

**MONITORING DAN KONTROL NUTRISI PADA HIDROPONIK BERBASIS
INTERNET OF THINGS (IOT) METODE FUZZY TSUKAMOTO****Filza Fivebrian Tariszaki ¹, Lilik Anifah ², Puput Winarti Rusimamto ³, Muhamad Syariffuddien Zuhrie ⁴****S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya ¹
Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231,
Indonesia ^{2,3,4}****Email: filzafivebrian.21003@mhs.unesa.ac.id, lilikanifah@unesa.ac.id,
puputwanarti@unesa.ac.id, zuhrie@unesa.ac.id****Abstract (English)**

*The Hydroponic cultivation requires proper nutrient solution management to maintain optimal plant growth conditions. Manual monitoring and control of solution parameters may cause delays in responding to changes in nutrient conditions. This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based hydroponic nutrient monitoring and control system using the Fuzzy Tsukamoto method for pakcoy (*Brassica rapa* L.). The system uses an ESP32 as the main controller integrated with pH, Total Dissolved Solids (TDS), DS18B20 temperature, and solution level sensors. Sensor data are transmitted in real time to the Blynk application, while the Fuzzy Tsukamoto method determines control actions for adding nutrient solution and pH balancing solution according to the solution condition. System testing was conducted for 10 days with a 6-hour data acquisition interval, with 40 test data used in the final performance analysis. The results showed that pH ranged from 6.28–6.82, TDS from 1308–1356 ppm, temperature from 27.6–28.7 °C, and solution level from 43–98%. Sensor accuracy was 97.9% for pH, 99.0% for TDS, 94.9% for temperature, and 94.4% for solution level. The control response analysis showed that all 40 control decisions were consistent with the Fuzzy Tsukamoto rules, resulting in 100% control decision accuracy, with false activation and missed control both at 0%. The developed system is therefore capable of automatically monitoring and controlling hydroponic solution conditions in real time.*

Article History

*Submitted: 8 Agustus 2026
Accepted: 11 Agustus 2026
Published: 12 Agustus 2026*

Key Words

Hydroponics, Internet of Things, Fuzzy Tsukamoto, Pakcoy, Nutrient Monitoring

Abstrak (Indonesia)

Budidaya hidroponik membutuhkan pengelolaan larutan nutrisi yang tepat agar kondisi pertumbuhan tanaman tetap optimal. Pemantauan dan pengendalian parameter larutan secara manual dapat menyebabkan keterlambatan dalam menangani perubahan kondisi nutrisi. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring dan kontrol nutrisi hidroponik berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto pada tanaman pakcoy (*Brassica rapa* L.). Sistem menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali yang terintegrasi dengan sensor pH, Total Dissolved Solids (TDS), suhu DS18B20, dan sensor level. Data sensor dikirimkan secara real-time ke aplikasi Blynk, sedangkan Fuzzy Tsukamoto digunakan untuk menentukan tindakan kontrol penambahan larutan nutrisi dan larutan penyeimbang pH berdasarkan kondisi larutan. Pengujian sistem dilakukan selama 10 hari dengan interval pengambilan data 6 jam dan menghasilkan 40 data pengujian pada analisis performansi. Hasil pengujian menunjukkan nilai pH berada pada rentang 6,28–6,82, TDS 1308–1356 ppm, suhu 27,6–28,7 °C, dan level larutan 43–98%. Pengujian akurasi menunjukkan sensor pH memiliki akurasi 97,9%, TDS 99,0%, suhu 94,9%, dan level 94,4%. Analisis respon kontrol menunjukkan seluruh 40 keputusan kontrol sesuai dengan rule Fuzzy Tsukamoto dengan akurasi keputusan 100%, serta false activation dan missed control masing-masing 0%. Sistem mampu melakukan monitoring dan pengendalian kondisi larutan hidroponik secara otomatis dan real-time.

Sejarah Artikel

*Submitted: 8 Agustus 2026
Accepted: 11 Agustus 2026
Published: 12 Agustus 2026*

Kata Kunci

Hidroponik, Internet of Things, Fuzzy Tsukamoto, Pakcoy, Monitoring Nutrisi

PENDAHULUAN

Pertanian modern terus berkembang untuk menjawab keterbatasan lahan dan kebutuhan produksi yang stabil. Hidroponik menjadi salah satu metode budidaya yang banyak diterapkan karena menggunakan larutan nutrisi sebagai sumber kebutuhan tanaman dan dapat dilakukan pada lahan terbatas. Pada sistem hidroponik, kondisi larutan perlu dipantau secara berkala karena perubahan pH, konsentrasi nutrisi, suhu, dan volume larutan dapat memengaruhi kondisi pertumbuhan tanaman. Parameter Total Dissolved Solids (TDS) dapat digunakan untuk memantau konsentrasi zat terlarut pada larutan hidroponik dan menjadi salah satu parameter dalam pengendalian pemberian nutrisi (Hidayatullah et al., 2022). Pemanfaatan Internet of Things (IoT) memungkinkan parameter tersebut dipantau secara real-time sehingga informasi kondisi sistem dapat diperoleh dengan cepat (Abu Sneineh & Shabaneh, 2023). Penerapan IoT pada sistem hidroponik juga dapat digunakan untuk melakukan monitoring dan pengendalian parameter seperti pH, nutrisi, dan suhu melalui perangkat yang dapat dipantau dari jarak jauh (Untoro & Hidayah, 2022).

