

Implementation of an Intelligent System for the Automation and Monitoring of Hydroponic Plants

Olantianus Bebi Maxrin^{1*)}, Ryan Putra Laksana²⁾, Hani Dewi Ariessanti³⁾, B. Harjo Baskoro⁴⁾

¹⁾²⁾³⁾⁴⁾Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Esa Unggul

^{*)}Correspondence author: olantianusbebi@gmail.com, Jakarta, Indonesia

DOI: <https://doi.org/10.37012/jtik.v12i2.3724>

Abstract

Manual monitoring of household hydroponic systems is a critical limitation for users unable to be consistently present at the site. Manual monitoring cannot continuously detect fluctuations in Total Dissolved Solids (TDS) and growing medium moisture, risking physiological damage to lettuce and pak choi. This study designed, implemented, and evaluated an IoT-based smart system for real-time monitoring and automated irrigation on a household hydroponic installation in Panongan, Tangerang Regency. The study used a prototype development method with an ESP32 microcontroller integrated with a TDS sensor, a soil moisture sensor, a relay module, a water pump, and an I2C 16x2 LCD, with Blynk as the remote interface. The system applies rule-based logic: the pump activates when moisture is 60% or below and TDS is within 800-950 ppm. Testing ran over three days, data collected every 30 minutes, yielding 30 data points. The TDS sensor achieved an average error of 1.83%; soil moisture showed a maximum deviation of 4%. The pump activated automatically in all 6 triggered events, TDS remained normal in 90% of data points, moisture was restored in 100% of irrigation events, and all 9 notifications were received with an average latency of 5-6 seconds. The system is recommended for replication with further development.

Keywords: Internet of Things, hydroponics, ESP32, TDS Sensor, Automated Irrigation

Abstrak

Pemantauan sistem hidroponik rumah tangga yang masih manual menjadi hambatan bagi pengguna dengan keterbatasan waktu untuk hadir fisik di lokasi instalasi. Ketidakmampuan pemantauan manual mendeteksi fluktuasi Total Dissolved Solids (TDS) dan kelembapan media tanam secara kontinu berpotensi menyebabkan kerusakan fisiologis pada tanaman selada dan pakcoy. Penelitian ini bertujuan merancang, mengimplementasikan, dan menguji sistem cerdas berbasis Internet of Things (IoT) untuk pemantauan real-time dan otomatisasi penyiraman pada instalasi hidroponik rumah tangga di Panongan, Kabupaten Tangerang. Penelitian menggunakan metode prototype development dengan mikrokontroler ESP32 terintegrasi sensor TDS, sensor soil moisture, modul relay, pompa air, dan LCD 16x2 I2C, serta platform Blynk sebagai media monitoring jarak jauh. Sistem menerapkan logika rule-based decision dengan pompa aktif ketika kelembapan media tanam kurang dari sama dengan 60% dan TDS pada rentang 800-950 ppm. Pengujian dilaksanakan tiga hari dengan pengambilan data setiap 30 menit (30 titik data). Hasil pengujian menunjukkan sensor TDS memiliki rata-rata kesalahan 1,83% dan sensor soil moisture memiliki selisih maksimum 4%. Pompa aktif otomatis pada seluruh 6 kejadian kondisi terpenuhi, TDS normal pada 90% data, kelembapan pulih pada 100% kejadian penyiraman, dan seluruh 9 notifikasi diterima pengguna dengan latensi rata-rata 5-6 detik. Sistem direkomendasikan direplikasi pada instalasi hidroponik rumah tangga lain dengan pengembangan lanjutan.

Kata Kunci: Internet of Things, Hidroponik, ESP32, Sensor TDS, Otomatisasi Penyiraman

PENDAHULUAN

Pertanian konvensional di Indonesia menghadapi tekanan serius akibat penyusutan lahan produktif yang berlangsung seiring pertumbuhan kawasan permukiman dan industri, khususnya di wilayah perkotaan dan semi-urban, sehingga mendorong perlunya adopsi metode budidaya alternatif yang dapat dijalankan pada lahan terbatas namun tetap produktif. Urban farming berbasis hidroponik memungkinkan budidaya sayuran segar tanpa bergantung pada ketersediaan lahan pertanian konvensional (Awal et al., 2025). Menurut (Nizam et al., 2024), metode hidroponik mampu meningkatkan hasil panen hingga 40% dibandingkan metode konvensional karena penyerapan nutrisi oleh akar berlangsung lebih optimal. Keberhasilan sistem hidroponik sangat bergantung pada kestabilan dua parameter utama, yaitu konsentrasi nutrisi larutan yang diukur dalam satuan Total Dissolved Solids (TDS) dan kelembapan media tanam; kegagalan menjaga kestabilan kedua parameter ini berisiko menyebabkan kegagalan panen (Luckardi et al., 2025).

