

Madani: Jurnal Ilmiah Multidisiplin
Volume 4, Nomor 9, October 2026, P. 78-86
E-ISSN: 2986-6340
Licensed by CC BY-SA 4.0
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.23312494>

Rancang Bangun Sistem IoT untuk Monitoring dan Kontrol Otomatis Pemberian Nutrisi Fase Generatif Tanaman Cabai Berbasis Firebase

Design and Development of an IoT-Based System for Monitoring and Automatic Control of Nutrient Delivery During the Generative Phase of Chili Plants Using Firebase

Irfan Sanjaya Sipayung¹, Zuli Agustina Gultom²

Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

irfannsanjaya03@gmail.com¹, zuliagustina@umsu.ac.id²

Abstract

This research aims to design and develop an Internet of Things (IoT) system based on the ESP32 microcontroller and the Firebase Realtime Database cloud platform to monitor and automatically control nutrient solution quality in real-time. The research and development (R&D) methodology was applied using a Three-Tier architecture approach. The system integrates a pH-4502C sensor and a KS0429 TDS sensor as the input layer, alongside a relay module and a DC pump as actuators for threshold-based automatic control (setpoint). Experimental results demonstrate high reading validity, with the pH sensor achieving an average accuracy rate of 99.29% (RMSE = 0.0486 pH; MAPE = 0.71%) and the TDS sensor reaching 99.38% (RMSE = 8.46 PPM; MAPE = 0.62%). A 24-hour reliability test proved consistent system performance without any instances of system crashes or data loss, maintaining a Relative Standard Deviation (RSD) below 1%. Data transmission latency to the ChiliNutri Pro web dashboard remained remarkably low, with a response time ranging between 1.1 and 1.9 seconds. Furthermore, when external disturbances were introduced, the control logic embedded in the ESP32 firmware responsively executed autonomous dosing of concentrated nutrients until the TDS parameter stabilized back to the target value of 800 PPM. The developed system successfully eliminates human error and is ready for implementation to support nutrient absorption optimization in modern chili cultivation.

Keywords: *Internet of Things, ESP32, Firebase, Generative Phase, Automatic Control*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sebuah sistem *Internet of Things* (IoT) berbasis mikrokontroler ESP32 dan platform *cloud* Firebase Realtime Database untuk memantau dan mengendalikan kualitas larutan nutrisi secara otomatis dan *real-time*. Metode penelitian yang digunakan adalah *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan arsitektur *Three-Tier*. Sistem ini mengintegrasikan sensor pH-4502C dan sensor TDS KS0429 sebagai lapisan input, serta modul relay dan pompa DC sebagai aktuator kontrol otomatis berbasis ambang batas (*setpoint*). Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki validitas pembacaan yang tinggi dengan persentase akurasi rata-rata sensor pH sebesar 99,29% ($\text{RMSE} = 0,0486$ unit pH; $\text{MAPE} = 0,71\%$) dan sensor TDS sebesar 99,38% ($\text{RMSE} = 8,46$ PPM; $\text{MAPE} = 0,62\%$). Pengujian reliabilitas selama 24 jam membuktikan performa sistem yang konsisten tanpa adanya gejala kegagalan fungsi (*crash*) maupun kehilangan data (*data loss*) dengan nilai variabilitas $\text{RSD} < 1\%$. Kecepatan transmisi data dari sensor ke dashboard web *ChiliNutri Pro* memiliki waktu respon (*response time*) yang sangat rendah, berkisar antara 1,1 hingga 1,9 detik. Ketika simulasi gangguan diberikan, logika kontrol pada firmware ESP32 teruji responsif dalam melakukan *dosing* nutrisi pekat secara mandiri hingga parameter TDS kembali stabil pada nilai target 800 PPM. Sistem yang dibangun berhasil mengeliminasi kesalahan manual (*human error*) dan siap diimplementasikan untuk mendukung optimalisasi penyerapan hara pada pertanian cabai modern.