Tanaman pakcoy (*Brassica rapa* L.) merupakan salah satu tanaman sayuran yang sesuai dibudidayakan secara hidroponik. Penelitian pada tanaman pakcoy menunjukkan bahwa pH dan konsentrasi nutrisi merupakan parameter penting dalam mendukung pertumbuhan. Pada penelitian ini, kebutuhan nutrisi digunakan sebagai dasar pengaturan sistem, dengan konsentrasi sekitar 1300 ppm sebagai kondisi optimal pada objek penelitian (Reno et al., 2023). Pengelolaan larutan nutrisi yang tidak sesuai dapat menyebabkan konsentrasi terlalu rendah atau terlalu tinggi sehingga berpotensi menghambat pertumbuhan tanaman.

Pemantauan dan penambahan nutrisi yang masih dilakukan secara manual memiliki keterbatasan karena operator harus melakukan pengukuran dan menentukan tindakan korektif secara berulang. Pendekatan kontrol berbasis ambang batas dapat digunakan, tetapi perubahan nilai sensor yang bersifat bertahap dapat menghasilkan kondisi yang tidak selalu sesuai jika hanya menggunakan batas diskrit. Logika fuzzy dapat digunakan untuk menangani ketidakpastian dan variasi data melalui variabel linguistik serta aturan IF-THEN (Tang & Ahmad, 2024). Pengendalian nutrisi secara otomatis menjadi salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk menjaga kondisi larutan tetap sesuai kebutuhan tanaman. Melalui kajian mengenai sistem automated nutrient dosing menunjukkan bahwa parameter pH dan electrical conductivity (EC) merupakan parameter penting dalam kerangka pengaturan dosis nutrisi hidroponik (Sulaiman et al., 2025).

Beberapa penelitian telah menerapkan IoT dan fuzzy pada hidroponik. Pada penelitian Ashari dan Mujianto menggunakan fuzzy Mamdani untuk pengendalian pH dan nutrisi dengan monitoring melalui Blynk (Ashari & Mujianto, 2025). Selanjutnya penelitian dari Sholihah menerapkan fuzzy logic untuk pengendalian TDS pada sistem Deep Flow Technique berbasis IoT (Sholihah et al., 2021). Selanjutnya pada penelitian Maya Olalla menggunakan fuzzy control untuk mengatur irigasi tanaman hidroponik di greenhouse (Maya Olalla et al., 2023). Selanjutnya dari penelitian Putra mengintegrasikan logika fuzzy untuk mengontrol pH, nutrisi, dan kelembapan (Putra et al., 2025). Terakhir dari penelitian Fahlefie dan Damayanti menggunakan regresi kuadratik untuk menentukan kebutuhan larutan nutrisi (Fahlefie & Damayanti, 2025).

Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa otomatisasi dan IoT dapat digunakan untuk meningkatkan pemantauan serta pengendalian hidroponik. Namun, pendekatan pada penelitian terdahulu memiliki perbedaan pada metode inferensi, parameter, dan mekanisme kontrol. Penelitian ini berfokus pada penerapan Fuzzy Tsukamoto untuk menentukan tindakan kontrol berdasarkan kondisi pH dan TDS, sementara suhu dan level digunakan sebagai parameter monitoring dan pengendalian pendukung.

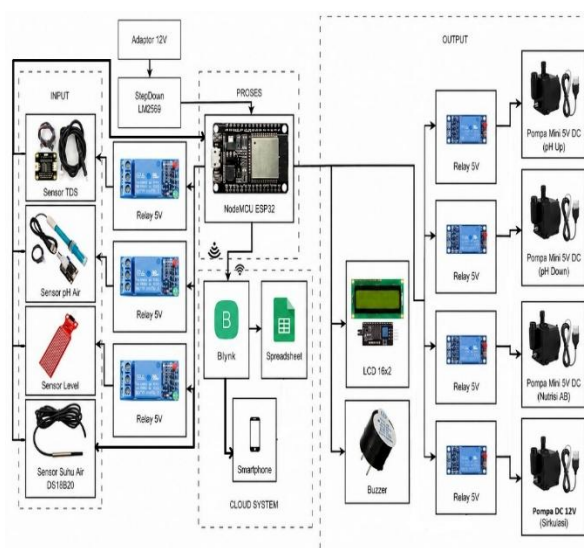
Fuzzy Tsukamoto dipilih karena setiap aturan menghasilkan keluaran tegas melalui konsekuensi dengan fungsi keanggotaan monoton. Proses pengambilan keputusan dilakukan

melalui fuzzifikasi, pembentukan rule base, inferensi menggunakan operator MIN, dan defuzzifikasi untuk memperoleh keluaran tegas. Pendekatan ini sesuai untuk sistem kontrol yang membutuhkan keputusan otomatis berdasarkan kondisi masukan yang berubah secara bertahap.

◆ Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem monitoring dan kontrol nutrisi hidroponik berbasis IoT menggunakan ESP32 dan aplikasi Blynk dengan metode Fuzzy Tsukamoto. Sistem dirancang untuk membaca pH, TDS, suhu DS18B20, dan level larutan secara real-time, kemudian menggunakan kondisi pH dan TDS sebagai dasar pengambilan keputusan penambahan nutrisi serta koreksi pH. Penelitian ini juga mengevaluasi akurasi sensor terhadap alat ukur konvensional dan menganalisis kesesuaian keputusan kontrol terhadap rule fuzzy.

