

INTEGRASI SENSOR PH DAN TDS DENGAN APLIKASI TUYA UNTUK SISTEM KONTROL NUTRISI *REAL-TIME* PADA PEMBIBITAN KENTANG AEROPONIK: PENDEKATAN *SMART FARMING* BERBASIS IOT

Ilham Ariawan Al Ashar¹⁾, Hermawan²⁾, Muslim Hidayat³⁾, Jenny Febrina Andini⁴⁾, Muhamad Fuat Asnawi⁵⁾, Ahmad Irfa'I⁶⁾, Gusti Ilman Prayoga⁷⁾, Ghani Al Fatah⁸⁾, Bunga Seroja Sanra Azzahra⁹⁾, Aditya Dwi Anggoro¹⁰⁾, Slamet Miftahul Huda¹¹⁾, Azzam Ghazi Khoirullah¹²⁾, Abi Thri Nur Rozabin¹³⁾, Ahmad Latif Hendrawan¹⁴⁾, Amy Puspita¹⁵⁾, Zayyana Maulida¹⁶⁾, Nurohman¹⁷⁾

¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾ Universitas Sains Al-Qur'an Jawa Tengah di Wonosobo

Email : ilhamalashar2@gmail.com ¹⁾, hermawan@unsiq.ac.id ²⁾, muslim_h@unsiq.ac.id ³⁾, Jeyniefibr@gmail.com ⁴⁾, fuatasnawi@unsiq.ac.id ⁵⁾, ahmadokeypunya8899@gmail.com ⁶⁾, gustiyoga234@gmail.com ⁷⁾, ghanzalfatah23@gmail.com ⁸⁾, azbunga25@gmail.com ⁹⁾, adityadwianggoro13@gmail.com ¹⁰⁾, unyaksudemplo@gmail.com ¹¹⁾, asabilisucisulton@gmail.com ¹²⁾, Abithri04@gmail.com ¹³⁾, ahmadlatifhendrawan@gmail.com ¹⁴⁾, amypuspita51@gmail.com ¹⁵⁾, zayyanamaulida1@gmail.com ¹⁶⁾, nurohman452004@gmail.com ¹⁷⁾

ABSTRAK

Keterbatasan lahan dan meningkatnya kebutuhan pangan menuntut penerapan teknologi pertanian presisi. Penelitian ini mengembangkan sistem kontrol nutrisi real-time berbasis Internet of Things (IoT) dengan integrasi sensor pH dan TDS yang terhubung ke aplikasi Tuya Smart untuk pembibitan kentang aeroponik. Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan algoritma kontrol logika ambang. Hasil uji menunjukkan akurasi tinggi (deviasi pH $\pm 0,05$; kesalahan TDS $< 2\%$) serta kestabilan larutan selama tujuh hari (fluktuasi pH $\pm 0,15$; TDS ± 80 ppm). Algoritma mampu menjaga pH 5,5–6,5 dan TDS 800–1200 ppm dengan respon 45–60 detik. Pertumbuhan vegetatif meningkat signifikan, meliputi tinggi bibit (6,2–10,4 cm), jumlah daun (2–5), dan panjang akar (4,5–8,2 cm). Berbeda dari studi sebelumnya yang berfokus pada monitoring, penelitian ini menambahkan kontrol otomatis dan memanfaatkan platform Tuya Smart yang responsif (delay 2–3 detik). Hasil ini menunjukkan potensi implementasi praktis untuk meningkatkan produktivitas, efisiensi, dan keberlanjutan budidaya kentang berbasis smart farming.

Kata Kunci : smart farming, aeroponik, IoT, kontrol nutrisi, Tuya Smart

ABSTRACT

Limited land and increasing food demand require the application of precision agriculture technology. This study developed a real-time nutrient control system based on the Internet of Things (IoT) with integrated pH and TDS sensors connected to the Tuya Smart application for aeroponic potato seedlings. The system was designed using an ESP32 microcontroller with a threshold logic control algorithm. Test results showed high accuracy (pH deviation ± 0.05 ; TDS error $< 2\%$) and solution stability for seven days (pH fluctuation ± 0.15 ; TDS ± 80 ppm). The algorithm was able to maintain pH 5.5–6.5 and TDS 800–1200 ppm with a response time of 45–60 seconds. Vegetative growth increased significantly, including seedling height (6.2–10.4 cm), number of leaves (2–5), and root length (4.5–8.2 cm). Unlike previous studies that focused on monitoring, this research adds automated controls and utilizes the responsive Tuya Smart platform (2–3 seconds delay). These results demonstrate the potential for practical implementation to improve the productivity, efficiency, and sustainability of smart farming-based potato cultivation.

