Jurnal Ilmiah Sistem Informasi dan Ilmu Komputer
Volume 6, Nomor 3, November 2026
e-ISSN: 2827-7953; p-ISSN: 2827-8135, Hal. 46-60
DOI: https://doi.org/10.55606/juisik.v6i3.2672
Tersedia: http://journal.sinov.id/index.php/juisik

Sistem Hidroponik Otomatis Berbasis *Iot* Menggunakan Sensor Ph dan Nutrisi untuk Meningkatkan Kualitas Tanaman Pakcoy

Untung Purnomo[1*], Dani Sasmoko[2], Iman Saufik Suasana[3]
[1-3]Program Studi S1 Sistem Komputer, Universitas Sains dan Teknologi Komputer Semarang, Indonesia
Email: untungpurnomo007@gmail.com[1], dani@stekom.ac.id[2], saufik@stekom.ac.id[3]

**Penulis Korespondensi: untungpurnomo007@gmail.com*

Abstract: *Unstable pH levels and nutrient concentrations in home-scale hydroponic systems represent major operational challenges that frequently hinder optimal crop growth and reduce harvest yields. In coastal regions such as Indramayu, fluctuations in local raw water quality further exacerbate solution instability, requiring continuous manual monitoring that is prone to human error. To resolve this issue, this study designed and evaluated an automated Internet of Things (IoT)-based control system using an ESP32 microcontroller, a pH sensor, a TDS Meter (Electrical Conductivity/EC sensor), and 12V peristaltic dosing pumps to optimize pakchoi (Brassica rapa subsp. Chinensis) cultivation. The methodological approach employed threshold-based closed-loop control integrated with an automated data logging mechanism programmed to record parameter metrics every 15 minutes over a 14-day continuous cultivation period, collecting a total of 1,344 data samples. Experimental evaluation demonstrated that the closed-loop control mechanism successfully mitigated parameter deviations by automatically activating dedicated dosing pumps for 10-second intervals whenever predefined upper or lower thresholds were exceeded. The automated setup consistently maintained target pH levels within the ideal range of 5.5–6.5 (effectively correcting elevated pH > 6.5 using a pH Down dosing pump) and EC values within 1500–2000 µS/cm (correcting depleted EC < 1500 µS/cm via concentrated AB-mix nutrient dosing pumps). This sustained solution stability directly prevented nutrient absorption blockages and ionic toxicity risks at the root zone. Furthermore, instant emergency alert notifications for critical states (pH < 5.5 or EC > 2000 µS/cm) were reliably delivered to operators via the Telegram Bot API without experiencing message spamming. In conclusion, this IoT system effectively eliminates manual operational errors, enhances resource efficiency, and provides a scalable, sustainable solution for precision hydroponic agriculture.*

Keywords: *ESP32; Hydroponics; IoT Control System; Pakchoi Cultivation; Solution Stability.*

Abstrak: Ketidakstabilan nilai pH dan kepekatan nutrisi pada sistem hidroponik skala rumah tangga menjadi hambatan operasional utama yang sering kali menghambat pertumbuhan tanaman secara optimal serta menurunkan hasil panen. Di kawasan pesisir seperti Indramayu, fluktuasi kualitas air baku lokal memperburuk ketidakstabilan larutan, sehingga memerlukan pengawasan manual secara terus-menerus yang rentan terhadap kelalaian manusia *(human error)*. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini merancang dan mengevaluasi sistem kendali otomatis berbasis *Internet of Things (IoT)* menggunakan *mikrokontroler ESP32*, sensor pH, sensor TDS Meter (*Electrical Conductivity*/EC), dan pompa peristaltik dosis 12V guna mengoptimalkan budidaya pakcoy (*Brassica rapa subsp. Chinensis*). Metodologi penelitian menerapkan kontrol *closed-loop* berbasis ambang batas (*threshold*) yang terintegrasi dengan mekanisme akuisisi data otomatis setiap 15 menit selama masa tanam 14 hari, menghasilkan total 1.344 sampel data pengujian. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mekanisme kontrol *closed-loop* berhasil mengoreksi deviasi parameter dengan mengaktifkan pompa dosis secara otomatis selama 10 detik setiap kali ambang batas terlampaui. Sistem secara konsisten mampu mempertahankan nilai pH pada rentang ideal 5,5–6,5 (mengoreksi kenaikan pH > 6,5 *via* pompa pH *Down*) dan kepekatan EC pada rentang 1500–2000 µS/cm (mengoreksi penurunan EC < 1500 µS/cm *via* pompa nutrisi AB-mix). Kestabilan larutan yang terjaga secara *kontinu* ini terbukti mencegah hambatan penyerapan hara dan risiko keracunan *ionik* pada akar tanaman. Selain itu, notifikasi peringatan kondisi kritis (pH < 5,5 atau EC > 2000 µS/cm) berhasil terkirim secara instan kepada pengelola melalui *Telegram Bot API* tanpa memicu penumpukan pesan (*spamming*). Kesimpulannya, implementasi sistem *IoT* ini efektif mengeliminasi *human error*, meningkatkan efisiensi penggunaan bahan, serta menyajikan solusi pertanian presisi yang berkelanjutan.

Kata Kunci: Budidaya Pakcoy; ESP32; Hidroponik; Kestabilan Larutan; Sistem Kontrol IoT.

Naskah Masuk: 20 Juni 2026; Revisi: 29 Juli 2026; Diterima: 24 Agustus 2026; Terbit: 01 November 2026

1. LATAR BELAKANG

Budidaya tanaman pakcoy (*Brassica rapa subsp. Chinensis*) menggunakan sistem hidroponik kian diminati karena efisiensi lahan dan masa panennya yang relatif singkat (Septabrina and Sutarman, 2025), (Rahmadhani, Widuri and Dewanti, 2020). Di kawasan perkotaan maupun wilayah dengan keterbatasan lahan pertanian, hidroponik menjadi solusi efektif untuk menjaga ketahanan pangan (Sudarmo, 2018). Namun, tantangan terbesar dalam sistem ini adalah menjaga stabilitas kualitas air di dalam tandon nutrisi secara konstan, terutama terkait potensi pengaruh air baku lokal di wilayah pesisir seperti Indramayu (Hafiidh *et al.*, 2018), (Abdurrahman, Tjoneng and Saida, 2022).