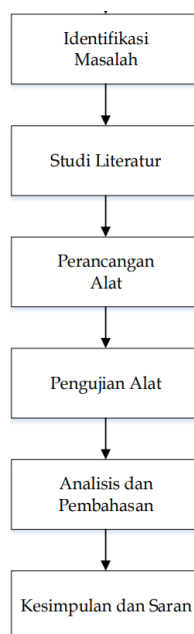
METODE PENELITIAN

Penelitian Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen. Tahapan penelitian meliputi identifikasi masalah, studi literatur, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, integrasi sistem, kalibrasi sensor, pengujian komponen, pengujian konektivitas IoT, pengujian sistem keseluruhan, serta analisis performansi. Sistem menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali, sensor pH-E4502C, sensor TDS, sensor suhu DS18B20, sensor level, relay, pompa, LCD 16×2, Blynk, dan Google Spreadsheet sebagai media pencatatan data.



Gambar 1. Diagram blok system monitoring dan kontrol hidroponik

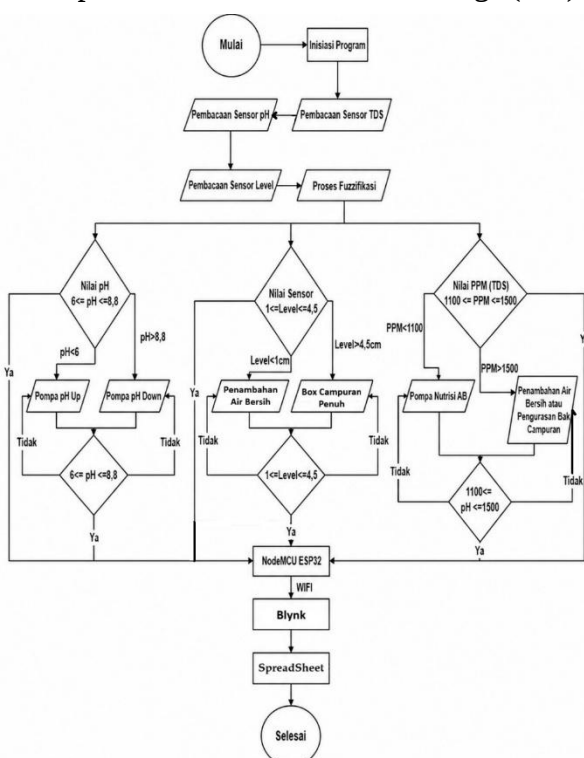
Pada Gambar 1, sensor pH, TDS, level, dan suhu memberikan data masukan ke ESP32. ESP32 melakukan pengolahan data dan menjalankan logika Fuzzy Tsukamoto untuk menentukan tindakan kontrol. Data hasil pembacaan dikirimkan ke Blynk untuk monitoring real-time dan dicatat pada Google Spreadsheet. Aktuator terdiri atas pompa nutrisi AB, pompa pH Up, pompa pH Down, dan pompa sirkulasi.



Gambar 2. menunjukkan alur penelitian yang dimulai dari tahap identifikasi masalah sampai dengan kesimpulan dan saran.

Flowchart Sistem

Flowchart sistem menggambarkan alur kerja sistem monitoring dan kontrol nutrisi hidroponik berbasis Internet of Things (IoT), seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



$$Z = \frac{\sum a_i z_i}{a_i} \quad (1)$$

Gambar 3. Flowchart Sistem

Proses diawali dengan inisialisasi ESP32, sensor, aktuator, dan koneksi internet. Selanjutnya, sistem melakukan pembacaan data dari sensor pH, TDS, suhu, dan level secara

real-time. Data pH, TDS, dan level digunakan sebagai masukan pada proses pengambilan keputusan menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto, sedangkan data suhu digunakan sebagai parameter monitoring kondisi larutan nutrisi.

Berdasarkan hasil inferensi Fuzzy Tsukamoto, sistem menentukan aksi pengendalian terhadap pompa nutrisi AB Mix, pompa pH Up, pompa pH Down, atau pompa air bersih sesuai kondisi larutan. Seluruh data hasil pembacaan sensor beserta status aktuator kemudian dikirim ke aplikasi Blynk untuk pemantauan secara real-time dan disimpan pada Google Spreadsheet sebagai data logging. Setelah proses selesai, sistem akan mengulangi siklus monitoring dan pengendalian secara berkala.

Metode Fuzzy Tsukamoto

Metode Fuzzy Tsukamoto digunakan sebagai metode pengambilan keputusan dalam sistem monitoring dan kontrol nutrisi hidroponik. Metode ini dipilih karena mampu menangani ketidakpastian data sensor melalui aturan (rule base) berbentuk IF-THEN, sehingga menghasilkan keputusan yang lebih adaptif dibandingkan metode berbasis nilai ambang (threshold). Pada penelitian ini, parameter pH dan TDS digunakan sebagai variabel masukan, sedangkan keluaran sistem berupa aksi pengendalian terhadap pompa nutrisi AB Mix, pompa pH Up, pompa pH Down, dan pompa air bersih sesuai kondisi larutan nutrisi.

Proses inferensi Fuzzy Tsukamoto terdiri atas empat tahapan, yaitu fuzzifikasi, pembentukan basis aturan (rule base), inferensi, dan defuzzifikasi. Pada tahap fuzzifikasi, nilai pH dan TDS diubah menjadi derajat keanggotaan menggunakan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Selanjutnya, setiap aturan dievaluasi menggunakan operator MIN untuk memperoleh nilai α -predikat. Tahap akhir adalah defuzzifikasi yang menghasilkan nilai keluaran (crisp) menggunakan metode rata-rata terbobot (weighted average) sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1) (Muqsih Hidayat et al., 2024).

Keterangan:

Z = nilai *output* yang dihasilkan.

α_{pred} = nilai α -predikat tiap-tiap *rule*

$z_1...z_n$ = hasil inferensi secara tegas (*crisp*)
masing-masing *rule*.