Keywords: smart farming, aeroponics, IoT, nutrient control, Tuya Smart

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah penduduk di seluruh dunia adalah masalah penting yang langsung berpengaruh pada keberlanjutan sistem pangan global. Industri pertanian merupakan komponen vital perekonomian nasional, bersama sektor jasa dan manufaktur, yang sebagian besar menggunakan pertanian konvensional berbasis lahan untuk produksi pangan. Menurut perkiraan dari Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), populasi dunia diperkirakan akan bertambah dari sekitar 7,7 miliar jiwa pada tahun 2019 menjadi 9,7 miliar jiwa pada tahun 2050 (Fellisita et al., 2024). Kenaikan ini secara otomatis meningkatkan tekanan pada ketersediaan makanan, yang dalam kenyataannya menghadapi banyak batasan. Di satu pihak, permintaan akan makanan semakin tinggi, sementara di pihak lain, luas lahan pertanian yang subur semakin menyusut akibat peralihan fungsi lahan, urbanisasi, dan kerusakan lingkungan *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2018).

Situasi ini menunjukkan adanya ketidakseimbangan antara pertumbuhan permintaan makanan dan kapasitas produksi tradisional yang ada. Jika tidak ditangani dengan cara yang inovatif, kondisi ini dapat memperburuk masalah ketahanan pangan global di masa depan. Oleh karena itu, diperlukan perubahan dalam sistem pertanian dengan mengadopsi teknologi modern yang tidak hanya fokus pada peningkatan hasil, tetapi juga memperhatikan efisiensi, kemampuan beradaptasi terhadap perubahan iklim, serta keberlanjutan lingkungan (Awal et al., 2025). Dengan cara ini, inovasi dalam sektor pertanian menjadi kunci penting untuk menghadapi tantangan kompleks dalam memenuhi kebutuhan pangan di dunia.

Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah sistem aeroponik, yaitu metode bercocok tanam tanpa media tanah dengan akar tanaman tersuspensi di udara dan diberi larutan nutrisi melalui sistem pengkabutan (Fasciolo et al., 2023). Sistem ini memiliki keunggulan dibandingkan metode konvensional karena mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 90%,

memaksimalkan penggunaan ruang melalui sistem vertikal, serta memungkinkan kontrol lingkungan yang lebih presisi (Min et al., 2023). Namun demikian, tantangan utama aeroponik terletak pada pengelolaan nutrisi yang harus dijaga stabil dan sesuai dengan fase pertumbuhan tanaman.

Pengendalian nutrisi dalam sistem aeroponik sangat bergantung pada parameter pH dan TDS (*Total Dissolved Solids*). Nilai pH berperan penting dalam menentukan ketersediaan unsur hara, sementara TDS menunjukkan konsentrasi larutan nutrisi yang dapat diserap tanaman. Ketidakseimbangan kedua parameter ini dapat menghambat penyerapan nutrisi, menurunkan produktivitas, atau bahkan menyebabkan kerusakan tanaman (Rofiansyah et al., 2025). Oleh karena itu, pemantauan pH dan TDS secara *real-time* menjadi kebutuhan utama dalam praktik budidaya aeroponik modern.