Berdasarkan observasi lapangan awal di Panongan, Kabupaten Tangerang, sebagian besar pengelola instalasi hidroponik rumah tangga masih menggunakan TDS meter konvensional dan pengamatan visual, sehingga pemantauan tidak berlangsung kontinu dan fluktuasi kondisi di luar jadwal pengecekan tidak terdeteksi tepat waktu. Kondisi ini diperparah oleh keterbatasan waktu pengguna yang umumnya memiliki pekerjaan di luar rumah. (Herrera-Arroyo & Martínez-Nolasco, 2025) menunjukkan bahwa kadar TDS ideal untuk selada hidroponik berada pada kisaran 800–1.000 ppm, dan (Saha, 2021; Vought et al., 2024) membuktikan bahwa variasi kecil pada nilai TDS memengaruhi pertumbuhan daun selada secara signifikan. Pakcoy memiliki kebutuhan TDS sedikit lebih tinggi, yaitu 900–1.200 ppm, dan sangat sensitif terhadap ketidakseimbangan konsentrasi nutrisi (Muslimah et al., 2024; Wahyuningsih et al., 2024). Pemilihan dua tanaman dengan kisaran TDS optimal yang berbeda memberikan tantangan teknis yang representatif terhadap praktik hidroponik rumah tangga.

Teknologi Internet of Things (IoT) menjadi solusi yang relevan karena memungkinkan integrasi sensor fisik, unit pemrosesan data, dan platform komunikasi berbasis internet dalam satu ekosistem yang terhubung secara real-time (Abu Sneineh & Shabaneh, 2023; Laksana et al., 2025). Sistem berbasis IoT dapat mengaktifkan pompa air secara otomatis berdasarkan nilai sensor yang melampaui ambang batas, mengirimkan data ke platform monitoring seperti Blynk, dan memberi notifikasi kepada pengguna (Ameran et al., 2024; Waworundeng et al., 2019). Aspek konsumsi daya turut menjadi pertimbangan penting agar sistem dapat

diadopsi secara berkelanjutan pada instalasi rumah tangga berdaya rendah (Kadam et al., 2024).

Tinjauan terhadap penelitian terdahulu mengungkap kesenjangan yang memperkuat relevansi penelitian ini. Sebagian besar penelitian IoT untuk hidroponik yang telah dipublikasikan berfokus hanya pada fungsi monitoring tanpa mekanisme otomatisasi aktuator yang terintegrasi (Rian Septian Anwar, Nani Agustina, 2024; Tarigan et al., 2023). Penelitian yang mengimplementasikan otomatisasi, seperti (Hadiyoso et al., 2024), umumnya mencakup parameter tambahan seperti pH yang berada di luar cakupan rumah tangga sederhana, dan sebagian besar pengujian dilakukan pada kondisi laboratorium yang tidak sepenuhnya merepresentasikan variabilitas lingkungan rumah tangga nyata. Belum ditemukan penelitian yang secara eksplisit mengintegrasikan pemantauan TDS dan kelembapan media tanam dalam satu logika kontrol otomatis yang diuji langsung pada instalasi hidroponik rumah tangga nyata, khususnya dengan selada dan pakcoy secara bersamaan sebagai dua objek uji yang memiliki kisaran kebutuhan nutrisi optimal berbeda. Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada logika kontrol berbasis kondisi ganda (dual-threshold) antara TDS dan kelembapan media tanam yang divalidasi secara empiris di lapangan pada dua komoditas sayuran daun sekaligus.

Berdasarkan uraian permasalahan, kebutuhan, dan kesenjangan penelitian di atas, penelitian ini bertujuan merancang, mengimplementasikan, dan menguji prototipe sistem IoT berbasis mikrokontroler ESP32 yang mampu melakukan pemantauan real-time dan pengendalian otomatis terhadap kelembapan media tanam dan konsentrasi TDS larutan nutrisi pada instalasi hidroponik tanaman selada dan pakcoy skala rumah tangga di Panongan, Kabupaten Tangerang, serta mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan parameter kestabilan TDS, kestabilan kelembapan, waktu respons pompa, dan efisiensi penggunaan air.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian terapan (applied research) yang menggunakan metode prototype development untuk merancang, membangun, dan menguji sistem otomatisasi dan pemantauan hidroponik berbasis IoT. Objek penelitian adalah sistem hidroponik tanaman selada (*Lactuca sativa* L.) dan pakcoy (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*) yang diotomatisasi menggunakan mikrokontroler ESP32. Penelitian dilaksanakan di Panongan, Kabupaten Tangerang, sebuah kawasan semi-urban dengan komunitas hidroponik rumah tangga aktif,

selama 10 bulan, mencakup tahap identifikasi masalah, perancangan, implementasi, pengujian komponen (black-box testing), pengujian sistem terintegrasi selama tiga hari berturut-turut dengan pengambilan data setiap 30 menit pukul 07.00–11.30 WIB, serta penyusunan laporan.