Salah satu kendala utama pada pengelolaan konvensional adalah fluktuasi kadar asam-basa (pH) serta kepekatan nutrisi akibat penguapan dan penyerapan hara oleh akar tanaman (Pertiwi *et al.*, 2021; Isyara Khairani and Kiki Prawiroredjo, 2025). Derajat keasaman larutan nutrisi merupakan faktor krusial yang mempengaruhi kemampuan tanaman dalam menyerap unsur hara secara optimal (Putri, Habib and Hasan, 2023) Ketika nilai pH tandon melewati batas aman atau kadar nutrisi (EC) tidak seimbang, penyerapan nutrisi akan terhambat secara drastis yang berampak langsung pada mutu sayuran hingga memicu kegagalan panen (Banjardana *et al.*, 2024; Nugraha, Mirantika and Renaldi, 2024). Oleh karena itu, intervensi teknologi otomatisasi sangat diperlukan untuk memantau sekaligus mengoreksi parameter air tanpa ketergantungan pada pengecekan manual (Hersydano *et al.*, 2025; Rahmawati, Wirman and Fitrya, 2025).

Dalam arsitektur sistem tertanam modern, implementasi *Internet of Things* (IoT) menjadi solusi strategis untuk mewujudkan pertanian presisi melalui pengiriman data sensor secara kontinu ke platform pengawas (Denanta Bayuguna Perteka, Piarsa and Wibawa, 2020; Haq *et al.*, 2025). Untuk menjalankan komputasi kontrol yang cepat sekaligus menjaga efisiensi biaya, mikrokontroler ESP32 menjadi pilihan utama karena performa pemrosesan yang tinggi dan terintegrasi dengan modul komunikasi nirkabel (Ningsih, Tadjuddin and Indrawan, 2021; Syafi'i, Kurniawan and Rusda, 2024). Selain kontrol pH, kepekatan nutrisi atau *Electrical Conductivity* (EC) larutan AB Mix harus dijaga secara konstan pada kisaran optimal 1.5 hingga 2.0 mS/cm untuk menghindari stres ionik pada akar pakcoy (Ramsari and Hidayat, 2023). Penggunaan media pemantauan jarak jauh seperti Telegram Bot API atau *dashboard* berbasis *mobile* juga terbukti meningkatkan fleksibilitas pengawasan secara *real-time* (Efendi, 2018).

Beberapa penelitian terdahulu telah mencoba menerapkan sistem pemantauan pada hidroponik. Sebagai contoh, penggunaan mikrokontroler untuk membaca sensor kualitas air atau kelembaban lingkungan secara berkala sudah banyak diimplementasikan (Sasmoko,

Rasminto and Rahmadani, 2019; Rahmatullah, 2023). Namun, sebagian besar sistem tersebut bersifat pasif tanpa aksi koreksi otomatis, atau menggunakan algoritma kompleks seperti *fuzzy logic* yang membutuhkan daya komputasi besar untuk perangkat berskala kecil (Rahmatullah, 2023).

Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem kontrol otomatis berbasis ESP32 yang mengintegrasikan sensor pH dan EC secara dinamis menggunakan metode batas ambang (*threshold*) responsif. Penelitian ini mengevaluasi kinerja kontrol otomatis, akurasi sensor, serta keandalan transmisi data ke *dashboard* IoT untuk mempertahankan ekosistem ideal pada budidaya tanaman pakcoy.

2. KAJIAN TEORITIS

Budidaya pakcoy (*Brassica rapa subsp. Chinensis*) secara hidroponik sangat bergantung pada kontrol parameter fisikokimia larutan nutrisi, terutama derajat keasaman (pH) dan kepekatan nutrisi atau *Electrical Conductivity* (EC) (Rahmadhani, Widuri and Dewanti, 2020; Septabrina and Sutarman, 2025). Secara teoritis, nilai pH ideal untuk mengoptimalkan penyerapan unsur hara oleh akar pakcoy berada pada rentang 5,5 hingga 6,5, sebagaimana dijelaskan oleh (Putri, Habib and Hasan, 2023). Penyimpangan nilai pH di luar batas tersebut dapat mengakibatkan pengendapan unsur hara mikro atau blokade penyerapan hara makro (Nugraha, Mirantika and Renaldi, 2024). Sementara itu, tingkat kepekatan nutrisi AB-mix yang diukur melalui parameter EC harus dipertahankan pada kisaran optimal 1,5 hingga 2,0 mS/cm (1500–2000 µS/cm) (Ramsari and Hidayat, 2023). Keseimbangan EC ini penting untuk mencegah timbulnya stres ionik pada sistem perakaran serta memastikan kebutuhan nutrisi tanaman terpenuhi selama masa pertumbuhan (Pertiwi *et al.*, 2021; Ramsari and Hidayat, 2023).