Dalam beberapa tahun terakhir, integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) dengan sistem pertanian telah banyak dikembangkan. (Abu Snehneh & Shabaneh, 2023) berhasil merancang sistem monitoring hidroponik berbasis IoT dengan sensor pH, TDS, suhu, dan level air, yang memungkinkan pemantauan jarak jauh secara daring. Penelitian lain oleh (M Shetty et al., 2021) juga menunjukkan keberhasilan penggunaan sensor pH dan TDS pada sistem hidroponik skala kecil untuk memudahkan penyesuaian larutan nutrisi. Sementara itu, sistem aeroponik merupakan metode budidaya tanpa tanah dengan akar tanaman yang digantung di udara dan disuplai larutan nutrisi berbentuk kabut, sehingga memungkinkan kontrol lingkungan yang presisi serta efisiensi air dan nutrisi yang tinggi (Rehman et al., 2024). Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada tanaman daun (sayuran) dan sistem hidroponik statis, sementara penerapan pada sistem aeroponik untuk pembibitan kentang masih terbatas.

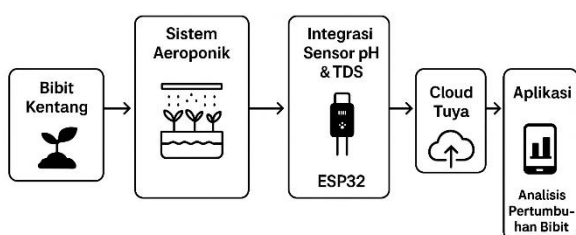
Kentang merupakan salah satu komoditas pangan strategis di Indonesia yang berperan sebagai sumber karbohidrat selain beras. Keberhasilan pembibitan kentang sangat

menentukan kualitas dan produktivitas pada fase budidaya berikutnya. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengelolaan nutrisi yang presisi dan responsif untuk mendukung pertumbuhan optimal pada tahap pembibitan. Integrasi sensor pH dan TDS dengan aplikasi berbasis IoT, seperti Tuya yang dapat di akses melalui laman <https://www.tuya.com/product/app-management/all-in-one-app> atau melalui service@tuya.com. Dari integrasi aplikasi IoT tersebut dapat menjadi solusi inovatif karena memungkinkan pemantauan dan pengendalian nutrisi secara *real-time* melalui perangkat mobile. Sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dan akurasi pengelolaan nutrisi, tetapi juga memberikan kemudahan akses bagi petani dalam mengontrol kondisi budidaya kapan pun dan di mana pun.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini difokuskan pada pengembangan sistem kontrol nutrisi *real-time* berbasis IoT dengan integrasi sensor pH dan TDS yang terhubung dengan aplikasi Tuya untuk pembibitan kentang aeroponik. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan kontribusi signifikan dalam penerapan *smart farming* di bidang hortikultura, khususnya dalam meningkatkan produktivitas, efisiensi, dan keberlanjutan budidaya kentang di era pertanian modern.

2. METODE

2.1 Desain Penelitian



Gambar 1. Rancangan Ekperimen IoT-Based *smart Farming*

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan rancangan *Internet of Things (IoT)-based smart farming system* yang difokuskan pada integrasi sensor pH dan TDS dalam sistem aeroponik untuk pembibitan kentang. Rancangan eksperimen dipilih karena

memberikan peluang untuk menguji secara langsung efektivitas sistem dalam menjaga kestabilan nutrisi serta dampaknya terhadap pertumbuhan vegetatif bibit.

Pendekatan ini dikategorikan sebagai *applied research*, bukan sekadar *proof-of-concept*, karena diarahkan untuk menghasilkan sistem yang dapat diimplementasikan secara nyata di lahan pertanian. Hal ini memberikan kontribusi praktis sekaligus ilmiah dalam pengembangan teknologi *smart farming*.

Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang sebagian besar hanya menekankan aspek monitoring pasif, penelitian ini menghadirkan novelty berupa integrasi monitoring dan kontrol nutrisi *real-time*. Dengan mekanisme ini, sistem tidak hanya mendeteksi kondisi nutrisi tetapi juga melakukan koreksi otomatis melalui pengendalian pH dan TDS, sehingga lebih relevan dengan kebutuhan praktik pertanian modern. Untuk memperjelas rancangan penelitian, berikut disajikan tabel variabel penelitian pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel Penelitian