Fungsi keanggotaan pada variabel masukan menggunakan kombinasi kurva bahu dan kurva segitiga, sedangkan variabel keluaran menggunakan kurva bahu. Seluruh aturan (rule base) dirancang berdasarkan kondisi ideal pertumbuhan tanaman pakcoy sehingga sistem dapat menentukan tindakan pengendalian secara otomatis berdasarkan hasil pembacaan sensor.

Implementasi Fuzzy Tsukamoto

Pada implementasi akhir, pH digunakan dengan kondisi asam, normal, dan basa. Kondisi normal berada pada rentang sekitar 6,0–7,0; nilai di bawah rentang tersebut dikategorikan asam dan nilai di atas rentang tersebut dikategorikan basa. TDS menggunakan kondisi rendah, normal, dan tinggi, dengan rentang normal 1100–1500 ppm. Rule base dibentuk dari kombinasi kondisi pH dan TDS. Ketika kondisi pH dan TDS berada pada kondisi normal, sistem tidak mengaktifkan pompa koreksi nutrisi atau pH. Ketika salah satu parameter berada di luar kondisi normal, sistem memberikan tindakan sesuai aturan.

Tabel 1. Ringkasan kondisi masukan Fuzzy Tsukamoto

Parameter	Kondisi	Rentang utama
pH	Asam	< 6,0
pH	Normal	6,0–7,0
pH	Basa	> 7,0
TDS	Rendah	< 1100 ppm
TDS	Normal	1100–1500 ppm
TDS	Tinggi	> 1500 ppm

Fuzzifikasi mengubah nilai sensor menjadi derajat keanggotaan antara 0 dan 1. Pada tahap inferensi, setiap aturan IF–THEN menghasilkan nilai α -predikat menggunakan operator MIN. Nilai keluaran setiap aturan kemudian digunakan pada proses defuzzifikasi. Nilai keluaran tegas dihitung menggunakan rata-rata terbobot:

$$Z = \frac{\sum a_i z_i}{a_i} \quad (2)$$

Keterangan:

Z = nilai *output* yang dihasilkan. α_{pred} = nilai α -predikat tiap-tiap *rule*

$z_i \dots z_n$ = hasil inferensi secara tegas (*crisp*)
masing-masing *rule*.

Pengujian dan Analisis Data

Pengujian sensor dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap alat ukur konvensional. Error dihitung berdasarkan selisih absolut antara sensor dan alat ukur terhadap nilai referensi. Akurasi dihitung dari 100% dikurangi persentase error.

$$Error(\%) = \frac{|X_s - X_r|}{X_r} \times 100\% \quad (3)$$

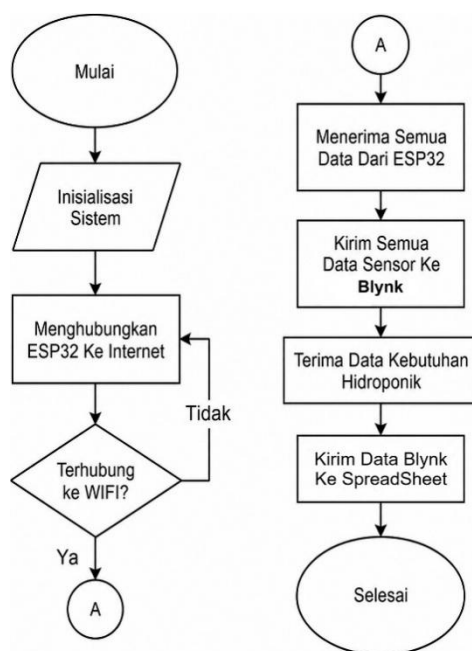
$$Akurasi(\%) = 100\% - Error(\%) \quad (4)$$

Selain akurasi, digunakan Mean Squared Error (MSE) untuk mengetahui rata-rata kuadrat selisih antara sensor dan alat ukur:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{s_i} - X_{r_i})^2 \quad (5)$$

$$e_{ss}(\%) = \frac{|R - Y_{ss}|}{R} \times 100\% \quad (6)$$

Pengujian sistem keseluruhan dilakukan selama 10 hari. Data dicatat secara berkala dan digunakan untuk menilai kestabilan parameter serta respon aktuator terhadap hasil inferensi Fuzzy Tsukamoto. Analisis respon kontrol menggunakan kesesuaian keputusan dengan rule base, false activation, dan missed control.



Gambar 4. Alur kerja sistem monitoring dan kontrol

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Sistem

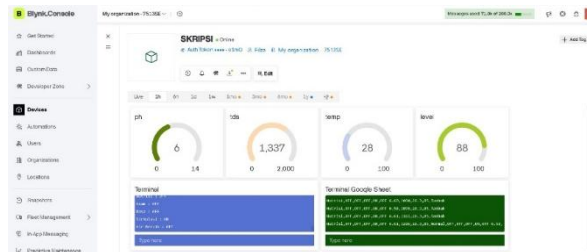
Sistem monitoring dan kontrol nutrisi hidroponik berbasis Internet of Things (IoT) berhasil diimplementasikan sesuai dengan perancangan yang telah dilakukan. Sistem terdiri atas mikrokontroler ESP32, sensor pH, sensor TDS, sensor suhu DS18B20, sensor level, modul relay, pompa nutrisi AB Mix, pompa pH Up, pompa pH Down, pompa air bersih, dan pompa sirkulasi yang terintegrasi dalam satu sistem. Implementasi prototipe sistem ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 5. Prototipe sistem monitoring dan kontrol nutrisi hidroponik berbasis Internet of Things (IoT)

Sistem mampu melakukan pembacaan nilai pH, TDS, suhu, dan level larutan secara real-time. Data sensor diproses menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto untuk menentukan aksi pengendalian terhadap pompa nutrisi dan pompa koreksi pH sesuai kondisi larutan. Seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak telah terintegrasi sehingga sistem dapat menjalankan proses monitoring dan kontrol secara otomatis.