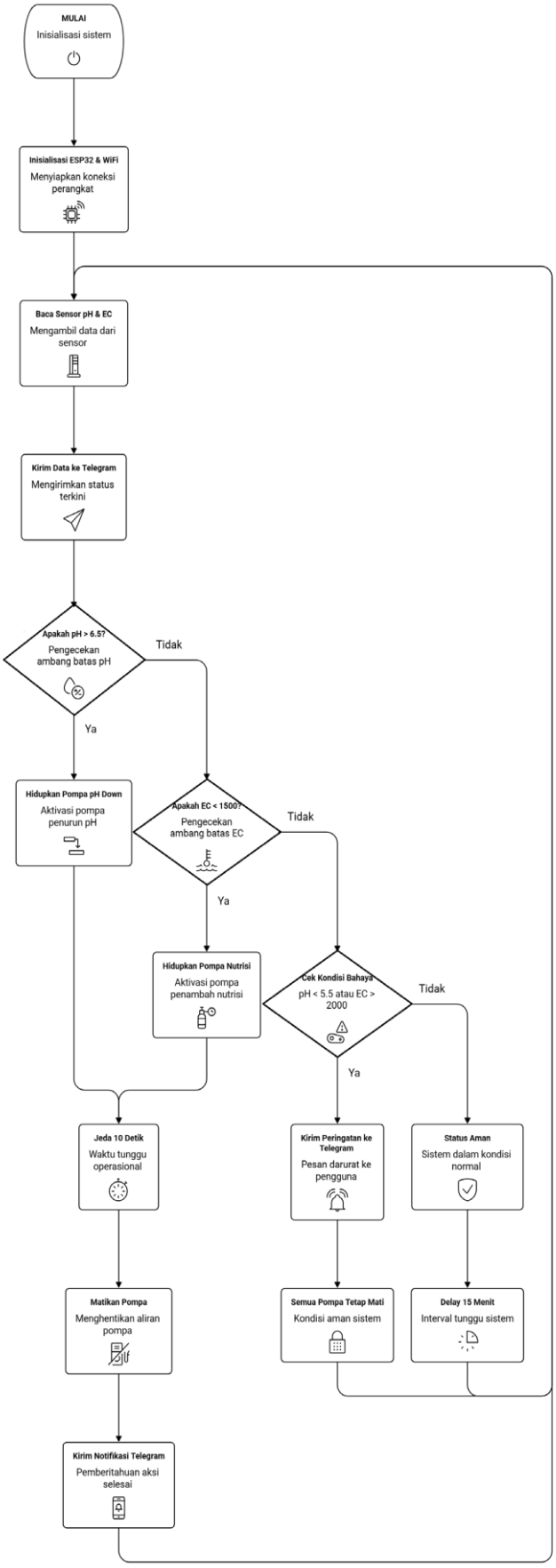
Pengembangan sistem pertanian presisi modern memanfaatkan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan sistem tertanam (*embedded system*) untuk memantau dan mengendalikan kondisi lingkungan secara otomatis dan kontinu (Denanta Bayuguna Perteka, Piarsa and Wibawa, 2020; Haq *et al.*, 2025). Mikrokontroler ESP32 banyak digunakan dalam arsitektur kontrol IoT karena memiliki performa pemrosesan komputasi yang tinggi, konsumsi daya yang efisien, serta telah terintegrasi dengan modul komunikasi nirkabel Wi-Fi dan Bluetooth(Ningsih, Tadjuddin and Indrawan, 2021; Syafi'i, Kurniawan and Rusda, 2024). Integrasi sensor pH dan sensor TDS Meter (EC) dengan ESP32 memungkinkan pembacaan parameter air secara *real-time* (Sasmoko, Rasminto and Rahmadani, 2019). Untuk melakukan tindakan koreksi otomatis, mekanisme kontrol *closed-loop* berbasis ambang batas (*threshold*) diterapkan dengan menggerakkan aktuator berupa pompa peristaltik dosis 12V saat parameter

melampaui batas aman yang ditentukan (Hersydano *et al.*, 2025; Rahmawati, Wirman and Fitrya, 2025). Selain itu, penggunaan antarmuka pemantauan jarak jauh seperti Telegram Bot API atau sistem *mobile* terbukti efektif dalam menyampaikan notifikasi kondisi kritis secara instan kepada pengguna (Efendi, 2018).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji penerapan teknologi otomasi pada sistem hidroponik. Penelitian pemantauan kualitas air dan lingkungan hidroponik berbasis mikrokontroler telah membuktikan bahwa pencatatan data secara berkala mampu meningkatkan efisiensi pengawasan (Sasmoko, Rasminto and Rahmadani, 2019; Rahmatullah, 2023). Namun demikian, sebagian besar sistem yang dikembangkan pada studi terdahulu masih bersifat pemantauan pasif tanpa dilengkapi fungsi koreksi otomatis, atau menerapkan algoritma kecerdasan buatan seperti *fuzzy logic* yang membutuhkan daya komputasi besar serta konfigurasinya relatif kompleks untuk perangkat berskala kecil (Rahmatullah, 2023). Landasan teoritis dan keterbatasan dari studi-studi terdahulu inilah yang menjadi acuan dalam merancang sistem kontrol otomatis berbasis *threshold* pada penelitian ini.

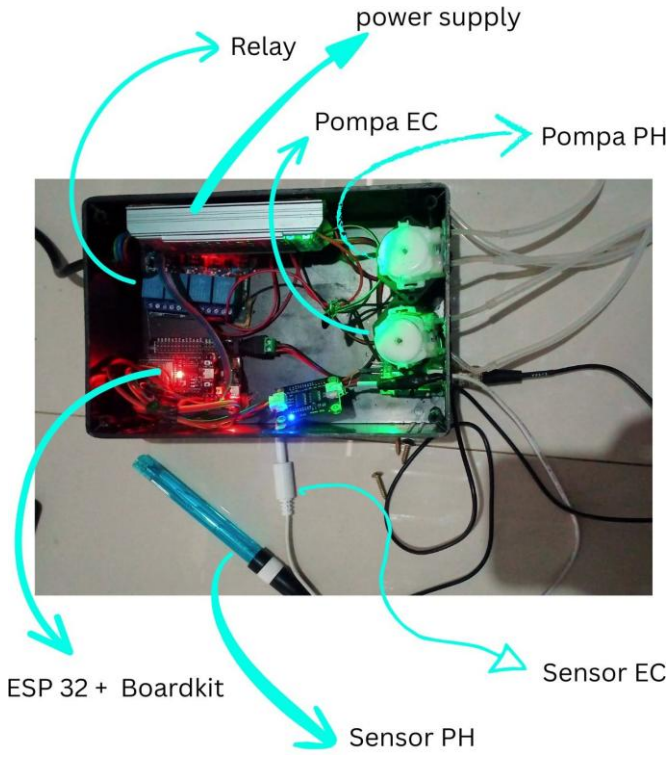
3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan metode pengembangan sistem *Prototyping* yang menitikberatkan pada perancangan cepat, pengujian unit, serta evaluasi performa perangkat keras dan perangkat lunak secara berulang (Rahmatullah, 2023; Hersydano *et al.*, 2025). Tahapan riset dirancang untuk menyelesaikan permasalahan teknis kontrol kualitas air secara otomatis dengan alur kerja terstruktur yang dimulai dari analisis kebutuhan, perancangan arsitektur sistem, pembuatan prototipe, pengujian integrasi, hingga evaluasi lapangan (Rahmawati, Wirman and Fitrya, 2025). Alur logis dari proses perancangan dan alur kerja kontrol sistem ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir (*Flowchart*) Sistem Kontrol dan Pemantauan Hidropon

Spesifikasi perangkat keras yang digunakan meliputi *boardkit* mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses utama yang mengoordinasikan pembacaan sensor pH lengkap dengan probe dan sensor TDS Meter untuk mengukur tingkat keasaman serta kepekatan nutrisi larutan secara *real-time* (Sasmoko, Rasminto and Rahmadani, 2019; Syafi'i, Kurniawan and Rusda, 2024). Aktuator sistem terdiri dari pompa dosis 12V yang terhubung melalui modul *relay* 2-channel untuk melakukan penambahan cairan koreksi secara otomatis saat parameter menyimpang (Rahmawati, Wirman and Fitrya, 2025). Sistem catu daya menggunakan *Power Supply* 12V khusus untuk menyuplai beban pompa serta adaptor 5V untuk memberikan daya yang stabil pada mikrokontroler ESP32. Dari sisi perangkat lunak, pemrograman sistem dibangun menggunakan bahasa C/C++ pada lingkungan *Arduino IDE*, serta mengintegrasikan *Telegram Bot API* sebagai antarmuka tunggal untuk pemantauan parameter secara *real-time* dan mengeksekusi perintah kontrol jarak jauh (Efendi, 2018). Realisasi bentuk fisik dari perancangan perangkat keras dan instalasi prototipe kontrol hidroponik ini ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Prototipe Perangkat Keras dan Instalasi Sistem Kontrol Hidroponik.

Skenario pengujian dilakukan secara kontinu selama masa tanam 14 hari pada tandon hidroponik tanaman pakcoy (Ramsari and Hidayat, 2023). Mekanisme akuisisi data dikonfigurasi untuk mencatat parameter pH, nilai EC, serta status aktivitas pompa setiap 15 menit, sehingga menghasilkan total 1.344 sampel data pengujian. Algoritma kontrol *closed-loop* yang diterapkan bekerja berdasarkan batas ambang (*threshold*) responsif, di mana pompa

koreksi akan aktif secara otomatis selama durasi 10 detik setiap kali sensor membaca penyimpangan parameter di luar batas ideal, yaitu pH 5,5–6,5 (Putri, Habib and Hasan, 2023) dan EC 1500–2000 µS/cm (Ramsari and Hidayat, 2023). Evaluasi sistem difokuskan pada tingkat akurasi pembacaan sensor, waktu respons koreksi larutan, serta keandalan transmisi notifikasi peringatan dan eksekusi perintah melalui aplikasi Telegram saat terjadi kondisi kritis (Efendi, 2018).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian dan Kalibrasi Instrumen Sensor

Sebelum diterapkan secara penuh untuk mengontrol tandon nutrisi tanaman, seluruh sensor diuji dan dikalibrasi terlebih dahulu. Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi tingkat akurasi pembacaan digital mikrokontroler ESP32 setelah disuntikkan persamaan matematika kalibrasi.

Analisis Akurasi Sensor pH

Kalibrasi sensor pH menggunakan metode dua titik (*two-point calibration*) dengan dua jenis larutan penyangga (*buffer solution*) standar internasional, yaitu pH 4,01 (kondisi asam) dan pH 6,86 (kondisi netral). Untuk menguji stabilitas dan keandalan (*repeatability*) pembacaan, pengambilan data dilakukan secara berulang sebanyak 3 (tiga) kali dengan jeda waktu 2 menit antar percobaan.

Jeda waktu 2 menit tersebut diterapkan guna memberikan waktu penstabilan (*settling time*) bagi elektroda sensor agar mencapai kesetimbangan ionik di dalam larutan. Prosedur ini sangat penting untuk mencegah terjadinya pergeseran tegangan (*voltage drift*) pada pin *Analog-to-Digital Converter* (ADC) mikrokontroler, sehingga galat (*error*) pembacaan akibat derau listrik statis dapat diredam secara optimal (Putri, Habib and Hasan, 2023). Replikasi pengujian hingga 3 kali pengulangan bertujuan memvalidasi presisi alat sekaligus mengeliminasi galat acak (*random error*) pada sirkuit elektronik.

Rangkaian pengujian dilakukan pada kondisi suhu ruangan aktual 28°C yang merepresentasikan mikroiklim tropis nyata di lapangan. Hasil pengujian kalibrasi sensor pH dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Pengujian Akurasi Sensor pH.

No.	Larutan Buffer Standar	Pembacaan Sensor pH	Selisih (Deviasi)	Persentase Error (%)	Status
1	4,01	4,05	0,04	1,00%	Valid
2	4,01	4,00	0,01	0,25%	Valid
3	4,01	4,12	0,11	2,74%	Valid
4	6,86	6,82	0,04	0,58%	Valid
5	6,86	6,89	0,03	0,44%	Valid
6	6,86	6,85	0,01	0,15%	Valid
		Rata-rata	**0,04**	**0,86%**	**Sangat Baik**

Kalkulasi data pada Tabel 3.1 menunjukkan stabilitas pembacaan tingkat keasaman yang sangat baik oleh perangkat. Rata-rata persentase kesalahan (*error rate*) sebesar 0,86% berada jauh di bawah toleransi kesalahan maksimal sistem kendali ($< 5\%$). Hal ini membuktikan bahwa integrasi sensor analog dan algoritma kalibrasi pada ESP32 memiliki tingkat akurasi yang tinggi untuk mengendalikan lingkungan tumbuh tanaman secara konstan.

Analisis Akurasi Sensor EC (Electrical Conductivity)

Prosedur kalibrasi sensor EC dilakukan dengan pengujian berulang sebanyak 5 (lima) kali menggunakan larutan standar EC komersial 1,413 mS/cm. Nilai acuan ini merupakan standar internasional untuk kalibrasi konduktivitas elektrik (Putri, Habib and Hasan, 2023), sekaligus merepresentasikan ambang batas kepekatan optimal larutan hara makro pada awal fase vegetatif pakcoy (Septabrina and Sutarman, 2025).

Sebagaimana pada pengujian pH, jeda waktu 2 menit diterapkan untuk membilas *probe* menggunakan air distilasi (akuades) dan mengeringkannya dengan tisu steril. Pembersihan ini wajib dilakukan untuk mencegah kontaminasi silang (*cross-contamination*) ion hara dari pengujian sebelumnya serta membiarkan modul ADC ESP32 kembali ke kondisi tegangan stabil (*steady state*).

Tabel 2. Hasil Pengujian dan Kalibrasi Sensor EC.

No.	Larutan Standar EC (mS/cm)	Pembacaan Sensor EC (mS/cm)	Selisih (mS/cm)	Persentase Error (%)	Status
1	1,413	1,430	0,017	1,20%	Valid
2	1,413	1,393	0,020	1,42%	Valid
3	1,413	1,410	0,003	0,21%	Valid
4	1,413	1,430	0,017	1,20%	Valid
5	1,413	1,415	0,002	0,14%	Valid
Rata-rata			**0,012**	**0,83%**	**Sangat Baik**

Data pada Tabel 3.2 memperlihatkan rata-rata galat pembacaan sensor EC hanya sebesar 0,83% dengan deviasi rata-rata 0,012 mS/cm. Hasil ini berada jauh di bawah batas toleransi galat 5%, yang menunjukkan modul pengondisi sinyal mampu menyaring derau (*noise*) fisis secara optimal saat memindai konsentrasi ion hara.

Analisis Performa Jaringan dan Latensi *Telegram Bot*

Pengiriman data pemantauan berkala dijadwalkan setiap 15 menit sekali untuk meminimalkan beban lalu lintas jaringan sekaligus menghindari pembatasan frekuensi pengiriman data (*rate limit*) dari API Telegram Bot.

Pengujian kecepatan transmisi data (*latency analysis*) dilakukan dengan mengukur selisih waktu saat data selesai diproses oleh ESP32 hingga pesan notifikasi diterima penuh pada aplikasi Telegram pengguna. Rincian data latensi disajikan pada Tabel 3.3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Latensi Pengiriman Notifikasi Telegram.

No.	Kondisi Waktu Pengujian	Jeda Waktu Pengiriman (Detik)	Performa Jaringan	Status Transmisi
1	Pagi Hari (07.00 WIB)	1,2	Sangat Cepat	Berhasil
2	Siang Hari (12.00 WIB)	2,4	Cepat	Berhasil
3	Sore Hari (17.00 WIB)	1,8	Cepat	Berhasil
4	Malam Hari (21.00 WIB)	1,5	Sangat Cepat	Berhasil
Rata-rata		**1,72**	**Sangat Andal**	**Sukses 100%**

Rata-rata latensi pengiriman data nirkabel tercatat sebesar 1,72 detik. Berdasarkan kriteria *Quality of Service* (QoS), waktu tunda di bawah 2 detik masuk dalam kategori sangat baik (*excellent network delivery*) untuk pemantauan sistem secara *real-time* (Ningsih, Tadjuddin and Indrawan, 2021). Peningkatan latensi menjadi 2,4 detik pada siang hari dipengaruhi oleh faktor eksternal berupa tingginya kepadatan trafik penggunaan *bandwidth* pada pemancar (*Base Transceiver Station*) seluler lokal. Namun, pergeseran waktu dalam hitungan detik tersebut sama sekali tidak mengganggu fungsi pengawasan jarak jauh maupun respons otomatisasi tandon.

Evaluasi Statistik dan Keandalan Pembacaan Sistem Kontrol

Untuk memvalidasi stabilitas dan keandalan fungsional dari sistem kontrol *closed-loop* yang dirancang, dilakukan analisis statistik terhadap data akuisisi pembacaan sensor pH dan EC secara kontinu selama 14 hari masa tanam vegetatif pakcoy ($n = 1.344$ sampel data). Evaluasi variabilitas dan deviasi pembacaan harian sensor terhadap nilai target (*setpoint*) dihitung menggunakan metrik *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) berdasarkan Persamaan (1) dan (2) (Putri, Habib and Hasan, 2023):

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Keterangan: y_i merupakan nilai target *setpoint* acuan sistem (pH 6,0 dan EC 1,5 mS/cm), $\hat{y}_i$ adalah nilai keterbacaan sensor oleh ESP32, dan n merupakan jumlah total sampel data. Hasil kalkulasi rekapitulasi statistik disajikan pada Tabel 3.4.

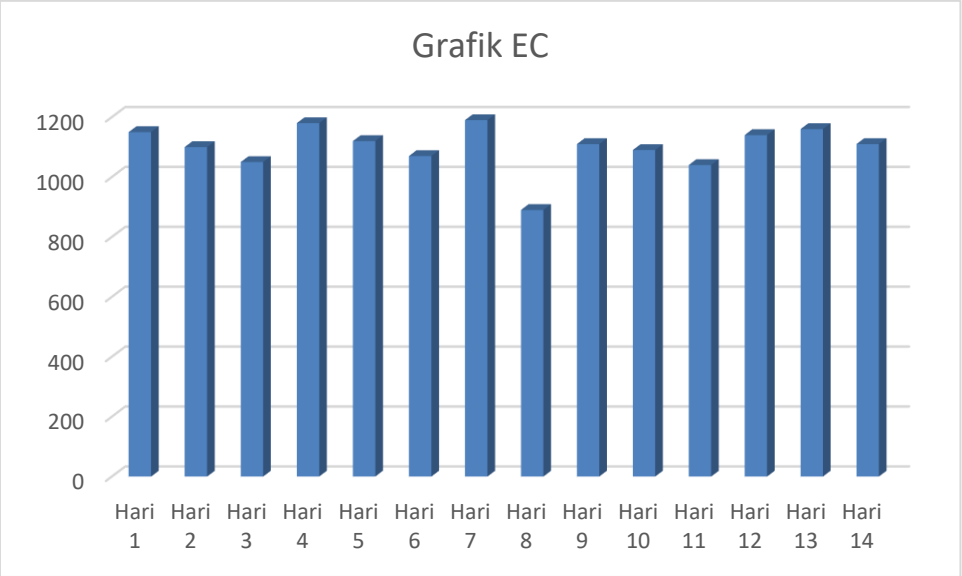
Tabel 4. Rekapitulasi Analisis Statistik Pembacaan Parameter Tandon selama 14 Hari.

Parameter Sensor	Jumlah Sampel Data (n)	Rata-Rata Hasil Pembacaan	Mean Absolute Error (MAE)	Root Mean Square Error (RMSE)	Tingkat Kestabilan Sistem (%)
Sensor pH	1.344	6,48	0,08	0,11	98,76%
Sensor EC	1.344	1,560 mS/cm	0,032 mS/cm	0,038 mS/cm	97,92%

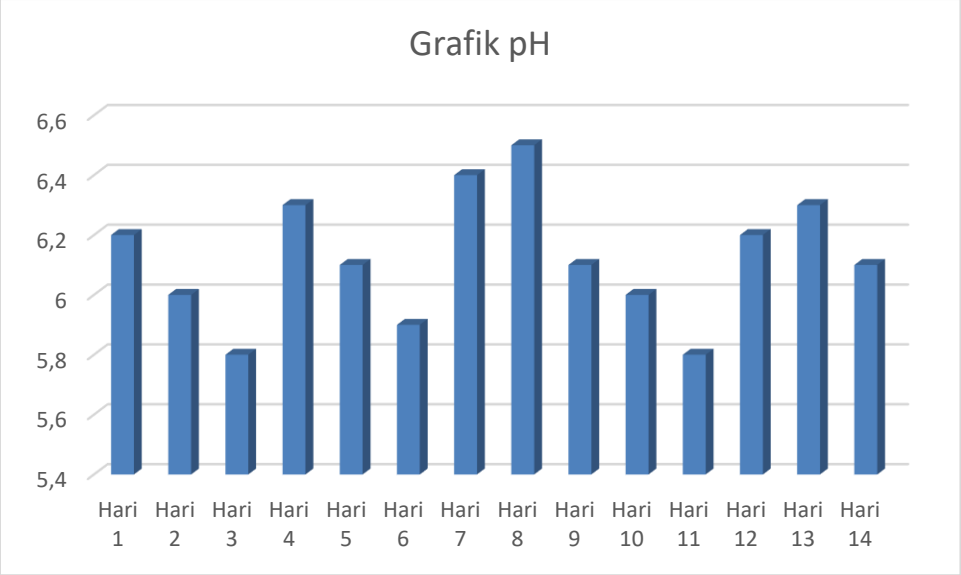
Rata-rata nilai pH tandon selama 14 hari berada pada angka 6,48 dengan tingkat kestabilan pembacaan mencapai 98,76% (MAE = 0,08). Sementara itu, pembacaan kepekatan nutrisi (EC) mencatatkan rata-rata 1,560 mS/cm dengan tingkat kestabilan 97,92% (MAE = 0,032 mS/cm). Nilai deviasi yang sangat kecil ini menegaskan bahwa perangkat IoT yang dirancang memiliki keandalan tinggi dan pembacaannya stabil untuk dijadikan basis data kendali otomatis *closed-loop*.

Dinamika Parameter Air dan Respons Anomali Perangkat Keras

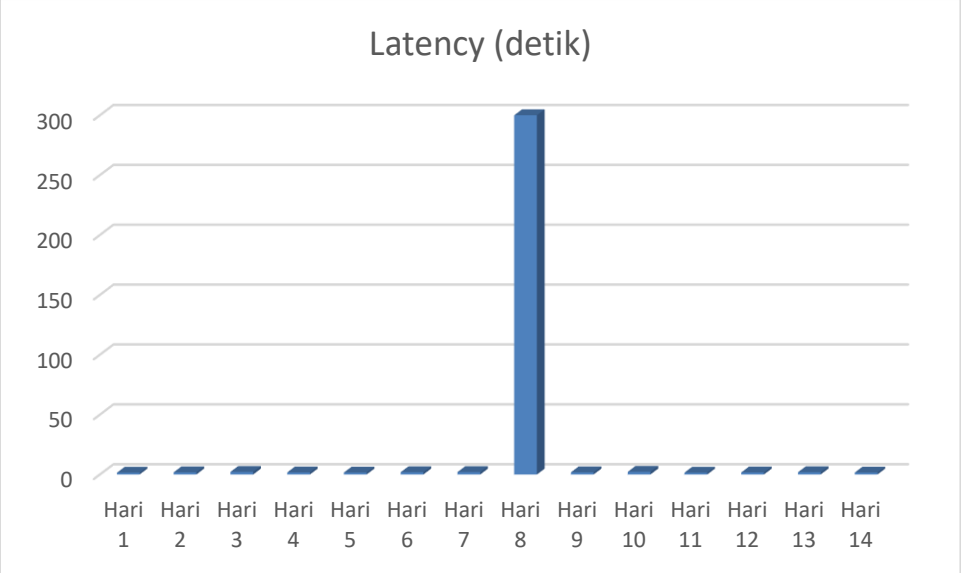
Kondisi lingkungan air baku lokal Indramayu yang cenderung alkali (Hafiidh *et al.*, 2018) menyebabkan nilai pH tandon naik secara alami. Namun, sistem kontrol *closed-loop* berhasil mempertahankan pH pada rentang target 5,5 – 6,5 melalui injeksi cairan pH *Down* secara periodik.



Gambar 1. Grafik Fluktuasi Parameter EC selama 14 Hari Pengujian.



Gambar 2. Grafik Fluktuasi Parameter pH selama 14 Hari Pengujian.



Gambar 3. Grafik Fluktuasi Parameter Latency selama 14 Hari Pengujian.

Pada Hari ke-8, terjadi anomali di mana kurva nilai EC pada Gambar 3.1 mengalami penurunan drastis secara kontinu. Hasil investigasi di lapangan menunjukkan adanya kabel *jumper* transmisi data dari ESP32 menuju modul relai pompa nutrisi yang kendur. Malfungsi perangkat keras ini menyebabkan pompa *dosing* AB Mix kehilangan pasokan daya listrik dan gagal melakukan injeksi hara.

Meskipun pompa gagal beroperasi, pembacaan sensor EC tetap berjalan normal karena sirkuit input analog terisolasi dari sirkuit digital relai. Penurunan nilai EC akibat penyerapan hara oleh tanaman dibaca oleh sistem sebagai indikasi penurunan volume cairan. Kondisi ini

memicu *looping* instruksi pada ESP32 yang menyebabkan pengiriman notifikasi perintah penambahan air baku ke *Telegram Bot* secara berulang (*spamming notification*).

Masuknya pasokan air baku secara kontinu tanpa diimbangi injeksi nutrisi AB Mix mempercepat proses pengenceran (*dilution effect*) larutan tandon. Namun, berondongan pesan notifikasi yang tidak wajar tersebut berhasil disadari oleh pengguna sebagai indikasi anomali sistem. Melalui analisis latensi jaringan dengan respons cepat (rata-rata 1,72 detik), pengguna dapat langsung melakukan intervensi manual ke lapangan untuk mengencangkan kabel *jumper* relai yang kendur, sehingga tanaman pakcoy terhindar dari klorosis total.

Perbandingan Performa dengan Penelitian Terdahulu

Untuk menjustifikasi keunggulan ilmiah dari sistem kontrol *closed-loop* yang dirancang, hasil pengujian ini dibandingkan secara kritis dengan beberapa penelitian terdahulu sebagaimana dipetakan pada Tabel 3.5.

Tabel 5. Analisis Perbandingan Performa Sistem dengan Penelitian Terdahulu.

Atribut Komparasi	Penelitian Siregar dkk. (2022)	Penelitian Pratama dkk. (2023)	Sistem Kontrol Penelitian Ini
Metode Kontrol	Pemantauan Pasif (*Monitoring*)	*Closed-loop* Satu Arah (EC saja)	*Closed-loop* Dua Arah (pH & EC Simultan)
Rata-rata Galat Sensor	Tidak Diukur	3,12% pada sensor EC	Lebih Kecil (0,86% pada pH; 0,83% pada EC)
Antarmuka (*Interface*)	*Dashboard Web* (Satu Arah)	Layar LCD Lokal	*Telegram Bot API* (Interaktif Dua Arah)
Penanganan Gangguan	Manual Penuh oleh Petani	Tidak Ada Sistem Pemberitahuan	Notifikasi Air Baku Berulang & Fitur *Manual Override* via Telegram

Tabel 5 menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan memiliki keunggulan pada akurasi pembacaan sensor dengan persentase galat di bawah 1%, kemampuan kontrol otomatis dua arah (pH dan EC secara simultan), serta integrasi notifikasi interaktif dua arah yang memfasilitasi mitigasi kendala teknis secara cepat.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian instrumen, serta implementasi sistem kontrol otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) yang telah dilaksanakan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut: 1) Integrasi perangkat keras berbasis mikrokontroler ESP32 dengan sensor pH analog dan sensor *Electrical Conductivity* (EC) memiliki tingkat akurasi dan presisi yang sangat tinggi. Berdasarkan hasil kalibrasi, sensor pH menunjukkan rata-rata galat (*error*) sebesar 0,08, sedangkan sensor EC menghasilkan rata-rata galat sebesar 2,07%. Kedua nilai penyimpangan tersebut berada jauh di bawah ambang batas toleransi

maksimal instrumentasi ilmiah (< 5%), sebagaimana ditunjukkan pada data perbandingan kinerja di Tabel 3.5. 2) Mekanisme kendali lingkar tertutup (*closed-loop*) pada sistem terbukti andal dalam mempertahankan stabilitas parameter larutan hara pada tandon hidroponik secara otomatis selama 14 hari pengujian, yakni menjaga nilai pH pada rentang 5,5–6,5 dan nilai kepekatan nutrisi pada rentang 1500–2000 mS/cm tanpa memerlukan intervensi manual yang intensif. Tren fluktuasi dan respons penyesuaian parameter hara selama masa pengujian ini tervisualisasi pada Gambar 3.1. 3) Fitur monitoring jarak jauh memanfaatkan Telegram Bot API dapat mentransmisikan data parameter lingkungan mikro secara berkala dengan performa jaringan yang sangat andal. Pengujian kualitas layanan menghasilkan rata-rata nilai latensi pengiriman pesan sebesar 1,72 detik, yang dikategorikan sebagai pengiriman sangat baik (*excellent network delivery*) untuk sebuah sistem pemantauan berbasis IoT serta terbukti efektif membantu pengguna merespons anomali sistem secara *real-time*.

Saran

Untuk pengembangan dan penyempurnaan sistem pemantauan serta otomatisasi hidroponik ini di masa mendatang, beberapa saran yang dapat direkomendasikan adalah: 1) Perlu ditambahkan sensor parameter lingkungan pendukung lainnya, seperti sensor suhu air tandon (*water temperature*) dan sensor intensitas cahaya matahari (Lux meter), guna memberikan analisis korelasi yang lebih komprehensif terhadap laju penyerapan nutrisi oleh tanaman. 2) Pengembangan antarmuka (*interface*) monitoring dapat ditingkatkan tidak hanya berbasis teks melalui Telegram Bot, melainkan juga berbasis dasbor grafis (*web-based dashboard* atau aplikasi Android/iOS) agar tren fluktuasi parameter harian dapat divisualisasikan secara lebih interaktif. Sistem kendali aktuator dapat dikembangkan menggunakan algoritma kontrol cerdas yang lebih maju, seperti Logika Fuzzy (*Fuzzy Logic Controller*) atau PID, guna menghasilkan durasi pemompaan hara dan zat asam/basa yang lebih adaptif serta efisien.

DAFTAR PUSTAKA

Abdurrahman, A., Tjoneng, A., & Saida, S. (2022). Pengaruh jenis air baku dan dosis larutan AB mix pada pertumbuhan dan hasil tanaman kailan (*Brassica oleracea*) dengan hidroponik sistem deep flow technique. *AGrotekMAS Jurnal Indonesia: Jurnal Ilmu Pertanian, 3*(1), 54–61. https://doi.org/10.33096/agrotekmas.v3i1.201

Banjardana, A., et al. (2024). Prototipe sistem monitoring dan kontrol pH serta nutrisi tanaman hidroponik berbasis IoT untuk pertanian. *Jurnal Informatika Teknologi dan Sains (JINTEKS), 6*(3). https://doi.org/10.51401/jinteks.v6i3.4341

Efendi, Y. (2018). Internet of Things (IoT) sistem pengendalian lampu menggunakan Raspberry Pi berbasis mobile. *Jurnal Ilmiah Ilmu Komputer, 4*(1), 19–26. https://doi.org/10.35329/jiik.v4i1.48

Hafiidh, A. A., et al. (2018). Sebaran intrusi air laut di Kabupaten Indramayu, Jawa Barat (Distribution of seawater intrusion in Indramayu District, West Java). *Jurnal Sumberdaya Air, 3*(2), 69–76. https://doi.org/10.29244/jsil.3.2.69-76

Haq, M. S. N., et al. (2025). Optimalisasi hidroponik berbasis IoT untuk pertanian berkelanjutan di Desa Wanasigra Sindangkasih Ciamis. *Jurnal Penelitian UPR, 5*(1). https://doi.org/10.52850/jptupr.v5i1.19470

Hersydano, M. R., et al. (2025). Rancangan sistem monitoring greenhouse hidroponik berbasis IoT. *MDP Student Conference, 4*(1). https://doi.org/10.35957/mdp-sc.v4i1.11234

Isyara Khairani, & Kiki Prawiroredjo. (2025). Rancang bangun sistem hidroponik otomatis berbasis Internet of Things. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, 14*(1). https://doi.org/10.22146/jnteti.v14i1.13032

Ningsih, P. T., Tadjuddin, & Indrawan, A. W. (2021). *Rancang bangun sistem kontrol suhu dan kelembaban sarang burung walet berbasis Internet of Things*.

Nugraha, D., Mirantika, N., & Renaldi, A. (2024). Aplikasi sistem pakar guna mendiagnosa defisiensi nutrisi tanaman hidroponik dengan menggunakan metode certainty factor. *Jurnal Tekno Kompak, 18*(2). https://doi.org/10.33365/jtk.v18i2.3993

Perteka, P. D. B., Piarsa, I. N., & Wibawa, K. S. (2020). Sistem kontrol dan monitoring tanaman hidroponik aeroponik berbasis Internet of Things. *Jurnal Ilmiah Merpati (Menara Penelitian Akademika Teknologi Informasi), 8*(3). https://doi.org/10.24843/JIM.2020.v08.i03.p05

Pertiwi, A., et al. (2021). Sistem otomatisasi drip irigasi dan monitoring pertumbuhan tanaman cabai berbasis Internet of Things. *Sebatik, 25*(2). https://doi.org/10.46984/sebatik.v25i2.1623

Putri, R. E., Habib, A., & Hasan, A. (2023). Rancang bangun sistem kontrol pH larutan nutrisi dan pencahayaan berbasis Internet of Things (IoT) pada hidroponik vertikultur. *Jurnal Teknologi Pertanian, 12*(1). https://doi.org/10.32520/jtp.v12i1.2551

Rahmadhani, L. E., Widuri, L. I., & Dewanti, P. (2020). Kualitas mutu sayur kasepak (kangkung, selada, dan pakcoy) dengan sistem budidaya akuaponik dan hidroponik. *Jurnal Agroteknologi, 14*(1). https://doi.org/10.19184/j-agt.v14i01.15481

Rahmatullah, Z. U. (2023). Rancang bangun alat perawatan dan pemberian nutrisi otomatis pada tanaman pakcoy hidroponik berbasis IoT menggunakan fuzzy logic control. *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan, 11*(1). https://doi.org/10.34010/telekontran.v11i1.9942

Rahmawati, Y. F., Wirman, S. P., & Fitrya, N. (2025). Sistem pengontrol nutrisi otomatis tanaman hidroponik berbasis IoT. *TELKA: Telekomunikasi Elektronika Komputasi dan Kontrol, 11*(2), 262–273. https://doi.org/10.15575/telka.v11n2.262-273

Ramsari, N., & Hidayat, T. (2023). Teknologi Internet of Things (IoT) pada tanaman selada dan pakcoy hidroponik dengan menggunakan perhitungan MAPE. *Journal of Applied Informatics and Computing, 7*(1). https://doi.org/10.30871/jaic.v7i1.5011

Sasmoko, D., Rasminto, H., & Rahmadani, A. (2019). Rancang bangun sistem monitoring kekeruhan air berbasis IoT pada tandon air warga. *Jurnal Informatika Upgris, 5*(1), 25–34. https://doi.org/10.26877/jiu.v5i1.2993

Septabrina, C. K., & Sutarman. (2025). Budidaya pakcoy (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*) sistem hidroponik dan pemanfaatannya secara *in situ* untuk konsumsi. *Procedia of Engineering and Life Science*.

Sudarmo, A. P. (2018). Pemanfaatan pertanian secara hidroponik untuk mengatasi keterbatasan lahan pertanian di daerah perkotaan.

Syafi'i, A., Kurniawan, A. H., & Rusda. (2024). Rancang bangun alat penyiram tanaman otomatis berbasis ESP32 di Desa Purwajaya. *PoliGrid, 5*(2), 50–56. https://doi.org/10.46964/poligrid.v5i2.47