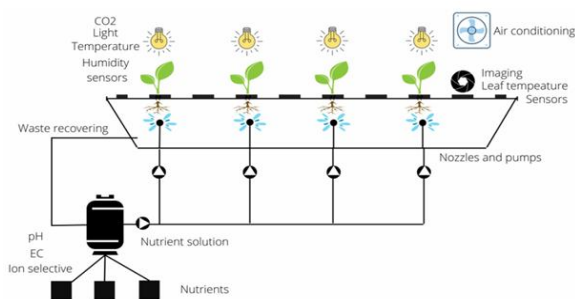
Jenis Variabel	Indikator
Variabel Independen	Integrasi sensor pH, TDS, dan mekanisme kontrol IoT berbasis ESP32–Tuya Cloud.
Variabel Dependen	Stabilitas nutrisi (pH dan TDS) serta pertumbuhan vegetatif bibit kentang.
Variabel Kontrol	Suhu, kelembaban, intensitas cahaya, jenis bibit, dan kondisi media aeroponik.

2.2 Perancangan Sistem Aeroponik

Sistem aeroponik yang dikembangkan terdiri atas rangka berbahan PVC, tangki nutrisi berkapasitas 1500 liter, pompa sirkulasi, serta nozzle atomisasi yang berfungsi menyemprotkan larutan langsung ke akar tanaman. Bibit kentang ditempatkan pada netpot dengan posisi akar menggantung agar kontak dengan oksigen lebih optimal. Desain

ini mengadopsi prinsip *Controlled Environment Agriculture* (CEA), di mana kondisi pertumbuhan dapat dikontrol penuh (Narimani et al., 2021).

Larutan nutrisi diformulasikan sesuai kebutuhan fase vegetatif bibit kentang dengan pH optimal 5,5–6,5 dan TDS 800–1200 ppm. Rentang ini dipilih berdasarkan justifikasi fisiologis, di mana pH memengaruhi ketersediaan unsur hara, sedangkan TDS mencerminkan konsentrasi nutrisi yang dapat diserap akar. Ketidakseimbangan kedua parameter ini terbukti menurunkan efisiensi serapan hara serta menekan pertumbuhan vegetatif tanaman.



Gambar 2. Konsep Aeroponik

2.3 Integrasi Sensor dan IoT

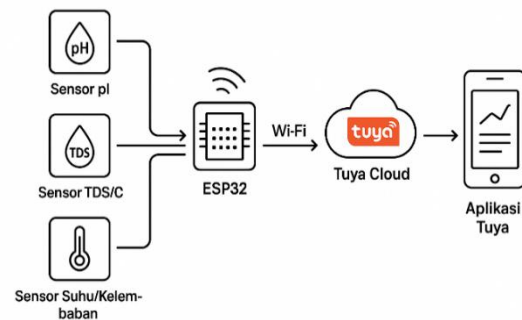
Untuk mendukung pemantauan nutrisi, digunakan sistem sensor yang terdiri atas:

1. Sensor pH dengan akurasi $\pm 0,01$ untuk memantau keasaman larutan.
2. Sensor TDS/EC dengan tingkat error $< 1\%$ untuk mengukur konsentrasi nutrisi (ppm).
3. Sensor suhu dan kelembapan sebagai parameter pendukung kondisi lingkungan.

Sensor terhubung ke mikrokontroler ESP32 yang dipilih karena mendukung konektivitas Wi-Fi, hemat energi, serta kompatibel dengan protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT). Seluruh data dari sensor diproses dan dikirimkan secara nirkabel ke aplikasi Tuya.

Berbeda dengan penelitian terdahulu yang sebagian besar menggunakan server Thingspeak atau aplikasi khusus untuk visualisasi, penelitian ini menghadirkan novelty berupa integrasi dengan aplikasi komersial Tuya. Integrasi ini meningkatkan

usability dan *scalability*, sehingga sistem dapat diadopsi secara luas baik pada tingkat penelitian maupun praktik pertanian lapangan.