Dashboard Blynk digunakan sebagai antarmuka (user interface) untuk memantau kondisi sistem secara real-time, seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Dashboard menampilkan nilai pH, TDS, suhu, level larutan, serta status aktuator sehingga pengguna dapat memantau kondisi hidroponik dari jarak jauh melalui jaringan internet. Selain itu, terminal pada dashboard menampilkan informasi mengenai proses pengendalian yang dilakukan berdasarkan hasil inferensi metode Fuzzy Tsukamoto.



Gambar 6. Dashboard monitoring sistem pada platform Blynk

Selain ditampilkan pada dashboard Blynk, seluruh data hasil pembacaan sensor dan status aktuator disimpan secara otomatis pada Google Spreadsheet sebagai media data logging, seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Data yang tersimpan meliputi waktu pengukuran, nilai pH, TDS, suhu, level larutan, status hasil inferensi fuzzy, serta kondisi setiap pompa. Pencatatan data secara otomatis memudahkan proses dokumentasi, analisis performa sistem, dan evaluasi hasil pengujian.

	Waktu	pH	TDS (ppm)	Suhu (°C)	Level Air (%)	Status Fuzzy	Pompa 1 (ON/OFF)	Pompa 2 (ON/OFF)	Pompa 3 (ON/OFF)	Pompa 4 (ON/OFF)	Pompa 5 (ON/OFF)	Pompa 6 (ON/OFF)
1	2024-01-13 20:20:19	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
2	2024-01-13 20:20:21	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
3	2024-01-13 20:20:23	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
4	2024-01-13 20:20:25	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
5	2024-01-13 20:20:27	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
6	2024-01-13 20:20:29	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
7	2024-01-13 20:20:31	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
8	2024-01-13 20:20:33	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
9	2024-01-13 20:20:35	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
10	2024-01-13 20:20:37	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
11	2024-01-13 20:20:39	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
12	2024-01-13 20:20:41	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
13	2024-01-13 20:20:43	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
14	2024-01-13 20:20:45	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
15	2024-01-13 20:20:47	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
16	2024-01-13 20:20:49	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
17	2024-01-13 20:20:51	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
18	2024-01-13 20:20:53	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
19	2024-01-13 20:20:55	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
20	2024-01-13 20:20:57	6.14	1337	28.2	88	Normal	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF

Gambar 7. Data logging hasil monitoring pada Google Spreadsheet

Implementasi tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu menjalankan fungsi monitoring, pengendalian otomatis, dan pencatatan data secara terintegrasi. Data hasil pembacaan sensor dapat dipantau melalui aplikasi Blynk maupun diakses kembali melalui Google Spreadsheet sebagai bahan analisis performa sistem.

Hasil Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi pembacaan sensor pH, TDS, suhu, dan level dengan membandingkan hasil pengukuran sensor terhadap alat ukur standar. Parameter evaluasi yang digunakan meliputi nilai error, akurasi, dan Mean Square Error (MSE). Hasil pengujian digunakan untuk mengetahui tingkat keandalan sensor sebelum sistem diterapkan pada proses monitoring dan kontrol nutrisi hidroponik.

Pengujian Sensor pH

Pengujian sensor pH dilakukan untuk mengetahui tingkat ketelitian sensor dalam mengukur tingkat keasaman larutan hidroponik. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan membandingkan hasil pembacaan sensor pH terhadap pH meter sebagai alat ukur pembanding.

Selisih hasil pengukuran digunakan untuk menghitung nilai error dan Mean Square Error (MSE).

Tabel 2. Pengujian Sensor pH

Pengujian ke-	Pengukuran Sensor pH			Nilai Error (%)	Error ² (pH ²)
	Alat Ukur	Sensor	Selisih		
1	6.81	6.97	0.16	2.35%	0.0256
2	6.81	6.82	0.01	0.15%	0.0001
3	6.82	6.93	0.11	1.61%	0.0121
4	6.81	6.88	0.07	1.03%	0.0049
5	6.82	6.66	0.16	2.53%	0.0256
6	6.81	6.84	0.03	0.44%	0.0009
7	6.82	7.00	0.18	2.64%	0.0324
8	6.82	6.94	0.12	1.76%	0.0144
9	6.82	6.78	0.04	0.59%	0.0016
10	6.81	6.80	0.01	0.15%	0.0001
Jumlah			0.89	13.08%	0.1177
Rata-rata error				1.31%	
MSE					0.01177 pH ²

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor pH memiliki selisih pembacaan sebesar 0,01–0,18 pH, dengan rata-rata error 1,31%, akurasi 98,69%, dan MSE 0,01177 pH². Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor pH memiliki ketelitian yang baik dan mampu memberikan pembacaan yang mendekati alat ukur pembanding, sehingga layak digunakan sebagai masukan dalam sistem monitoring dan pengendalian nutrisi hidroponik menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto.

Pengujian Sensor TDS

Pengujian sensor TDS dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mengukur konsentrasi nutrisi pada larutan hidroponik. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor TDS terhadap alat ukur TDS sebagai pembanding. Hasil pengukuran kemudian digunakan untuk menentukan nilai error, akurasi, dan Mean Square Error (MSE).

Tabel 3. Pengujian Sensor TDS

Pengujian ke-	Pengukuran Sensor TDS			Nilai Error (%)	Error ² (ppm ²)
	Alat Ukur	Sensor	Selisih		
1	1338	1341	3	0.2242%	9
2	1338	1341	3	0.2242%	9
3	1341	1344	3	0.2237%	9
4	1341	1344	3	0.2237%	9
5	1343	1344	1	0.0745%	1
6	1343	1344	1	0.0745%	1
7	1341	1344	3	0.2237%	9
8	1338	1343	5	0.3737%	25
9	1341	1343	2	0.1491%	4
10	1338	1342	4	0.2989%	16

Pengujian ke-	Pengukuran Sensor TDS			Nilai Error (%)	Error ² (ppm ²)
	Alat Ukur	Sensor	Selisih		
Jumlah			28	2.0902%	92
Rata-rata Error				0.2090%	
MSE					9.2 ppm ²

Berdasarkan hasil pengujian, sensor TDS memiliki rata-rata error sebesar 0,2090% dengan tingkat akurasi 99,791% dan nilai MSE sebesar 9,2 ppm². Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor TDS memiliki tingkat ketelitian yang baik dengan penyimpangan pembacaan yang relatif kecil terhadap alat ukur pembanding, sehingga layak digunakan sebagai masukan dalam sistem monitoring dan pengendalian nutrisi hidroponik menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto.

Pengujian Sensor Level

Pengujian sensor level dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mengukur ketinggian larutan pada box campuran. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap penggaris sebagai alat ukur pembanding. Hasil pengukuran digunakan untuk menentukan nilai error dan Mean Square Error (MSE).

Tabel 4. Pengujian Sensor Level

Pengujian ke-	Pengukuran Sensor Level			Nilai Error (%)	Error ² (Level ²)
	Alat Ukur (%)	Sensor (%)	Selisih		
1	60	57	3	5.0000%	9
2	60	54	6	10.0000%	36
3	60	54	6	10.0000%	36
4	60	59	1	1.6667%	1
5	60	63	3	5.0000%	9
6	60	56	4	6.6667%	16
7	60	57	3	5.0000%	9
8	60	58	2	3.3333%	4
9	60	61	1	1.6667%	1
10	60	57	3	5.0000%	9
Jumlah			32	53.3334%	130
Rata-rata Error				5.3333%	
MSE					13 Level ²

Berdasarkan hasil pengujian, sensor level memiliki rata-rata error sebesar 5,3333% dan nilai MSE sebesar 13 Level², dengan tingkat akurasi sebesar 94,6667%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor level mampu memberikan pembacaan ketinggian larutan dengan tingkat ketelitian yang cukup baik dan dapat digunakan sebagai masukan untuk monitoring serta pengendalian level box campuran pada sistem hidroponik.

Pengujian Sensor Suhu

Pengujian sensor suhu dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mengukur suhu larutan hidroponik. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap termometer digital yang ditempatkan pada media air yang sama. Hasil pengukuran digunakan untuk menentukan nilai *error* dan *Mean Square Error* (MSE).

Tabel 5. Pengujian Sensor Suhu

Pengujian ke-	Pengukuran Sensor Suhu			Nilai Error (%)	Error ² (°C ²)
	Alat Ukur (°C)	Sensor (°C)	Selisih (°C)		
1	30.6	28.5	2.1	6.8627%	4.41
2	30.6	28.4	2.2	7.1895%	4.84
3	30.6	28.5	2.1	6.8627%	4.41
4	30.6	28.5	2.1	6.8627%	4.41
5	30.6	28.5	2.1	6.8627%	4.41
6	30.6	28.5	2.1	6.8627%	4.41
7	30.6	28.5	2.1	6.8627%	4.41
8	30.6	28.5	2.1	6.8627%	4.41
9	30.6	28.5	2.1	6.8627%	4.41
10	30.6	28.5	2.1	6.8627%	4.41
Jumlah			21.1	68.9541%	44,53
Rata-rata error				6.8954%	
MSE					4.453°C ²

Berdasarkan hasil pengujian, sensor suhu memiliki selisih pembacaan sebesar 2,1–2,2 °C, dengan rata-rata error 6,8954%, akurasi 93,1046%, dan MSE 4,453 °C². Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor suhu memiliki tingkat ketelitian yang cukup baik dan dapat digunakan sebagai parameter pendukung dalam monitoring kondisi larutan hidroponik.

Pengujian Prototype

Pengujian prototype dilakukan selama 10 hari dengan pengambilan data setiap 6 jam, yaitu pada pukul 00.00, 06.00, 12.00, dan 18.00, sehingga diperoleh 40 kali pengamatan. Parameter yang diamati meliputi pH, TDS, suhu, dan level larutan. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kestabilan pembacaan sensor serta respons sistem terhadap kondisi larutan selama proses monitoring dan kontrol.

Tabel 6. Ringkasan hasil pengujian prototype selama 10 hari

Parameter	Nilai Minimum	Nilai Maksimum	Rata-rata
pH	6,28	6,82	6,59
TDS (ppm)	1.308	1.356	1.334,5
Suhu (°C)	27,6	28,7	28,24
Level (%)	43	98	77,9

Berdasarkan Tabel 6, nilai pH selama pengujian berada pada rentang 6,28–6,82 dengan rata-rata 6,59, sedangkan nilai TDS berada pada rentang 1.308–1.356 ppm dengan rata-rata 1.334,5 ppm. Suhu larutan berada pada rentang 27,6–28,7 °C dengan rata-rata 28,24 °C, sedangkan level larutan berada pada rentang 43–98% dengan rata-rata 77,9%. Hasil tersebut

menunjukkan bahwa prototype mampu melakukan pemantauan parameter secara real-time selama 10 hari dengan kondisi parameter yang relatif stabil.

Tabel 7. kontrol menggunakan metode fuzzy tsukamoto

Aktuator	Kondisi	Fungsi
Pompa Nutrisi AB	ON/OFF	Mengatur konsentrasi nutrisi
Pompa pH Up	ON/OFF	Menaikkan nilai pH
Pompa pH Down	ON/OFF	Menurunkan nilai pH
Pompa Air Bersih	ON/OFF	Mengatur volume/pengenceran larutan
Pompa Sirkulasi	ON/OFF	Mensirkulasikan larutan

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 7, metode Fuzzy Tsukamoto digunakan untuk menentukan tindakan kontrol berdasarkan kondisi pH dan TDS yang terukur. Hasil keputusan fuzzy selanjutnya diterapkan pada aktuator sehingga proses penambahan nutrisi maupun koreksi pH dapat dilakukan secara otomatis sesuai kondisi larutan. Dengan demikian, pengujian prototype tidak hanya menunjukkan kemampuan sistem dalam melakukan monitoring, tetapi juga menunjukkan penerapan hasil inferensi Fuzzy Tsukamoto dalam proses pengendalian hidroponik.

Analisis Performansi Sistem

Analisis Akurasi

Pengujian dilakukan berdasarkan hasil pengukuran parameter pH, TDS, dan suhu selama 10 hari, kemudian nilai rata-rata pembacaan sensor dibandingkan dengan rata-rata hasil pengukuran menggunakan alat ukur. Tingkat akurasi ditentukan berdasarkan nilai error yang diperoleh dari selisih antara hasil pembacaan sensor dan alat ukur terhadap nilai alat ukur referensi. Hasil analisis ini digunakan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam memberikan hasil pengukuran yang mendekati nilai sebenarnya serta mengevaluasi kinerja sensor yang digunakan pada sistem monitoring hidroponik.

Tabel 8. Akurasi tiap masing-masing Sensor

Parameter	Rata-rata sensor	Rata-rata alat ukur	Selisih	Error (%)	Akurasi (%)
pH	6,597	6,464	0,133	2,06	97,9
TDS (ppm)	1334,5	1321,7	12,8	0,97	99,0
Suhu (°C)	28,24	29,74	1,50	5,05	94,9
Level (%)	77,9	73,8	4,1	5,56	94,4

Berdasarkan Tabel 8, hasil analisis akurasi menunjukkan bahwa sensor TDS memiliki akurasi tertinggi sebesar 99,0% dengan error 0,97%, diikuti sensor pH sebesar 97,9% dengan error 2,06%. Sementara itu, sensor suhu memiliki akurasi sebesar 94,9% dengan error 5,05%, dan sensor level memiliki akurasi sebesar 94,4% dengan error 5,56%. Secara keseluruhan, seluruh sensor memiliki akurasi di atas 90%, sehingga mampu menghasilkan pembacaan yang cukup mendekati alat ukur pembanding.

Analisis Nilai MSE

Mean Squared Error (MSE) digunakan untuk mengukur rata-rata kuadrat selisih antara hasil pembacaan sensor dengan alat ukur konvensional. Nilai MSE yang semakin kecil

menunjukkan bahwa hasil pembacaan sensor semakin mendekati nilai referensi, sehingga tingkat presisi sensor semakin baik. Sebaliknya, nilai MSE yang besar menunjukkan adanya penyimpangan hasil pengukuran yang lebih tinggi.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Sensor_i - Alat_i)^2 \quad (8)$$

Keterangan:

- MSE = *Mean Squared Error*, yaitu nilai rata-rata kuadrat dari selisih antara hasil pembacaan sensor dan alat ukur konvensional.
- n = Jumlah data pengujian.
- i = Indeks data pengujian ke-, dengan .
- $Sensor_i$ = Nilai hasil pembacaan sensor pada pengujian ke-.
- $Alat_i$ = Nilai hasil pengukuran alat ukur konvensional pada pengujian ke-.
- $(Sensor_i - Alat_i)^2$ = Kuadrat selisih antara nilai sensor dan nilai alat ukur konvensional pada pengujian ke-.

Tabel 9. Nilai Mean Squared Error (MSE) Hasil Pengujian Sensor

Sensor	MSE	Satuan
pH	0,3448	pH ²
TDS	189,4	ppm ²
Suhu	2,462	°C ²
Level	62,5	% ²

Berdasarkan hasil analisis yang ditunjukkan pada Tabel 9, nilai MSE sensor pH sebesar 0,3448 pH², TDS sebesar 189,4 ppm², suhu sebesar 2,462 °C², dan level sebesar 62,5 %². Nilai MSE dievaluasi pada masing-masing sensor karena memiliki satuan pengukuran yang berbeda. Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh sensor memiliki penyimpangan yang masih dapat diterima dan mampu memberikan pembacaan yang cukup konsisten untuk digunakan sebagai masukan pada sistem monitoring dan kontrol hidroponik berbasis Fuzzy Tsukamoto.

Analisis Respon Kontrol Fuzzy Tsukamoto

Tabel 10. Hasil Analisis Respon Kontrol Metode Fuzzy Tsukamoto

No.	Parameter Performansi	Hasil
1	Lama pengujian	10 hari
2	Interval pengambilan data	6 jam
3	Jumlah data pengujian	40 data
4	Keputusan kontrol sesuai rule fuzzy	40 data
5	Keputusan kontrol tidak sesuai rule fuzzy	0 data
6	Akurasi keputusan kontrol	100%
7	False activation	0%
8	Missed control	0%
9	Rentang nilai pH	6,28 – 6,82
10	Rentang nilai TDS	1308 – 1356 ppm

Berdasarkan Tabel 10, pengujian selama 10 hari dengan 40 data menunjukkan bahwa seluruh keputusan kontrol Fuzzy Tsukamoto sesuai dengan rule base, sehingga diperoleh akurasi keputusan 100%, false activation 0%, dan missed control 0%. Selama pengujian, nilai pH berada pada rentang 6,28–6,82 dan TDS 1.308–1.356 ppm, sehingga sistem berada pada kondisi normal dan tidak mengaktifkan pompa Nutrisi AB, pH Up, maupun pH Down. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode Fuzzy Tsukamoto mampu menghasilkan keputusan kontrol yang konsisten sesuai kondisi larutan.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring dan kontrol nutrisi hidroponik berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Sistem monitoring dan kontrol pH, TDS, suhu, dan level air berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan Blynk dan Fuzzy Tsukamoto berhasil dirancang dan diimplementasikan. Pengujian selama 10 hari menunjukkan sistem mampu melakukan monitoring secara real-time dan mengendalikan penambahan nutrisi serta larutan pH secara otomatis sesuai kondisi larutan. Nilai pH berada pada rentang 6,28–6,82, TDS 1308–1356 ppm, suhu 27,6–28,7°C, dan level 43–98%, dengan status fuzzy berada pada kondisi Normal.
2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor pH, TDS, suhu, dan level memiliki tingkat akurasi yang baik dibandingkan dengan alat ukur konvensional. Sensor pH memiliki akurasi sebesar 97,9%, sensor TDS sebesar 99,0%, sensor suhu sebesar 94,9%, dan sensor level sebesar 94,4%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh sensor mampu menghasilkan pembacaan yang mendekati nilai alat ukur konvensional dengan tingkat error yang relatif kecil.

Saran

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring dan kontrol nutrisi hidroponik berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto, maka beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Sistem dapat dikembangkan dengan menambahkan parameter lingkungan, seperti kelembapan udara, intensitas cahaya, serta Electrical Conductivity (EC), sehingga proses monitoring dan pengendalian kondisi hidroponik menjadi lebih lengkap dan mampu menyesuaikan kebutuhan tanaman secara lebih optimal.
2. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan kalibrasi sensor secara berkala, menggunakan sensor dengan tingkat presisi yang lebih tinggi, serta menguji sistem dalam periode yang lebih panjang agar kestabilan pembacaan sensor dan keandalan metode Fuzzy Tsukamoto dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.
3. Sistem dapat diimplementasikan pada berbagai jenis tanaman hidroponik dengan kebutuhan nutrisi yang berbeda, serta dibandingkan dengan metode kontrol cerdas lainnya, seperti Fuzzy Mamdani, Fuzzy Sugeno, PID, atau Machine Learning, sehingga dapat diketahui metode yang memberikan performa pengendalian terbaik.

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. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102401>
- Ashari, K., & Mujiyanto, A. H. (2025). Implementasi IoT dan Fuzzy Mamdani Untuk Pengendalian PH dan Nutrisi Dalam Pertanian Hidroponik Berbasis Sistem Otomatis. *Jurnal Sains Student Research*, 3(5), 306–317. <https://doi.org/https://doi.org/10.61722/jssr.v3i5.5586>
- Fahlefie, R., & Damayanti. (2025). Sistem Kendali Kualitas Air pada Tanaman Hidroponik berbasis Internet of Things. *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, 5(4), 1266–1273. <https://doi.org/10.57152/malcom.v5i4.2062>
- Hidayatullah, M., Sofyan, S., Ali Topan, P., Andriani, T., & Nurhairunnisah, N. (2022). Monitoring System of Water Quality on Hydroponic Planting Media using Total

- Dissolved Solid (TDS) Sensor Based Arduino Uno R3. *Jurnal Ilmu Fisika (JIF)*, 14(2), 108–115. <https://doi.org/10.25077/jif.14.2.108-115.2022>
- Maya Olalla, E., Lopez Flores, A., Zambrano, M., Domínguez Limaico, M., Diaz Iza, H., & Vasquez Ayala, C. (2023). Fuzzy Control Application to an Irrigation System of Hydroponic Crops under Greenhouse: Case Cultivation of Strawberries (*Fragaria Vesca*). *Sensors*, 23(8), 1–16. <https://doi.org/10.3390/s23084088>
- Muqsith Hidayat, A., Akib, F., & Author, K. (2024). Penerapan Fuzzy Tsukamoto pada Perancangan Sistem Kontrol dan Monitoring Nutrisi Aquaponic Berbasis Internet of Things. *Journal of Artificial Intelligence and Data Science (AGENTS)*, 4(2).
- Putra, Y. A., Ananda, Y., Srg, L. A., & Roza, I. (2025). Perancangan Sistem Hidroponik Pada Kontrol PH, Nutrisi, Kelembaban Menggunakan Logika Fuzzy Berbasis Internet of Thing. *JTELS: Journals of Telecommunication and Electrical Scientific*, 2(1), 43–48.
- Reno, R. Y., Sari, V. K., & Putri, W. K. (2023). KERAGAAN TANAMAN PAKCOY (*Brassica rapa* L.) VARIETAS NAULI F1 MELALUI OPTIMALISASI NUTRISI AB MIX PADA HIDROPONIK SISTEM WICK. *AGRIBIOS*, 21(2), 215–221. <https://doi.org/10.36841/agribios.v21i2.3080>
- