah paket yang dikirim, persentase paket yang berhasil diterima, latensi rata-rata, dan latensi persentil-95. Indikator tersebut dipilih karena aplikasi fertigasi tidak membutuhkan respons milidetik, tetapi tetap memerlukan pengiriman data yang konsisten untuk monitoring dan pencatatan.

## 2.3. Uji Budidaya dan Analisis Data

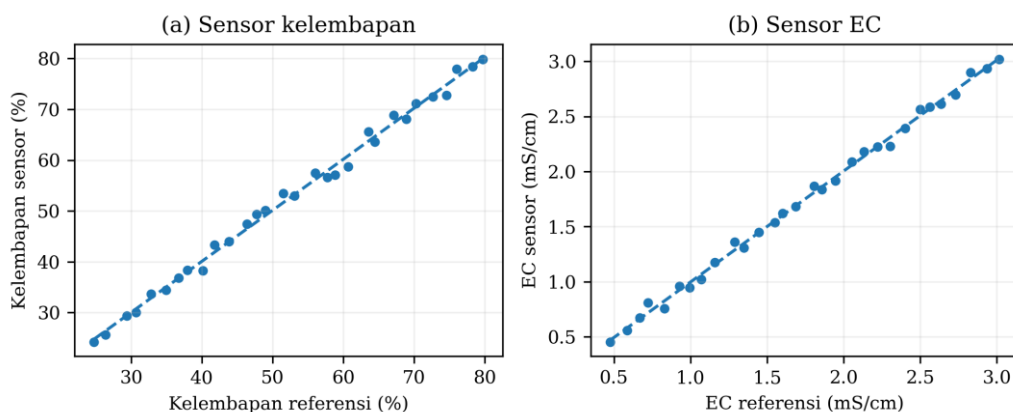
Uji budidaya dilakukan pada tanaman pakcoy selama 30 hari dengan dua perlakuan, yaitu smart fertigation dan pengelolaan terjadwal sebagai pembanding. Masing-masing perlakuan terdiri atas 15 unit tanaman. Data sensor dicatat setiap empat jam untuk merekam perubahan kondisi media secara berkala. Rentang kendali sistem ditetapkan pada 55-70% untuk kelembapan dan 1,6-2,1 mS/cm untuk EC selama periode pengujian.

Variabel yang dianalisis meliputi volume air, volume larutan nutrisi, bobot segar, tinggi tanaman, jumlah daun, panjang akar, dan produktivitas air. Produktivitas air dihitung sebagai bobot segar tanaman dibagi volume air yang digunakan. Perbandingan antara perlakuan smart fertigation dan pengelolaan terjadwal dianalisis menggunakan uji t Welch pada taraf signifikansi 5%. Nilai p digunakan untuk menilai ada atau tidaknya perbedaan yang signifikan antara kedua perlakuan.

# 3. Hasil dan Pembahasan

## 3.1. Kinerja Sensor dan Komunikasi IoT

Hubungan pembacaan sensor terhadap nilai referensi ditunjukkan pada Gambar 2. Hasil kalibrasi sensor kelembapan menghasilkan MAE 1,00 poin persentase, RMSE 1,21 poin persentase, MAPE 1,96%, dan  $R^2$  0,995. Sensor EC menghasilkan MAE 0,034 mS/cm, RMSE 0,042 mS/cm, MAPE 2,62%, dan  $R^2$  0,997. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pembacaan kedua sensor memiliki kedekatan yang tinggi terhadap nilai referensi dan layak digunakan sebagai masukan pada sistem kendali. Penelitian berbasis jaringan sensor kelembapan pada kebun pir juga menekankan pentingnya validasi sensor sebelum digunakan untuk keputusan irigasi [5].



**Gambar 2.** Hasil kalibrasi: (a) sensor kelembapan tanah; (b) sensor EC.

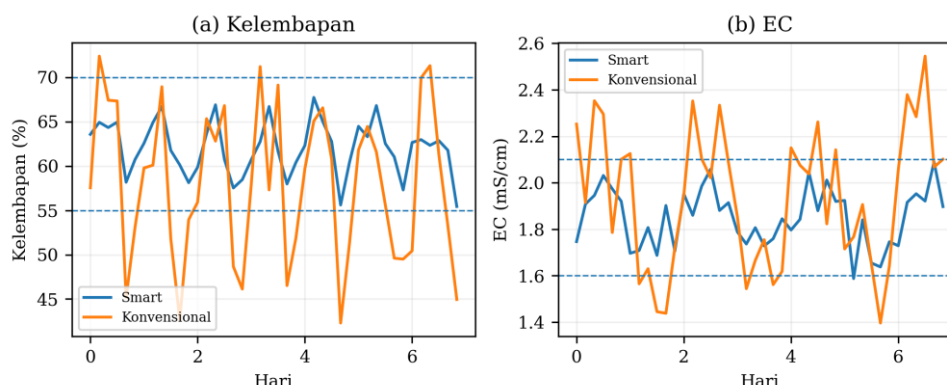
**Tabel 2.** Ringkasan kinerja sensor dan komunikasi IoT.

| Indikator                 | Hasil pengujian      |
|---------------------------|----------------------|
| RMSE kelembapan           | 1.21 poin persentase |
| MAPE kelembapan           | 1.96%                |
| R <sup>2</sup> kelembapan | 0.995                |
| RMSE EC                   | 0.042 mS/cm          |
| MAPE EC                   | 2.62%                |
| R <sup>2</sup> EC         | 0.997                |
| Paket komunikasi diuji    | 720                  |
| Keberhasilan pengiriman   | 99.17%               |
| Latensi rata-rata         | 1.64 detik           |
| Latensi persentil-95      | 2.47 detik           |

Pengujian komunikasi IoT menghasilkan tingkat keberhasilan pengiriman data sebesar 99,17% dengan latensi rata-rata 1,64 detik dan latensi persentil-95 sebesar 2,47 detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komunikasi sistem mampu mendukung monitoring dan pencatatan data secara berkala. Meskipun demikian, kualitas komunikasi tetap dipengaruhi oleh jarak, penghalang, kualitas Wi-Fi, kestabilan daya, dan akses internet. Karena fungsi kendali lokal berada pada ESP32, mekanisme fail-safe perlu tetap berjalan apabila koneksi ke dashboard terputus.

### 3.2. Stabilitas Kelembapan dan EC

Hasil pengujian menunjukkan bahwa 97,22% data pada sistem smart fertigation berada secara bersamaan dalam rentang kelembapan 55-70% dan EC 1,6-2,1 mS/cm, sedangkan pada pengelolaan terjadwal proporsinya sebesar 27,22%. Pola perubahan selama tujuh hari pertama disajikan pada Gambar 3. Persentase yang lebih tinggi pada smart fertigation menunjukkan bahwa mekanisme kendali mampu melakukan koreksi ketika kondisi kelembapan atau EC mendekati batas yang telah ditetapkan.



**Gambar 3.** Dinamika kelembapan dan EC selama tujuh hari pertama: (a) kelembapan; (b) EC.

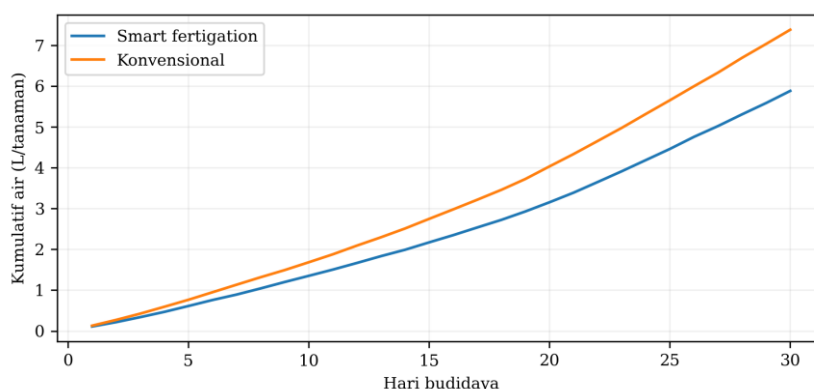
Kelembapan dan EC memberikan informasi yang saling melengkapi. Kelembapan digunakan untuk menilai kebutuhan air, sedangkan EC menggambarkan konsentrasi ion secara umum. Pada pakcoy, respons pertumbuhan dan kualitas diketahui dipengaruhi oleh tingkat EC larutan nutrisi [6]. Dalam penelitian ini, rentang EC 1,6-2,1 mS/cm digunakan sebagai parameter kendali selama pengujian, dengan tetap mempertimbangkan bahwa kebutuhan EC dapat berbeda menurut komoditas, media, kualitas air, dan formulasi nutrisi.

### 3.3. Penggunaan Air, Nutrisi, dan Respons Tanaman

Perbandingan penggunaan sumber daya dan respons tanaman diringkas pada Tabel 3. Smart fertigation menggunakan air rata-rata 5,83 L/tanaman dibandingkan 7,51 L/tanaman pada pengelolaan terjadwal, sehingga penggunaan air berkurang sebesar 22,34%. Penggunaan larutan nutrisi juga menurun sebesar 24,10%. Kumulatif penggunaan air selama 30 hari ditunjukkan pada Gambar 4.

**Tabel 3.** Perbandingan hasil perlakuan smart fertigation dan pengelolaan terjadwal.

| Parameter                  | Smart  | Konvensional | Perubahan    |
|----------------------------|--------|--------------|--------------|
| Air total (L/tanaman)      | 5.83   | 7.51         | hemat 22.34% |
| Nutrisi total (mL/tanaman) | 169.87 | 223.79       | hemat 24.10% |
| Bobot segar (g/tanaman)    | 226.00 | 202.10       | +11.83%      |
| Tinggi (cm)                | 24.59  | 23.43        | +4.94%       |
| Jumlah daun                | 13.53  | 12.87        | +5.18%       |
| Panjang akar (cm)          | 18.68  | 16.74        | +11.62%      |
| Produktivitas air (g/L)    | 38.85  | 26.98        | +44.02%      |



**Gambar 4.** Kumulatif penggunaan air selama 30 hari pengujian.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa bobot segar tanaman pada perlakuan smart fertigation meningkat sebesar 11,83%, sedangkan produktivitas air meningkat sebesar 44,02% dibandingkan pengelolaan terjadwal. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian air dan nutrisi berdasarkan kondisi media dapat meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya sekaligus mempertahankan respons pertumbuhan tanaman. Studi fertigasi pada semangka juga menunjukkan bahwa kombinasi pengelolaan air dan NPK dapat memengaruhi hasil serta efisiensi penggunaan air maupun nutrisi, meskipun besarnya respons bergantung pada perlakuan dan kondisi budidaya [7][8].

**Tabel 4.** Hasil uji t Welch pada parameter pengamatan.

| Variabel          | t       | p      | Interpretasi     |
|-------------------|---------|--------|------------------|
| Air               | -13.592 | <0,001 | Signifikan       |
| Nutrisi           | -17.691 | <0,001 | Signifikan       |
| Bobot segar       | 6.639   | <0,001 | Signifikan       |
| Tinggi            | 2.407   | 0,023  | Signifikan       |
| Jumlah daun       | 1.994   | 0,056  | Tidak signifikan |
| Panjang akar      | 3.522   | 0,002  | Signifikan       |
| Produktivitas air | 14.827  | <0,001 | Signifikan       |

Hasil uji t Welch menunjukkan bahwa variabel jumlah daun memiliki  $p=0,056$  sehingga tidak berbeda signifikan pada taraf 5%. Sementara itu, penggunaan air, penggunaan nutrisi, bobot segar, tinggi tanaman, panjang akar, dan produktivitas air memiliki  $p<0,05$  sehingga menunjukkan perbedaan yang signifikan antara perlakuan smart fertigation dan pengelolaan terjadwal. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa penerapan sistem memberikan pengaruh yang lebih jelas pada efisiensi sumber daya dan beberapa parameter pertumbuhan dibandingkan pada jumlah daun.

### 3.4. Implikasi dan Keterbatasan

Secara konseptual, prototipe menggabungkan tiga fungsi: sensing untuk membaca kondisi zona perakaran, konektivitas IoT untuk menyimpan dan menampilkan data, serta logika kendali untuk mengubah data menjadi tindakan pada aktuator. Kombinasi ini membedakan smart fertigation dari sistem monitoring pasif. Penelitian Kumari dkk. [1] menunjukkan bahwa perubahan kelembapan dan EC dapat direkam secara real-time pada fertigasi terkontrol dan lapangan, sedangkan sistem ESP32 yang dikembangkan Anggayana dkk. [2] menunjukkan kelayakan integrasi mikrokontroler, sensor, aktuator, dan IoT pada fertigasi otomatis.

Penelitian ini dibatasi pada budidaya pakcoy selama 30 hari dengan 15 unit tanaman pada masing-masing perlakuan serta kondisi jaringan dan lingkungan di lokasi pengujian. Rentang kelembapan 55-70% dan EC 1,6-2,1 mS/cm merupakan parameter operasional pada penelitian ini dan tidak dapat digeneralisasikan untuk seluruh komoditas hortikultura. Selain itu, EC digunakan sebagai indikator umum konsentrasi ion dan tidak mengidentifikasi unsur hara secara individual. Pengembangan berikutnya dapat menambahkan flow sensor untuk pencatatan debit secara otomatis, memperluas pengujian pada komoditas dan musim yang berbeda, serta memperkuat mekanisme interlock dan fail-safe untuk meningkatkan keandalan sistem[9].

## 4. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa smart fertigation berbasis IoT mampu mengintegrasikan sensor kelembapan tanah dan EC, ESP32, dashboard IoT, serta aktuator pemberian air dan nutrisi dalam satu arsitektur monitoring dan kendali. Hasil kalibrasi menghasilkan RMSE kelembapan sebesar 1,21 poin persentase dan RMSE EC sebesar 0,042 mS/cm, sedangkan pengujian komunikasi menunjukkan tingkat keberhasilan pengiriman data sebesar 99,17%. Penerapan smart fertigation menurunkan penggunaan air sebesar 22,34% dan penggunaan nutrisi sebesar 24,10%, serta meningkatkan produktivitas air sebesar 44,02% dibandingkan pengelolaan terjadwal. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mendukung pengelolaan air dan nutrisi secara lebih terukur dan efisien pada budidaya pakcoy. Pengembangan selanjutnya dapat diarahkan pada pengujian multi-komoditas, periode budidaya yang lebih panjang, integrasi flow sensor, dan penguatan mekanisme fail-safe.

### Daftar Pustaka

- [1] S. Kumari, N. Ali, M. Dagati, and Y. Dong, "IoT-Enabled Soil Moisture and Conductivity Monitoring Under Controlled and Field Fertigation Systems," *AgriEngineering*, vol. 7, no. 7, art. 207, 2025, doi: 10.3390/agriengineering7070207.
- [2] Y. Anggayana, I. P. G. Budisanjaya, and I. B. P. Gunadnya, "Rancang Bangun Sistem Fertigasi Otomatis Berbasis Mikrokontroler dan IoT (Internet of Things)," *Jurnal BETA (Biosistem dan Teknik Pertanian)*, vol. 13, no. 1, pp. 190-199, 2025, doi: 10.24843/j.beta.2025.v13.i01.p21.
- [3] Suhartono, C. Umam, S. Supriyadi, and E. Saputro, "Rancang Bangun Fertigasi Tetes dan Kontrol Lingkungan Mikro Berbasis IoT terhadap Pertumbuhan Tanaman Selada (*Lactuca sativa* L.)," *Jurnal BETA (Biosistem dan Teknik Pertanian)*, vol. 11, no. 1, 2023, doi: 10.24843/JBETA.2023.v11.i01.p08.
- [4] T. Adamo, D. Caivano, L. Colizzi, G. Dimauro, and E. Guerriero, "Optimization of irrigation and fertigation in smart agriculture: An IoT-based micro-services framework," *Smart Agricultural Technology*, vol. 11, art. 100885, 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.100885.
- [5] F. Hamouda, À. Puig-Sirera, L. Bonzi, D. Remorini, R. Massai, and G. Rallo, "Design and validation of a soil moisture-based wireless sensors network for the smart irrigation of a pear orchard," *Agricultural Water Management*, vol. 305, art. 109138, 2024, doi: 10.1016/j.agwat.2024.109138.
- [6] X. Ding, Y. Jiang, H. Zhao, et al., "Electrical conductivity of nutrient solution influenced photosynthesis, quality, and antioxidant enzyme activity of pakchoi in a hydroponic system," *PLOS ONE*, vol. 13, no. 8, e0202090, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0202090.
- [7] X.-C. Wang, R. Liu, J.-N. Luo, et al., "Effects of water and NPK fertigation on watermelon yield, quality, irrigation-water, and nutrient use efficiency under alternate partial root-zone drip irrigation," *Agricultural Water Management*, vol. 271, art. 107785, 2022, doi: 10.1016/j.agwat.2022.107785.
- [8] F. Idris, A. A. Latiff, M. A. Buntat, Y. Lecthmanan, and Z. Berahim, "IoT-based fertigation system for agriculture," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 13, no. 3, pp. 1574–1581, 2024, doi: 10.11591/eei.v13i3.6829. Penelitian ini sangat relevan karena menggunakan ESP32, EC, dashboard IoT, serta sistem fertigasi otomatis
- [9] Y. Dong, B. Werling, Z. Cao, and G. Li, "Implementation of an in-field IoT system for precision irrigation management," *Frontiers in Water*, vol. 6, art. 1353597, 2024, doi: 10.3389/frwa.2024.1353597. Referensi ini kuat untuk menjelaskan peran sensor kelembapan tanah dan IoT dalam precision irrigation