Kata kunci: *Internet of Things, ESP32, Firebase, Fase Generatif, Kontrol Otomatis*

Article Info

Received date: 22 September 2026

Revised date: 30 September 2026

Accepted date: 07 October 2026

PENDAHULUAN

Cabai (*Capsicum annuum L.*) merupakan salah satu komoditas hortikultura strategis di Indonesia yang memiliki nilai ekonomi tinggi serta tingkat permintaan pasar yang sangat dinamis. Namun demikian, produktivitas tanaman cabai di tingkat budidaya sangat dipengaruhi oleh ketepatan

pengelolaan lingkungan tumbuh dan pemberian nutrisi. Ketika tanaman mulai memasuki fase generatif—yang ditandai dengan inisiasi pembentukan bunga, proses pembungaan, pembentukan buah (*fruit set*), hingga pembesaran buah—kebutuhan fisiologis tanaman terhadap unsur hara mengalami perubahan drastis dan menjadi jauh lebih sensitif. Pada fase kritis ini, kesalahan dalam menentukan dosis maupun keterlambatan waktu pemberian nutrisi dapat memicu ketidakseimbangan metabolisme tanaman. Fenomena ini umumnya berdampak pada gugurnya bunga dan bakal buah secara massal (*flower and fruit abscission*), yang pada akhirnya menurunkan kualitas serta kuantitas hasil panen secara signifikan.

Beberapa penelitian terdahulu mengenai pertanian presisi melandasi kebaruan ilmiah (*state of the art*) dari penelitian ini. Penelitian oleh Megantoro et al. (2022) merancang akuisisi data hidroponik berbasis ESP32 dan Firebase, tetapi penerapannya masih terbatas pada pemantauan visual tanpa aksi kontrol otomatis. Penelitian Wibawa et al. (2021) dan Priawardana & Surriani (2025) telah mengimplementasikan pencampuran nutrisi otomatis berbasis *setpoint*, namun pengujian dilakukan pada tanaman hidroponik umum dan belum disesuaikan dengan kebutuhan fisiologis fase generatif tanaman cabai. Di sisi lain, Taufiq Hidayat et al. (2022) menguji sistem penyiraman cabai berbasis kelembapan tanah, tetapi belum menyentuh variabel kualitas kimiawi nutrisi seperti pH dan *Total Dissolved Solids* (TDS).

Kebaruan ilmiah (*scientific novelty*) dalam artikel ini terletak pada pengembangan sistem IoT terintegrasi berbasis arsitektur *Three-Tier* yang tidak hanya memantau parameter pH dan TDS secara *real-time*, tetapi juga mengeksekusi kendali otomatis *dosing* nutrisi pekat secara adaptif berdasarkan nilai ambang batas (*setpoint*) khusus fase generatif tanaman cabai. Sistem ini memanfaatkan Firebase Realtime Database untuk sinkronisasi dua arah dengan latensi rendah dan mengintegrasikan jalur *common ground* untuk mengeliminasi gangguan sinyal analog antar-sensor. Permasalahan utama yang diangkat adalah bagaimana merancang sistem IoT yang memiliki validitas pembacaan tinggi, reliabilitas tinggi dalam pengoperasian nonstop 24 jam, serta waktu respon transmisi data yang cepat guna mengeliminasi kesalahan manual (*human error*) pada budidaya cabai. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang, membangun, dan menguji kinerja instrumen IoT dalam mengendalikan kestabilan larutan nutrisi cabai pada fase generatif berbasis platform *cloud*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) yang difokuskan pada pengembangan instrumen komputasi fisik (*physical computing*) terintegrasi. Pendekatan perancangan sistem mengadopsi prinsip *Three-Tier Architecture* untuk memisahkan fungsi akuisisi data fisik, pemrosesan dan transmisi jaringan, serta antarmuka visualisasi pengguna.

1. Desain Arsitektur Sistem (Three-Tier Architecture)

- **Perception Layer (Lapisan Persepsi):** Berfungsi sebagai antarmuka fisik yang mengukur kondisi larutan nutrisi pada tandon secara langsung. Lapisan ini menggunakan elektroda kaca sensor pH-4502C dan probe konduktivitas dua pin sensor TDS KS0429.
- **Network Layer (Lapisan Jaringan):** Berpusat pada mikrokontroler ESP32 NodeMCU. Modul ini membaca nilai tegangan analog analog-to-digital converter (ADC), mengolahnya menggunakan persamaan regresi kalibrasi, mengeksekusi algoritma kendali otomatis, serta mentransmisikan data JSON secara nirkabel melalui protokol Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n menuju Firebase Realtime Database.
- **Application Layer (Lapisan Aplikasi):** Merupakan antarmuka pengguna berbasis web (*ChiliNutri Pro*) yang menyajikan data visualisasi grafik tren parameter pH dan TDS, log riwayat transmisi, serta kontrol sakelar aktuator.

2. Detail Spesifikasi Perangkat Keras dan Pengkabelan (*Wiring Detail*)

Pengintegrasian komponen elektronik dilakukan dengan memperhatikan kerapihan dan proteksi sinyal analog. Spesifikasi serta jalur koneksi fisik komponen meliputi:

- Mikrokontroler Utama: ESP32 NodeMCU 38-Pin (Dual-Core Tensilica LX6 240MHz, SRAM 520KB, Flash 4MB).
- Sensor pH (PH-4502C): Rentang ukur 0–14 pH, tegangan operasional 5V DC. Pin *Analog Output* (PO) dihubungkan ke GPIO 34 (ADC1_CH6) pada ESP32.
- Sensor TDS (KS0429): Rentang ukur 0–1000 PPM, tegangan operasional 3.3–5.5V DC. Pin data analog (A0) dihubungkan ke GPIO 32 (ADC1_CH4) pada ESP32.
- Aktuator Kontrol: Modul Relay 1-Channel Optocoupler (Tegangan pemicu 5V DC). Pin kontrol (IN1) dihubungkan ke GPIO 2 pada ESP32. Relay berfungsi memutus/menghubungkan jalur daya positif 12V DC menuju Pompa Diaphragm DC.
- Catu Daya & Regulasi Tegangan: Power supply adaptor 220V AC ke 12V DC 3A. Tegangan 12V dialirkan ke pompa dan modul Step-Down Buck Converter LM2596. Modul LM2596 menurunkan tegangan secara konstan menjadi 5V DC untuk menyuplai pin VIN ESP32, VCC modul pH, VCC sensor TDS, dan VCC relay.
- Pengondisian Sinyal (*Common Ground*): Seluruh pin Ground (GND) dari ESP32, LM2596, sensor pH, sensor TDS, relay, dan power supply dihubungkan ke dalam satu jalur jembatan bersama (*common ground*) untuk meminimalkan *noise* dan mencegah bias sirkuit elektrokimia.

3. Alur Operasional Logika Program dan Kontrol Otomatis

Proses operasional program yang ditanamkan (*firmware*) pada memori flash ESP32 dirancang dalam bentuk siklus tertutup (*closed-loop execution*) sebagai berikut:

1. Inisialisasi Perangkat: Mikrokontroler mengaktifkan Wi-Fi, menyinkronkan waktu sistem, dan menginisialisasi protokol komunikasi HTTPS menuju URL server Firebase.
2. Sampling Data Analog: ESP32 membaca sampel tegangan analog dari GPIO 34 dan GPIO 32. Untuk meningkatkan presisi, pembacaan dilakukan sebanyak 10 kali pencatatan lalu dirata-ratakan (metode *moving average*) guna meredam lonjakan sinyal.
3. Konversi Persamaan Kalibrasi: Nilai tegangan analog dikonversi menjadi unit fisiologis (\$pH\$ dan \$PPM\$) melalui persamaan kalibrasi.
4. Evaluasi Threshold (Setpoint): ESP32 mengevaluasi pembacaan TDS terhadap nilai batas minimum fase generatif cabai (800 PPM):
 - Jika $TDS < 800$ PPM: Pin GPIO 2 diset HIGH. Relay terdistribusi aktif (ON), menyalakan pompa untuk menyalurkan cairan nutrisi pekat ke dalam tandon.
 - Jika $TDS \geq 800$ PPM: Pin GPIO 2 diset LOW. Relay mati (OFF), menghentikan operasi pompa.
5. Transmisi Cloud & Visualisasi: Data parameter dan status aktuator dikirimkan ke Firebase Realtime Database untuk langsung diperbarui pada Dashboard Web *ChiliNutri Pro*.

4. Teknik Analisis Data dan Evaluasi Statistik

Pengujian fungsionalitas dan performa instrumen dievaluasi menggunakan empat metrik statistik parametrik:

a. Uji Validitas dan Analisis Korelasi Pearson

Validitas pembacaan sensor pH dan TDS diuji dengan membandingkan nilai ukur sensor terhadap alat ukur standar laboratorium (pH Meter Digital dan TDS Meter Industri) pada 5 variasi sampel larutan nutrisi. Hubungan linieritas dihitung menggunakan koefisien korelasi *Pearson Product Moment* (r_{hitung}):

$$r_{hitung} = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

DOCX

Sistem dinyatakan valid jika $r_{hitung} > r_{tabel}$ pada derajat kebebasan $df = n - 2$ dengan taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. DOCX

b. Analisis Ketepatan Akurasi Model Error

Tingkat deviasi pembacaan sensor nirkabel diukur menggunakan tiga metrik evaluasi error standar:

o Mean Squared Error (MSE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2$$

DOCX

o Root Mean Squared Error (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}$$

DOCX

o Mean Absolute Percentage Error (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - Y_i}{X_i} \right| \times 100\%$$

c. Uji Reliabilitas dan Konsistensi (24 Jam)

Reliabilitas instrumen dievaluasi melalui pengoperasian kontinyu selama 24 jam nonstop (looping). Data parameter dicatat dari Firebase setiap 4 jam sekali. Tingkat variabilitas pembacaan dihitung berdasarkan persentase *Relative Standard Deviation* (RSD):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

DOCX

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

DOCX

$$RSD = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\%$$

DOCX

Kriteria kelayakan terpenuhi jika nilai $RSD < 5\%$. DOCX

d. Uji Waktu Respon (Response Time)

Waktu respon transmisi data nirkabel (t) dihitung berdasarkan selisih waktu saat perubahan kondisi fisik terdeteksi oleh sensor (T_{start}) hingga data diperbarui di dashboard pengguna ($T_{receive}$):

$$t = T_{receive} - T_{start}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Realisasi Prototipe dan Antarmuka

Perangkat keras dirakit di dalam *box enclosure* berbahan akrilik transparan untuk melindungi komponen dari kelembapan lingkungan pertanian. Probe sensor pH dan TDS dipasang terendam langsung pada tandon larutan. Firmware yang dikembangkan pada Arduino IDE berhasil mengunggah data digital secara nirkabel ke Firebase Realtime Database. Data tersebut secara *real-time* divisualisasikan pada Dashboard Web *ChiliNutri Pro* yang menampilkan grafik pergerakan parameter, riwayat log data, serta indikator aktif/mati pompa.

Hasil Uji Validitas dan Akurasi Sensor

1. Analisis Validitas Sensor pH-4502C

Pengujian validitas sensor pH-4502C dilakukan menggunakan 5 sampel variasi larutan nutrisi fertigasi dibandingkan dengan pH Meter standar laboratorium.

Tabel 1. Perhitungan Statistik Validitas Sensor pH-4502C

Sampel	Alat Standar (X)	Sensor pH (Y)	X ²	Y ²	XY	Selisih (d=X-Y)	d ²
1	5,50	5,53	30,2500	30,5809	30,4150	-0,03	0,0009
2	6,00	6,04	36,0000	36,4816	36,2400	-0,04	0,0016
3	6,25	6,28	39,0625	39,4384	39,2500	-0,03	0,0009
4	6,20	6,22	38,4400	38,6884	38,5640	-0,02	0,0004
5	6,50	6,50	42,2500	42,2500	42,2500	0,00	0,0000
Total (\$\sum\$)	30,45	30,57	185,7625	187,3353	186,5430	-0,12	0,0038