Data dikumpulkan melalui empat teknik, yaitu studi literatur terhadap jurnal dan referensi terkait IoT, hidroponik, sensor TDS, dan ESP32; observasi lapangan untuk memahami kondisi aktual instalasi hidroponik di Panongan; wawancara semi-terstruktur dengan pelaku hidroponik rumah tangga untuk memperoleh kebutuhan fungsional sistem; serta eksperimen langsung berupa pengujian akurasi sensor, respons otomatisasi pompa, kestabilan koneksi Blynk, dan keandalan notifikasi. Metode pengembangan sistem menggunakan Prototype Model yang terdiri atas lima tahap: analisis kebutuhan, perancangan awal (diagram blok, flowchart, dan use case diagram), pembuatan prototipe, uji coba dan evaluasi, serta penyempurnaan sistem berdasarkan hasil pengujian.

Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

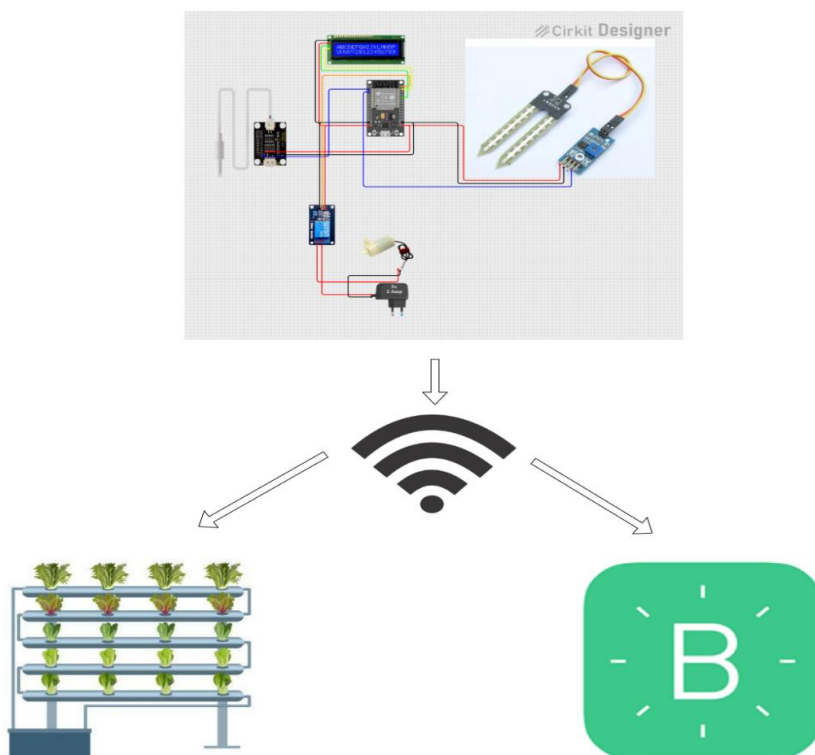
Perangkat keras yang digunakan terdiri atas mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan utama, sensor TDS untuk mengukur konsentrasi nutrisi (ppm), sensor soil moisture untuk mengukur kelembapan media tanam (%), modul relay satu kanal sebagai saklar elektronik, pompa air mini submersible, LCD 16×2 I2C sebagai media monitoring lokal, empat pipa PVC berdiameter 3 inci sepanjang 1,5 meter sebagai media tanam, dan satu wadah reservoir berkapasitas 50 liter. Perangkat lunak yang digunakan meliputi Arduino IDE untuk pengembangan firmware berbahasa C++, platform Blynk 2.0 sebagai dashboard monitoring real-time dan pengiriman notifikasi, serta library WiFi.h, BlynkSimpleEsp32.h, Wire.h, dan LiquidCrystal_I2C.h untuk komunikasi Wi-Fi, protokol Blynk, dan antarmuka I2C LCD.

Tabel 1.
Konfigurasi Pin ESP32 pada Sistem

Komponen	Pin ESP32	Tipe Koneksi	Fungsi
Sensor TDS	GPIO36	Analog Input	Pembacaan konsentrasi nutrisi (ppm)
Sensor Soil Moisture	GPIO39	Analog Input	Pembacaan kelembapan media tanam (%)
Modul Relay	GPIO23	Digital Output	Kendali aktif/nonaktif pompa air (active-low)
LCD SDA	GPIO21	I2C SDA	Jalur data komunikasi I2C untuk LCD 16×2
LCD SCL	GPIO22	I2C SCL	Jalur clock komunikasi I2C untuk LCD 16×2

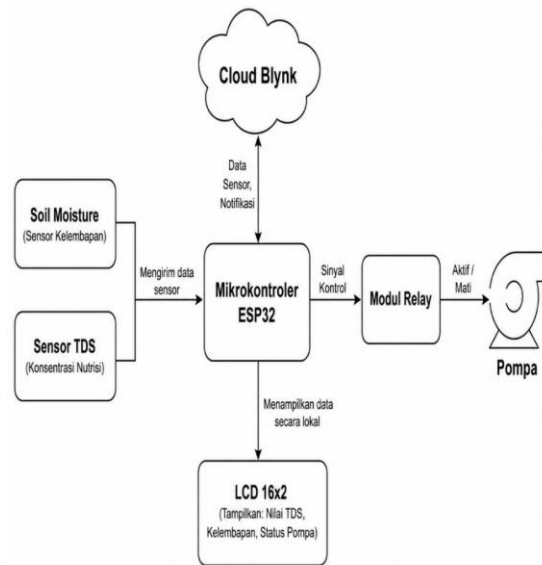
Perancangan Sistem

Penelitian sebelumnya oleh Tarigan et al. (2023) mengembangkan sistem pemantauan hidroponik berbasis ESP32 dan Blynk yang menggunakan sensor TDS, DHT11, dan ultrasonik HC-SR04, namun sistem tersebut masih bersifat monitoring system tanpa mekanisme pengambilan keputusan otomatis maupun aktuator. Keterbatasan ini menjadi dasar pengembangan sistem usulan pada penelitian ini dengan menambahkan fitur otomatisasi berbasis data sensor. Sistem usulan menggunakan sensor kelembapan dan sensor TDS yang datanya diproses oleh ESP32 untuk menentukan kondisi penyiraman berdasarkan nilai ambang batas; apabila kondisi terpenuhi, ESP32 mengaktifkan pompa air melalui modul relay, sementara data hasil pemantauan ditampilkan secara real-time pada aplikasi Blynk dan LCD 16×2 sebagai media monitoring lokal.



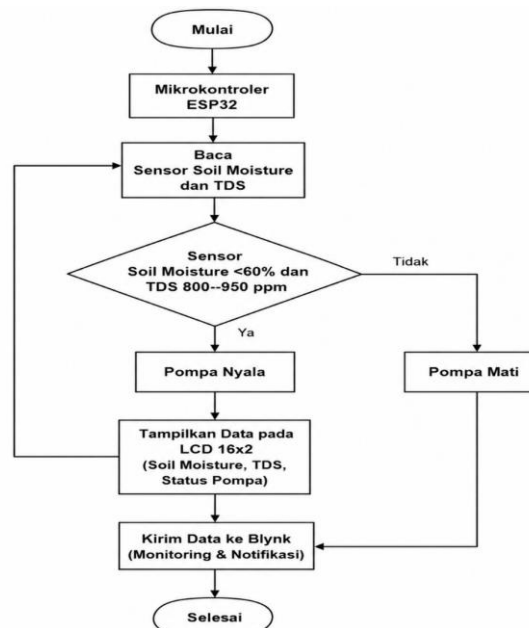
Gambar 1. Desain Sistem Usulan

Diagram blok sistem menggambarkan alur kerja sistem: sensor kelembapan dan sensor TDS mengirimkan data secara kontinu ke ESP32; apabila kelembapan berada di bawah ambang batas dan TDS berada pada nilai ideal, ESP32 mengaktifkan relay untuk menyalakan pompa air, dan seluruh data ditampilkan secara real-time pada aplikasi Blynk serta LCD lokal.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem

Logika kontrol otomatisasi pompa diimplementasikan sebagai rule-based decision system: pompa diaktifkan apabila kelembapan media tanam $\leq 60\%$ dan nilai TDS berada pada rentang 800–950 ppm secara bersamaan; apabila TDS berada di luar rentang tersebut, pompa tidak diaktifkan dan sistem mengirimkan notifikasi ke Blynk (tds_low untuk TDS < 800 ppm, tds_high untuk TDS > 950 ppm). Alur kerja lengkap ditunjukkan pada flowchart sistem berikut.