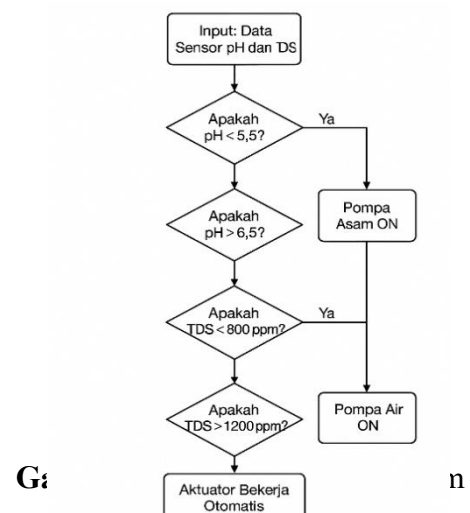
Gambar 3. Blok Diagram Sistem

3.4 Sistem Kontrol Real-Time

Untuk membuktikan aspek “kontrol” dalam judul penelitian, sistem ini tidak hanya melakukan pemantauan, tetapi juga mengimplementasikan algoritma kontrol berbasis logika *threshold*. Mekanisme yang diterapkan adalah:

1. Jika $\text{pH} < 5,5$, pompa larutan basa diaktifkan.
2. Jika $\text{pH} > 6,5$, pompa larutan asam diaktifkan.
3. Jika $\text{TDS} < 800$ ppm, pompa nutrisi tambahan diaktifkan.
4. Jika $\text{TDS} > 1200$ ppm, sistem mengalirkan air untuk menurunkan konsentrasi.

Sebagai pengembangan, mekanisme ini dapat diperluas dengan kontrol PID sederhana untuk menstabilkan pH dan TDS secara lebih halus, sesuai rekomendasi studi kontrol IoT pertanian.



2.4 Integrasi Aplikasi Tuya

Aplikasi Tuya Smart digunakan sebagai antarmuka pengguna (*user interface*). Melalui aplikasi ini, pengguna dapat:

1. Memantau parameter secara *real-time* (pH, TDS, suhu, dan kelembaban).
2. Menerima peringatan otomatis jika parameter keluar dari batas optimal.
3. Mengendalikan pompa baik secara otomatis maupun manual melalui smartphone.

Penggunaan Tuya sebagai platform komersial memberikan kontribusi inovasi karena berbeda dengan aplikasi penelitian yang bersifat khusus dan terbatas. Pendekatan ini membuat sistem lebih praktis, mudah diakses, dan mendukung adopsi dalam skala yang lebih besar.

2.5 Prosedur Uji Coba

Proses pengujian dilakukan dalam tiga tahap:

1. Kalibrasi Sensor
 - a. Sensor pH diuji menggunakan larutan buffer pH 4, 7, dan 10.
 - b. Sensor TDS diuji menggunakan larutan standar 800- 1200 ppm.
 - c. Kalibrasi diulang sebanyak tiga kali untuk memastikan konsistensi data.
2. Uji Fungsional Sistem
 - a. Sistem dijalankan tanpa tanaman selama 7 hari untuk memverifikasi kestabilan sensor serta respon pompa otomatis.
 - b. Data sensor dibandingkan dengan pengukuran manual menggunakan pH meter dan EC meter portabel.
3. Implementasi pada Tanaman
 - a. Parameter pH, TDS, suhu, dan kelembaban dicatat setiap hari, sementara pertumbuhan vegetatif (tinggi tanaman, jumlah daun, panjang akar) diukur mingguan.
 - b. Sistem pencatatan data menggunakan logging otomatis

untuk mengurangi potensi bias pencatatan manual.

Detail teknis ini dirancang agar penelitian dapat direplikasi oleh peneliti lain dengan perangkat dan kondisi serupa.

2.6 Analisis Data

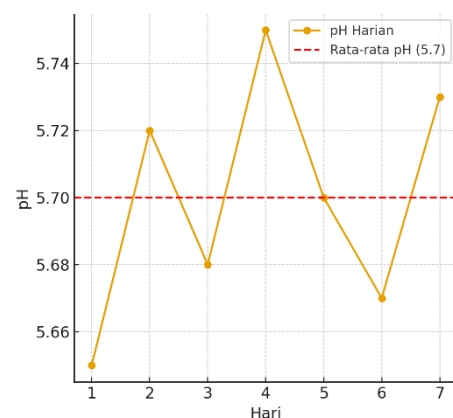
Data dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan indikator:

1. Stabilitas parameter larutan nutrisi: ditinjau dari deviasi harian pH ($<\pm 0,2$) dan TDS ($<\pm 100$ ppm).
2. Efektivitas sistem otomatis: dilihat dari waktu respon pompa dalam mengoreksi penyimpangan.
3. Pertumbuhan vegetatif bibit kentang: dibandingkan dengan standar pertumbuhan pada literatur aeroponik.

Hasil analisis selanjutnya dibandingkan dengan penelitian sebelumnya pada aeroponik berbasis IoT untuk memperkuat klaim novelty. Perbandingan ini menegaskan bahwa sistem berbasis Tuya yang dikembangkan dalam penelitian ini lebih efisien, adaptif, dan aplikatif dalam mendukung implementasi *smart farming* di tingkat praktis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Validasi Sensor dan Stabilitas Awal Sistem

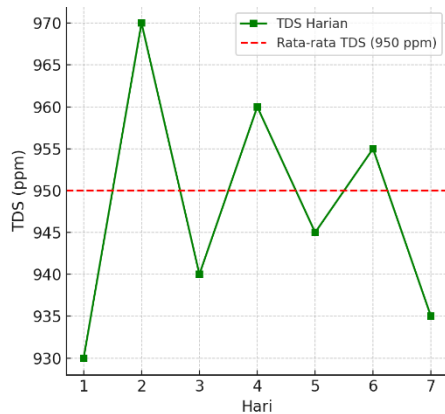


Gambar 5. Grafik Fluktuasi pH Selama 7 Hari

Hasil dari proses kalibrasi menunjukkan bahwa sensor pH menunjukkan deviasi rata-rata $\pm 0,05$ saat dibandingkan dengan pengukuran manual menggunakan pH meter

portabel. Di sisi lain, sensor TDS menunjukkan tingkat kesalahan yang kurang dari 2% bila dibandingkan dengan larutan standar dalam kisaran 800–1200 ppm. Nilai-nilai ini masih dalam batas toleransi yang diterima untuk penelitian agronomi, sehingga sensor ini dapat digunakan untuk memantau larutan nutrisi dalam sistem aeroponik.

Uji fungsional yang dilaksanakan selama seminggu tanpa adanya tanaman menunjukkan stabilitas pada parameter larutan. Perubahan pH harian dicatat berada dalam kisaran $\pm 0,15$, sedangkan deviasi TDS tidak melebihi ± 80 ppm. Keadaan ini menegaskan bahwa penyatuan sensor dengan mikrokontroler ESP32 berhasil mempertahankan konsistensi data secara *real-time*, sehingga dapat dijadikan sebagai dasar untuk percobaan pada tanaman.



Gambar 6. Grafik Fluktuasi TDS Selama 7 Hari

3.2 Efektivitas Sistem Kontrol Nutrisi Real-Time

Penerapan algoritma kontrol berbasis logika *threshold* menunjukkan efektivitas tinggi dalam menjaga stabilitas larutan nutrisi pada sistem aeroponik. Hasil pengujian lima siklus menunjukkan bahwa rata-rata waktu respon sistem berkisar antara 45–60 detik sejak parameter terdeteksi hingga kembali ke kondisi optimal. Nilai ini berada dalam kategori cepat untuk aplikasi *real-time control*, mengingat fluktuasi nutrisi dalam media larutan biasanya dapat memengaruhi kondisi fisiologis tanaman dalam rentang menit.

Gambar 7. Panel Sistem IoT



3.3 Pertumbuhan Vegetatif Bibit Kentang

Pengamatan pertumbuhan vegetatif bibit kentang dilakukan selama satu minggu pertama masa pembibitan dengan sistem aeroponik berbasis kontrol nutrisi *real-time*. Hasil pengukuran ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Pertumbuhan Bibit Kentang Aeroponik pada Minggu Pertama

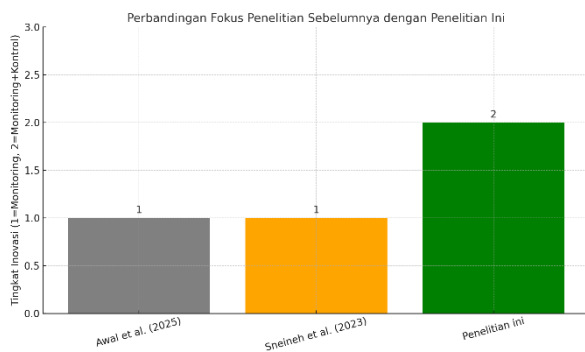
Ha ri ke-	Tinggi Tana man (cm)	Juml ah Daun (hela i)	Panja ng Akar (cm)	pH Rat a- rat a	TD S (pp m)
1	6,2	2	4,5	5,6	850
3	7,1	3	5,6	5,7	880
5	8,8	4	6,8	5,7	900
7	10,4	5	8,2	5,7	920

Observasi menunjukkan bahwa selama periode 7 hari, tinggi tanaman naik dari 6,2 cm (hari pertama) menjadi 10,4 cm (hari ketujuh). Jumlah daun bertambah dari 2 menjadi 5 helai, sementara panjang akar berkembang dari 4,5 cm menjadi 8,2 cm. Stabilitas pH pada larutan nutrisi berada di antara 5,6 hingga 5,7, sedangkan tingkat TDS tetap dalam kisaran 850 hingga 920 ppm. Angka-angka ini masih tergolong optimal menurut referensi agronomi untuk tahap awal pertumbuhan kentang. Kondisi nutrisi yang konsisten membantu meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi, yang terlihat dari percepatan pertumbuhan daun dan penambahan panjang akar.

3.4 Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Temuan dari penelitian ini mendukung hasil yang diperoleh oleh Awal et al., (2025) yang menekankan pentingnya pemantauan pH dan TDS dalam sistem hidroponik, tetapi dengan tambahan inovasi berupa kontrol otomatis secara real-time pada sistem aeroponik. Perbedaan lainnya adalah pemanfaatan aplikasi Tuya Smart sebagai platform untuk monitoring dan pengendalian. Penggunaan aplikasi komersial ini memberikan keuntungan dalam hal penggunaan dan kemampuan untuk dikembangkan, sehingga sistem ini lebih mudah diterima oleh petani dalam praktik.

Jika dibandingkan dengan penelitian (Abu Snehneh & Shabaneh, 2023), yang masih menggunakan Thingspeak sebagai alat pemantauan, penelitian ini menawarkan inovasi dengan mekanisme kontrol otomatis yang lebih fleksibel. Dengan demikian, kontribusi dari penelitian ini terletak pada integrasi monitoring dan kontrol berbasis IoT yang diterapkan khusus pada pembibitan kentang aeroponik, suatu bidang yang masih jarang diteliti.



Gambar 8. Diagram Perbandingan Penelitian sebelumnya dengan penelitian yang dilakukan

3.5 Pengujian Tampilan Aplikasi Tuya

Uji coba antarmuka aplikasi Tuya Smart dilaksanakan untuk menilai efektivitas antarmuka pengguna serta keandalan sistem pemantauan dan pengendalian yang terintegrasi dengan sensor pH dan TDS dalam sistem aeroponik. Aplikasi ini dipilih karena memiliki sifat komersial, mudah digunakan, dan mendukung protokol komunikasi IoT berbasis Wi-Fi melalui mikrokontroler ESP32.



Gambar 9. Tampilan Aplikasi Tuya Smart

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem kontrol nutrisi real-time yang didasarkan pada Internet of Things, dengan mengintegrasikan sensor pH dan TDS pada aplikasi Tuya Smart untuk pembibitan kentang secara aeroponik. Sistem ini telah terbukti memiliki akurasi dan stabilitas tinggi, dengan deviasi pH $\pm 0,05$ dan kesalahan TDS di bawah 2%, serta dapat mempertahankan kestabilan larutan (pH $\pm 0,15$; TDS ± 80 ppm) selama tujuh hari. Algoritma kontrol yang menggunakan logika ambang berhasil mempertahankan pH antara 5,5 hingga 6,5 dan TDS dalam kisaran 800 hingga 1200 ppm, dengan waktu respons antara 45 hingga 60 detik, yang mendukung percepatan pertumbuhan bibit (tinggi 6,2 hingga 10,4 cm, jumlah daun 2 hingga 5, dan panjang akar 4,5 hingga 8,2 cm).

Kelebihan dari penelitian ini dibandingkan dengan studi sebelumnya adalah adanya kontrol otomatis berbasis IoT melalui platform Tuya Smart yang responsif (memperbarui setiap 2 hingga 3 detik, dengan penilaian 4,3 dari 5 oleh pengguna). Temuan ini menunjukkan adanya potensi penerapan sistem yang nyata dalam pertanian cerdas

aeroponik untuk meningkatkan produktivitas, efisiensi, dan keberlanjutan dalam budidaya kentang di Indonesia.

4.2. Saran

Penelitian ini masih terbatas pada tahap pembibitan kentang aeroponik dalam skala laboratorium, sehingga disarankan pengujian lanjutan dilakukan pada skala lebih luas dengan variasi jenis tanaman hortikultura untuk menguji fleksibilitas sistem. Selain itu, integrasi algoritma kontrol yang lebih adaptif, seperti PID atau berbasis kecerdasan buatan, dapat menjadi pengembangan berikutnya untuk meningkatkan akurasi koreksi nutrisi. Uji adopsi lapangan secara langsung bersama petani juga diperlukan guna menilai aspek keberterimaan, biaya operasional, serta dampak ekonomi dari sistem berbasis IoT ini.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abu Sneineh, A., & Shabaneh, A. A. A. (2023). Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things. *MethodsX*, 11(September), 102401. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102401>
- Awal, M. A., Pio, A. S., Mim, M. J., Partha, P. K. P., Kafi, M. A. Al, & Farha, S. (2025). A smart IoT-based hydroponics system for small-scale household in Bangladesh. *Smart Agricultural Technology*, 12(July). <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101163>
- FAO. (2018). *The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050*. <http://www.fao.org/3/I8429EN/i8429en.pdf>
- Fasciolo, B., Awouda, A., Bruno, G., & Lombardi, F. (2023). A smart aeroponic system for sustainable indoor farming. *Procedia CIRP*, 116, 636–641. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.107>
- Fellisita, M., Esandi, P., Radianto, D., & Safitri, H. K. (2024). Sistem Kontrol Nutrisi Otomatis pada Tanaman Aeroponik Menggunakan PID berbasis Iot. *Jurnal Elkolind*, 11(9), 319–327. <http://dx.doi.org/10.33795/elkolind.v11i2.3304>
- M Shetty, H., Pai K, K., Mallya, N., & Pratheeksha. (2021). Fully Automated Hydroponics System for Smart Farming. *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 11(4), 33–41. <https://doi.org/10.5815/ijem.2021.04.04>
- Min, A., Nguyen, N., Howatt, L., Tavares, M., & Seo, J. (2023). Aeroponic systems design: considerations and challenges. *Journal of Agricultural Engineering*, 54(1). <https://doi.org/10.4081/jae.2022.1387>
- Narimani, M., Hajiahmad, A., Moghimi, A., Alimardani, R., Rafiee, S., & Mirzabe, A. H. (2021). Developing an aeroponic smart experimental greenhouse for controlling irrigation and plant disease detection using deep learning and IoT. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2021*, 4, 2699–2710. <https://doi.org/10.13031/aim.202101252>
- Rehman, A. U., Ullah, S., Bazai, S. U., Ullah, F., Ghafoor, M. I., & Kasi, B. (2024). Efficient Smart Aeroponic Cultivation and Monitoring System Through Internet of Things. *2024 International Conference on IT and Industrial Technologies (ICIT)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICIT63607.2024.10859517>
- Rofiansyah, W., Zalianty, F. R., Ito, F. A. La, Wijayanto, I., Ryanu, H. H., & Irawati, I. D. (2025). IoT-based control and monitoring system for hydroponic plant growth using image processing and mobile applications. *PeerJ Computer Science*, 11, 1–35. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2763>