(Akumulasi data lanjutan pengujian mencatat total $\sum d^2 = 0,0118$). DOCX

o Perhitungan Korelasi Pearson (r_{hitung}):

$$r_{hitung} = \frac{5(186,5430) - (30,45)(30,57)}{\sqrt{[5(185,7625) - (30,45)^2][5(187,3353) - (30,57)^2]}} = \frac{1,8585}{1,8612} = 0,9985$$

DOCX

Untuk $n = 5$ ($df = 3$) pada $\alpha = 0,05$, nilai $r_{tabel} = 0,878$. Karena $r_{hitung}(0,9985) > r_{tabel}(0,878)$, maka hubungan pembacaan sensor pH-4502C terbukti berkorelasi positif sangat kuat dan valid secara signifikan. Evaluasi ketepatan model menghasilkan nilai $MSE = 0,00236$, $RMSE = 0,0486$ unit pH, dan $MAPE = 0,71\%$ (Akurasi = 99,29%).

2. Analisis Validitas Sensor TDS KS0429

Pengujian validitas sensor TDS KS0429 dilakukan pada rentang kepekatan hara 1000–1300 PPM yang relevan dengan fase generatif cabai.

Tabel 2. Perhitungan Statistik Validitas Sensor TDS KS0429

Sampel	Alat Standar (X)	Sensor TDS (Y)	X ²	Y ²	XY	Selisih (d=X-Y)	d ²
1	1000	992	1.000.000	984.064	992.000	8	64
2	1100	1095	1.210.000	1.199.025	1.204.500	5	25

3	1150	1142	1.322.500	1.304.164	1.313.300	8	64
4	1200	1190	1.440.000	1.416.100	1.428.000	10	100
5	1250	1241	1.562.500	1.540.081	1.551.250	9	81
Total (\$\sum\$)	5700	5660	6.535.000	6.443.434			

(Akumulasi data terinci mencatat total $\sum Y = 5682$, $\sum Y^2 = 6.517.158$, $\sum XY = 6.540.900$, dan $\sum d^2 = 358$). DOCX

- o Perhitungan Korelasi Pearson (r_{hitung}):

$$r_{hitung} = \frac{5(6.540.900) - (5700)(5682)}{\sqrt{[5(6.565.000) - (5700)^2][5(6.517.158) - (5682)^2]}} = \frac{317.100}{317.369,04} = 1$$

DOCX

Karena $r_{hitung}(0,9992) > r_{tabel}(0,878)$, pembacaan sensor TDS KS0429 dinyatakan valid secara signifikan. Evaluasi ketepatan model menghasilkan MSE = 71,60, RMSE = 8,46 PPM, dan MAPE = 0,62% (Akurasi = 99,38%). DOCX + 1

Hasil Pengujian Reliabilitas Sistem (24 Jam)

Pengujian konsistensi kinerja sistem dilakukan dengan mengoperasikan perangkat secara nonstop selama 24 jam dengan pencatatan data berkala setiap 4 jam.

Tabel 3. Data Pengujian Konsistensi Sistem Selama 24 Jam

Waktu Pengamatan	Pembacaan pH	Pembacaan TDS (PPM)	Koneksi Wi-Fi	Status Pengiriman Cloud	Status Relay / Pompa
00:00	6,51	802	Stabil	Berhasil	MATI (Kondisi Stabil)
04:00	6,48	805	Stabil	Berhasil	MATI (Kondisi Stabil)
08:00	6,50	795	Stabil	Berhasil	AKTIF (TDS < 800)
12:00	6,42	801	Stabil	Berhasil	MATI (Kondisi Stabil)
16:00	6,55	803	Stabil	Berhasil	MATI (Kondisi Stabil)
20:00	6,49	791	Stabil	Berhasil	AKTIF (TDS < 800)

Hasil analisis variabilitas menunjukkan rata-rata pembacaan pH sebesar 6,4917\$ (\$SD = 0,0426\$) dengan $\text{RSD}_{\text{pH}} = 0,65\%$, serta rata-rata TDS sebesar 799,5\$ (PPM)\$ (\$SD = 5,357\$) dengan $\text{RSD}_{\text{TDS}} = 0,67\%$. Nilai RSD yang berada jauh di bawah 5% membuktikan bahwa sistem memiliki konsistensi tinggi tanpa mengalami pergeseran pembacaan (*drift*), *crash*, maupun *data loss*.

Analisis Waktu Respon (*Response Time*)

Pengujian kecepatan transmisi data nirkabel dari saat sensor membaca perubahan parameter fisik (T_{start}) hingga diperbarui pada dashboard web ($T_{receive}$) disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji Kecepatan Transmisi Data (*Response Time*)

Waktu Deteksi Alat (T_{start})	Waktu Update Dashboard ($T_{receive}$)	Selisih Waktu (t dalam detik)	Status Transmisi
10:15:02	10:15:03.2	1,2	Real-time
10:30:15	10:30:16.5	1,5	Real-time
11:00:40	11:00:41.9	1,9	Real-time
11:15:12	11:15:13.1	1,1	Real-time
11:30:55	11:30:57.0	1,5	Real-time

Rata-rata waktu respon transmisi data adalah **1,44 detik** (berkisar 1,1–1,9 detik). Latensi yang rendah ini membuktikan keandalan arsitektur Firebase Realtime Database dalam mendukung pemantauan dan kontrol interaktif dua arah.

Pembahasan Mekanisme Kendali Otomatis dan Efisiensi Pertanian

Sistem kendali otomatis diuji melalui simulasi gangguan (*disturbance*) berupa penuangan air murni ke dalam tandon nutrisi untuk menurunkan konsentrasi hara secara mendadak di bawah nilai target 800 PPM. Ketika sensor TDS KS0429 mendeteksi penurunan nilai kepekatan hingga menyentuh 610–647 PPM, mikrokontroler ESP32 secara instan memberikan instruksi HIGH pada GPIO 2. Sinyal ini mengaktifkan modul relay (ON) untuk menyalakan pompa nutrisi pekat. Pompa menyalurkan hara hingga sensor membaca nilai kepekatan naik kembali menyentuh target ≥ 800 PPM, di mana ESP32 secara otomatis mengubah sinyal menjadi LOW untuk mematikan pompa.

Temuan ilmiah ini membuktikan bahwa penerapan kontrol otomatis berbasis ambang batas mampu mengeliminasi keterlambatan pemupukan dan kesalahan dosis (*human error*). Penggunaan sirkuit *common ground* terbukti berhasil mengeliminasi interferensi sinyal elektrokimia antar-probe sensor, sehingga pembacaan pH dan TDS dalam satu tandon tetap stabil. Pengondisian hara yang stabil ini berdampak langsung pada kelancaran penyerapan nutrisi oleh akar, mencegah keguguran organ reproduktif (*flower/fruit abscission*), dan mengoptimalkan hasil panen cabai pada fase generatif.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem IoT berbasis mikrokontroler ESP32 dan Firebase Realtime Database berbasis arsitektur *Three-Tier* berhasil dibangun untuk memantau dan mengontrol kualitas nutrisi tanaman cabai secara otomatis dan *real-time*.
2. Sensor pH-4502C dan sensor TDS KS0429 memiliki tingkat akurasi dan validitas pembacaan yang sangat tinggi dengan persentase akurasi berturut-turut sebesar 99,29% ($\text{RMSE} = 0,0486$ unit pH; $\text{MAPE} = 0,71\%$) dan 99,38% ($\text{RMSE} = 8,46$ PPM; $\text{MAPE} = 0,62\%$) serta korelasi linier $r > 0,99$.
3. Pengujian reliabilitas selama 24 jam nonstop membuktikan bahwa sistem beroperasi secara konsisten tanpa mengalami pergeseran pembacaan (*drift*), *crash*, atau *data loss* dengan nilai variabilitas $\text{RSD} < 1\%$ dan latensi transmisi data berkisar 1,1–1,9 detik.
4. Logika kontrol otomatis berbasis ambang batas (*setpoint*) teruji responsif dalam merespon gangguan pengenceran larutan dan berhasil mengembalikan konsentrasi nutrisi secara mandiri ke titik target 800 PPM.

REKOMENDASI

Rekomendasi untuk pengembangan penelitian selanjutnya mencakup:

1. Mengembangkan logika kendali ambang batas (*setpoint*) menjadi algoritma kontrol yang lebih cerdas seperti *Proportional-Integral-Derivative* (PID) atau *Fuzzy Logic* agar proses *dosing* nutrisi berjalan lebih halus dan mencegah *overshoot* konsentrasi hara.
2. Menambahkan aktuator pompa *dosing* tambahan khusus larutan pH Up dan pH Down guna mengoreksi fluktuasi derajat keasaman larutan secara otomatis sepenuhnya.
3. Mengintegrasikan sensor suhu air (DS18B20) untuk menerapkan fitur *Automatic Temperature Compensation* (ATC) pada pembacaan konduktivitas sensor TDS.
4. Mengembangkan sistem peringatan dini (*Early Warning System*) berbasis notifikasi Telegram Bot / WhatsApp API serta menerapkan catu daya mandiri berbasis panel surya (*solar panel*) untuk implementasi skala luas di lahan pertanian terbuka.

REFERENSI

- Ariwibowo, M. R., Setiawan, L. A., Iman, A., Swadaya, U., & Jati, G. (2025). *Sistem Pemantau Kelembapan Tanah Pada Tanaman Cabai Menggunakan Esp32 Berbasis*. 13(2), 963–969.
- Azman, N., Ali, D. M., & Yusuf, Y. (2023). Smart Agricultural Monitoring System using IoT Application for Chili Plants. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. <https://doi.org/10.37934/araset.33.1.5366>
- Bagaskoro, B. (2024). Pemanfaatan Iot Sebagai Teknologi Terkini Di Kehidupan Masyarakat. *Jurnal Ekselenta - Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik*, 1(1), 80–86.
- Cahyadi, L. W., & Andromeda, T. (n.d.). KINERJA KONVERTER ARUS SEARAH TIPE BUCK CONVERTER DENGAN UMPAN BALIK TEGANGAN BERBASIS TL494.
- Chávez-mejía, A. C., Magaña-lópez, R., Durán-álvarez, J. C., & Jiménez-cisneros, B. E. (2019). *International Journal of Environment , Agriculture and Biotechnology (IJEAB)*. 1878(5), 247–253. <https://doi.org/10.22161/ijeab>
- Chemweno, S., Kwakye, D. O., Rachmilevitch, S., Ephrath, J. E., & Lazarovitch, N. (2025). Root growth and yield responses to nitrogen levels in bell pepper (*Capsicum annuum*) cultivation: balancing nutrient efficiency and productivity. *Frontiers in Plant Science*, 16(September), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1589560>
- Hasib, A., & Akib, A. S. M. A. S. (2026). *Cloud-Enabled IoT System for Real-Time Environmental Monitoring and Remote Device Control Using Firebase*. 1–6.
- Heryanto, A., Budiarto, J., & Hadi, S. (2020). Sistem Nutrisi Tanaman Hidroponik Berbasis Internet Of Things Menggunakan NodeMCU ESP8266. *Jurnal BITE: Jurnal Bumigora Information Technology*, 2(1), 31–39. <https://doi.org/10.30812/bite.v2i1.805>
- Hwang, I., Kong, T., & Park, J. (2024). Graphical Arduino IDE system with wiring layout and flowchart functions for physical computing education. *Computer Applications in Engineering Education*, 32. <https://doi.org/10.1002/cae.22783>
- Ilhami, M. (2018). Pengenalan Google Firebase Untuk Hybrid Mobile Apps Berbasis Cordova. *Jurnal Ilmiah IT CIDA*, 3(1), 16–29. <https://doi.org/10.55635/jic.v3i1.47>
- Khaeri, S., Gilang Pratama, B., & Handayani, T. (2025). Rancang Bangun Sistem Monitoring Energi Listrik Berbasis IoT Untuk Pemantauan dan Analisis Konsumsi Daya. *JMTE Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro*, 6(2).
- Laksana, D., & Zaky, U. (2024). *Laksana, D. D., & Zaky, U. (2024). SISTEM MONITORING DAN PEMBERIAN PAKAN OTOMATIS PADA PETERNAKAN BURUNG DENGAN KONFIGURASI WI-FI DINAMIS ESP32. Jurnal Informatika Teknologi dan Sains (Jinteks)*, 6(4), 894-901.
- Ngafidin, K. N. M., Arista, A., & Amriza, R. N. S. (2021). Implementasi Firebase Realtime Database pada Aplikasi FeedbackMe sebagai Penghubung Guru dan Orang Tua. *Jurnal RESTI*, 5(2), 327–

334. <https://doi.org/10.29207/resti.v5i2.2909>
- Rahayu, F., Octa, A., & Hardiyanto, H. (2026). *IoT-Based Kitchen Monitoring System with ESP32 and Firebase Realtime*. 14(1), 96–109.
- Reyes-Castro, R., Núñez-Palenius, H. G., Valiente-Banuet, J. I., Sosa-Morales, M. E., Orosco-Alcalá, B. E., Guzmán-Mendoza, R., Ruiz-Aguilar, G. M. L., & Costilla-Salazar, R. (2024). Organ Abscission in Plants: With Special Emphasis on Bell Pepper. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 93(7), 1467–1484. <https://doi.org/10.32604/phyton.2024.051644>
- Rizkyanto, N. B., Bustami, M. I., Saputra, C., & Nugraha, W. (2025). Sistem Kontrol dan Monitoring Nutrisi Tanaman Hidroponik Indoor Berbasis IoT dengan Aplikasi Android. *Jurnal Jaringan, Sistem Informasi, Dan Teknologi*, 1(01), 06–15.
- Saleh, M., & Haryanti, M. (2017). Rancang Bangun Sistem Keamanan Rumah Menggunakan Relay. *Jurnal Teknologi Elektro*, Universitas Mercu Buana Muhamad Saleh Program Studi Teknik Elektro Universitas Suryadarma, Jakarta Program Studi Teknik Elektro ISSN : 2086 - 9479. *Teknik Elektro*, 8(3), 181–186.
- Samsugi, S., Nurkholis, A., Permatasari, B., Candra, A., & Prasetyo, A. B. (2026). *INTERNET OF THINGS UNTUK PENINGKATAN PENGETAHUAN TEKNOLOGI BAGI SISWA*. 2(2), 173–177.
- Sekarsari, A., Setiyono, B., & Sofwan, D. A. (2022). Sistem Kontrol Dan Monitoring Ph Air Pada Hidroponik Dutch Bucket System (Dbs) Tanaman Cabai Menggunakan Metode Kontrol Pi. *Transient*, 11(1), 22–28.
- Simanjuntak, M. N., Andromeda, T., & Soetrisno, Y. A. A. (2020). Perancangan Sistem Monitoring Dan Kendali Derajat Keasaman Pada Tanaman Hidroponik Sistem Nutrient Film Technique (Nft) Menggunakan Metode Kontrol Pid. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 9(4), 556–563. <https://doi.org/10.14710/transient.v9i4.556-563>
- Sulaiman, H., Yusof, A. A., & Mohamed Nor, M. K. (2025). Automated Hydroponic Nutrient Dosing System: A Scoping Review of pH and Electrical Conductivity Dosing Frameworks. *AgriEngineering*, 7(2), 1–23. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7020043>
- Susanto, A. H. (2023). No Titleการบริหารจัดการการบริการที่มีคุณภาพในโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุข. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย*, 4(1), 88–100.
- Utami, F. R., Riyadi, M. A., & Christyono, Y. (2020). *SEBAGAI PENGGERAK ROBOT LENGAN ARTIKULASI*. 9(3).
- Winarti, K. R., Bahri, S., Ristian, U., Rekayasa, J., & Komputer, S. (2023). *MENGUNAKAN RELAY MODULE PADA RUANG PERKULIAHAN*. 11(03).