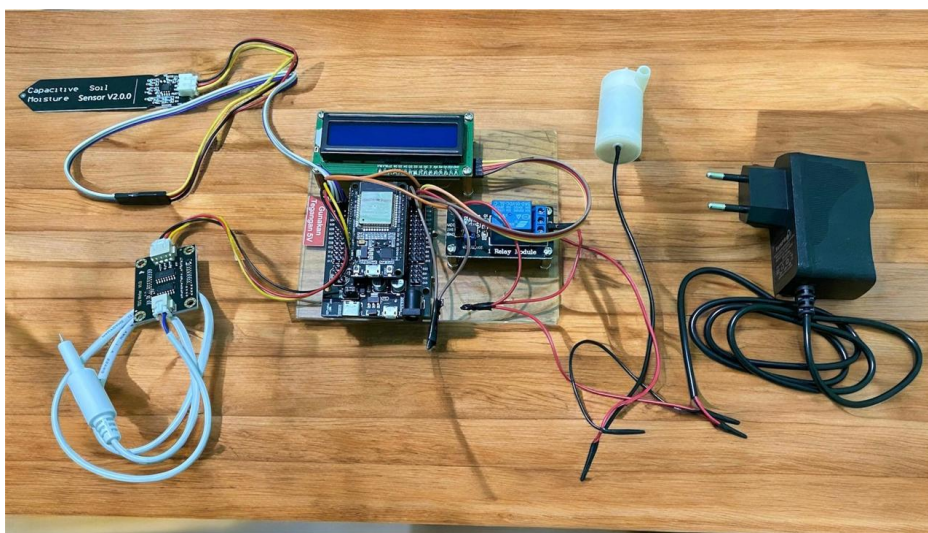
Gambar 3. Flowchart Sistem

Pengujian sistem menggunakan metode black-box testing pada setiap komponen (sensor TDS, sensor soil moisture, relay, pompa, LCD, koneksi Blynk, notifikasi, dan otomatisasi) sebelum dilanjutkan dengan pengujian sistem terintegrasi. Analisis data pengujian terintegrasi dilakukan terhadap empat parameter evaluasi kinerja: kestabilan nilai TDS dibandingkan rentang optimal, kestabilan kelembapan media tanam, waktu respons pompa (selisih antara deteksi kondisi ambang batas dan aktivasi pompa), serta efisiensi penggunaan air yang dievaluasi secara kualitatif berdasarkan jumlah aktivasi pompa terhadap kondisi yang benar-benar terpenuhi (Awal et al., 2025; Nizam et al., 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Sistem

Prototipe sistem berhasil dirakit dan dipasang pada instalasi hidroponik skala rumah tangga di Panongan, Kabupaten Tangerang. Seluruh komponen perangkat keras (ESP32, sensor TDS, sensor soil moisture, modul relay, pompa air, dan LCD 16×2 I2C) terintegrasi pada satu papan prototipe dengan catu daya adaptor 5V/2A, dan total konsumsi daya sistem berada di bawah 15 watt sehingga aman untuk instalasi listrik rumah tangga standar.



Gambar 4. Prototipe Sistem

Dashboard Blynk dikonfigurasi dengan empat widget utama, yaitu tampilan nilai TDS (pin virtual V0), tampilan persentase kelembapan (pin virtual V1), status pompa (pin virtual V3), dan log notifikasi kondisi abnormal. Data pada dashboard diperbarui setiap satu siklus loop firmware (± 6 detik).



Gambar 5. Tampilan Dashboard Blynk

Pengujian Sensor

Pengujian akurasi sensor TDS dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap lima larutan referensi yang telah diketahui konsentrasinya menggunakan TDS meter komersial sebagai acuan.

Tabel 2.

Hasil Pengujian Akurasi Sensor TDS

No	Referensi (ppm)	Pembacaan Sensor (ppm)	Selisih (ppm)	Error (%)
1	200	194	6	3,00
2	400	393	7	1,75
3	600	591	9	1,50
4	800	812	12	1,50
5	1.000	986	14	1,40
Rata-rata	-	-	9,6	1,83

Hasil pengujian menunjukkan rata-rata kesalahan pengukuran sensor TDS sebesar 1,83%, dengan selisih tertinggi 14 ppm pada konsentrasi 1.000 ppm, yang dinilai memadai untuk keperluan monitoring dan kontrol otomatis. Pengujian sensor soil moisture dilakukan pada lima kondisi kelembapan dengan nilai referensi ditentukan secara gravimetrik.

Tabel 3.

Hasil Pengujian Akurasi Sensor Soil Moisture

Kondisi	Sensor (%)	Referensi (%)	Selisih (%)
Sangat kering	2	0	2
Kering	23	20	3
Lembap sedang	50	50	0
Lembap	73	75	2
Basah	96	100	4

Sensor soil moisture menunjukkan selisih maksimum 4% pada kondisi basah, sedangkan pada kondisi lembap sedang tidak terdapat selisih terhadap nilai referensi. Pengujian black-box terhadap modul relay (10 iterasi), pompa air, LCD 16×2, koneksi Blynk, notifikasi, dan otomatisasi pompa (5 skenario kombinasi TDS-kelembapan) seluruhnya menunjukkan status “Berhasil”, dengan waktu respons relay kurang dari 50 milidetik dan tidak ditemukan kegagalan switching maupun inkonsistensi tampilan data.

Pengujian Sistem Terintegrasi

Pengujian sistem terintegrasi dilaksanakan selama tiga hari berturut-turut di lokasi penelitian, dengan pengambilan data setiap 30 menit pukul 07.00–11.30 WIB, menghasilkan total 30 titik data. Ambang batas yang berlaku: pompa aktif apabila kelembapan $\leq 60\%$ dan TDS 800–950 ppm; notifikasi tds_low apabila TDS < 800 ppm; notifikasi tds_high apabila TDS > 950 ppm.

Tabel 4.

Rekapitulasi Hasil Pengujian Sistem Terintegrasi Tiga Hari

Parameter	Hari ke-1	Hari ke-2	Hari ke-3	Total
Data diambil (poin)	10	10	10	30
TDS dalam rentang normal	10/10	8/10	9/10	27/30 (90%)
Notifikasi tds_low	0	1	1	2
Notifikasi tds_high	0	1	0	1
Aktivasi pompa otomatis	2×	2×	2×	6×
Kelembapan pulih setelah pompa	2/2	2/2	2/2	6/6 (100%)
Notifikasi terkirim	2/2	4/4	3/3	9/9 (100%)

Pada hari ke-1, seluruh 10 data berada dalam rentang TDS normal dan pompa teraktivasi dua kali ketika kelembapan turun $\leq 60\%$. Pada hari ke-2 terjadi satu kondisi tds_low akibat pengenceran larutan dan satu kondisi tds_high akibat penyerapan air oleh tanaman; pada data ke-2 hari ke-2, pompa tidak diaktifkan meskipun kelembapan 71% karena TDS (761 ppm) berada di luar rentang aktivasi, membuktikan bahwa logika kontrol kondisi ganda bekerja sebagaimana dirancang. Pada hari ke-3 terjadi satu kondisi tds_low yang berhasil

dikoreksi pengguna berdasarkan notifikasi. Secara keseluruhan, pompa teraktivasi pada seluruh 6 kejadian kondisi terpenuhi (100%) tanpa satu pun aktivasi di luar kondisi yang dipersyaratkan, dan seluruh 9 notifikasi (2 tds_low, 1 tds_high, 6 soil_dry) berhasil diterima pengguna dengan latensi rata-rata 5–6 detik.

Pembahasan

Nilai TDS yang terbaca selama tiga hari pengujian berkisar antara 761–960 ppm, dengan 27 dari 30 titik data (90%) berada dalam rentang operasional 800–950 ppm. Penurunan TDS disebabkan oleh efek pengenceran larutan akibat akumulasi penyiraman, sedangkan kenaikan TDS disebabkan oleh penyerapan air oleh tanaman yang meningkatkan konsentrasi mineral relatif; kedua fenomena ini merupakan dinamika normal pada sistem hidroponik aktif yang mengonfirmasi relevansi fungsi pemantauan TDS real-time (Luckardi et al., 2025).

Kelembapan media tanam berfluktuasi pada rentang 54–78%. Seluruh enam kejadian penurunan kelembapan di bawah 60% berhasil direspons dengan aktivasi pompa otomatis, dan kelembapan pada seluruh kejadian tersebut pulih ke atas 60% pada data pengamatan berikutnya (6/6 atau 100%). Waktu respons pompa berkisar 3–6 detik dengan rata-rata 4,2 detik, di bawah batas toleransi 10 detik; variasi waktu respons disebabkan oleh penggunaan fungsi delay() pada firmware yang menyebabkan waktu respons bergantung pada posisi deteksi kondisi dalam siklus loop program.

Platform Blynk terbukti efektif sebagai media monitoring jarak jauh dengan latensi rata-rata 5–6 detik, sementara LCD 16×2 memberikan lapisan monitoring lokal yang konsisten dengan data pada Blynk tanpa bergantung pada koneksi internet. Kombinasi kedua media monitoring ini memberikan fleksibilitas pemantauan yang sejalan dengan temuan Ameran et al. (2024) mengenai manfaat monitoring ganda pada sistem hidroponik berbasis IoT. Dari sisi efisiensi, pompa hanya aktif pada kondisi ganda terpenuhi (6× selama tiga hari) tanpa aktivasi berlebih, dan total konsumsi daya sistem di bawah 15 watt sejalan dengan pertimbangan efisiensi daya rumah tangga yang dikemukakan Kadam et al. (2024); efisiensi volume air secara kuantitatif tidak diukur dalam penelitian ini akibat keterbatasan alat ukur di lapangan.

Dibandingkan dengan penelitian Tarigan et al. (2023) dan Rian Septian Anwar dan Nani Agustina (2024) yang bersifat monitoring system tanpa otomatisasi aktuator, serta penelitian Hadiyoso et al. (2024) yang menambahkan parameter pH namun diuji pada kondisi

laboratorium, sistem pada penelitian ini menunjukkan kontribusi berupa integrasi logika kontrol dua kondisi (TDS dan kelembapan) yang tervalidasi langsung pada instalasi rumah tangga nyata dengan dua tanaman uji sekaligus. Meskipun demikian, terdapat keterbatasan yang perlu diakui: penggunaan `delay()` pada firmware, rate limit pengiriman notifikasi pada akun Blynk gratis, rentang TDS 800–950 ppm yang merupakan rentang kompromi untuk dua tanaman uji, serta belum diukurnya volume air secara kuantitatif per siklus penyiraman.

Tabel 5.

Ringkasan Hasil Evaluasi Kinerja Sistem

Parameter Evaluasi	Target	Hasil Pengujian	Keterangan
Kestabilan TDS	Terpantau & anomali terdeteksi	90% data normal; 3 anomali terdeteksi	Tercapai
Kestabilan Kelembapan	Terpulihkan setelah aktivasi pompa	6/6 (100%) pulih >60%	Tercapai
Waktu Respons Pompa	≤10 detik	3–6 detik; rata-rata 4,2 detik	Tercapai
Notifikasi Real-time	Terkirim pada seluruh kondisi abnormal	9/9 (100%); latensi ±5 detik	Tercapai
Efisiensi Air	Pompa aktif hanya saat kondisi terpenuhi	Aktif 6× kondisional; tanpa aktivasi berlebih	Tercapai (kualitatif)

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Prototipe sistem IoT berbasis mikrokontroler ESP32 berhasil dirancang dan diimplementasikan pada instalasi hidroponik skala rumah tangga di Panongan, Kabupaten Tangerang, dengan mengintegrasikan sensor TDS, sensor soil moisture, modul relay, pompa air, dan LCD 16×2 I2C yang beroperasi secara stabil selama periode pengujian. Logika kontrol otomatisasi pompa berbasis rule-based decision dengan kondisi ganda (kelembapan ≤60% dan TDS 800–950 ppm) berhasil diimplementasikan dan teraktivasi secara otomatis pada seluruh 6 kejadian kondisi terpenuhi (100%) tanpa intervensi manual maupun aktivasi di luar kondisi yang dipersyaratkan.

Integrasi sistem dengan platform Blynk berhasil mendukung monitoring jarak jauh dan notifikasi real-time, dengan seluruh 9 notifikasi (`tds_low`, `tds_high`, dan `soil_dry`) diterima pengguna dengan latensi rata-rata 5–6 detik. Evaluasi kinerja menunjukkan kestabilan TDS tercapai pada 90% dari 30 titik data, kestabilan kelembapan tercapai penuh (100%), waktu respons pompa rata-rata 4,2 detik masih di bawah batas toleransi 10 detik, dan efisiensi penggunaan air tercapai secara kualitatif karena pompa hanya aktif pada kondisi yang

dipersyaratkan. Akurasi sensor TDS (rata-rata kesalahan 1,83%) dan sensor soil moisture (selisih maksimum 4%) dinilai memadai untuk aplikasi hidroponik rumah tangga.

Secara keseluruhan, sistem cerdas berbasis rule-based decision yang diimplementasikan dalam penelitian ini terbukti mampu menjalankan fungsi pemantauan dan otomatisasi hidroponik skala rumah tangga secara efektif, menjawab seluruh rumusan masalah dan tujuan penelitian yang ditetapkan. Pengembangan lanjutan disarankan pada penggantian mekanisme delay() dengan timer non-blocking berbasis millis() untuk mempercepat waktu respons, penerapan pembatasan notifikasi lokal untuk mengatasi rate limit Blynk, pengembangan ambang batas TDS yang dapat disesuaikan per jenis tanaman, penambahan sensor volume air untuk mengukur efisiensi irigasi secara kuantitatif, serta pengujian jangka panjang selama satu siklus panen penuh (25–35 hari) untuk mengukur dampak sistem terhadap hasil panen secara nyata.

REFERENSI

1. 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, 102401. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102401>
2. Ameran, M. F. H., Abdullah, R., & Ismail, N. (2024). Design and Implementation of an IoT Integrated Dual Sensors for Hydroponic Cultivation Root Growth Monitoring System. *IEEE Conference on Automatic Control and Intelligent Systems*. <https://doi.org/10.1109/I2CACIS61270.2024.10649842>
3. Awal, M. A., Pio, A. S., Mim, M. J., & Partha, P. K. (2025). A Smart IoT-based Hydroponics System for Small-Scale Household in Bangladesh. *Smart Agricultural Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101163>
4. Hadiyoso, S., Alfaruq, A., & Wijayanto, I. (2024). A Smart Aquaponics System: IoT-Driven Water Quality Control for Lettuce Cultivation. *IEEE International Conference on Smart Systems*. <https://doi.org/10.1109/ICICYTA64807.2024.10913414>
5. Herrera-Arroyo, R., & Martínez-Nolasco, J. (2025). Smart Hydroponic Cultivation System for Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Growth Under Different Nutrient Solution Concentrations in a Controlled Environment. *Applied System Innovation*, 8(4), 110. <https://doi.org/10.3390/asi8040110>
6. Kadam, S. A., Kadam, P. S., & Mohite, D. D. (2024). Design and Experimental Analysis of a Closed-Loop Autonomous Rotary Hydroponics System for Revolutionizing <https://journal.thamrin.ac.id/index.php/jtik/article/view/3724/3181>

-
- Fenugreek Yield and Enhancing Food Security. Discover Sustainability. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00339-7>
7. Laksana, R. P., Wahyu, S., & Hidayah, Q. H. (2025). Sistem Cerdas IoT untuk Pemantauan Cuaca Real-Time dan Prediksi Kondisi Lingkungan pada Aplikasi Jemuran Pakaian Otomatis. *JUKI : Jurnal Komputer Dan Informatika*, 7(2 SE-Articles), 259–271. <https://doi.org/10.53842/juki.v7i2.1996>
 8. Luckardi, S., Rafdhi, A. A., Sari, A. W., Zan-gana, H. M., & Soegoto, E. (2025). How to Improve Hydroponic Leafy Vegetable Plant Productivity by Balancing Nutrient Solution Total Dissolved Solids (TDS) and pH. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 6(1), 113–128. <https://doi.org/10.17509/ajse.v6i1.89992>
 9. Muslimah, Y., Harahap, E. J., Lizmah, S. F., Siregar, M. P. A., & Martunis. (2024). Nutrients and Growing Media Effect on Growth and Physiological Traits of Pak Choi Plants (*Brassica rapa* L.). *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 56(2), 652–659. <https://doi.org/10.54910/sabrao2024.56.2.17>
 10. Nizam, N. A. I. M., Chung, S. K., Yew, H. T., & Kiring, A. M. J. (2024). Enhancing Lettuce Production Quality Through IoT-Enabled Hydroponic Farming: An Optimized Fertilizer System Approach. In Springer. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1432-2_3
 11. Rian Septian Anwar, Nani Agustina, E. S. (2024). Internet of Things Smart Farming untuk Monitoring Tanaman Hidroponik. *Journal of Students' Research in Computer Science*, 4(1 SE-Articles), 11 – 22. <https://doi.org/10.31599/1p701960>
 12. Saha, G. (2021). Technological Influences on Monitoring and Automation of the Hydroponics System. *IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers*. <https://doi.org/10.1109/i-PACT52855.2021.9696519>
 13. Tarigan, F., Buaton, R., & Ramadani, S. (2023). IoT-based Hydroponic Plant Monitoring System. *Journal of Artificial Intelligence and Engineering Applications*, 3(1).
 14. Vought, K., Bayabil, H. K., Pompeo, J., Crawford, D., Zhang, Y., Correll, M., & Martin-Ryals, A. (2024). Dynamics of micro and macronutrients in a hydroponic nutrient film technique system under lettuce cultivation. *Heliyon*, 10(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32316>
 15. Wahyuningsih, M., Triani, N., & Tarigan, P. L. (2024). The Effect of AB Mix Nutrient Concentration and Liquid Organic Fertilizer on Growth and Yield of Pakcoy (*Brassica rapa* L.) in Hydroponic Wick System. *International Journal of Multidisciplinary Research and Literature*, 3(3), 292–299. <https://doi.org/10.53067/ijomral.v3i3.220>
-
- <https://journal.thamrin.ac.id/index.php/jtik/article/view/3724/3181>

-
16. Waworundeng, J. M. S., Suseno, N. C., & Manaha, R. R. Y. (2019). Automatic Watering System for Plants with IoT Monitoring and Notification. *CogITo Smart Journal*, 4(2 SE-Articles), 316–326. <https://doi.org/10.31154/cogito.v4i2.138.316-326>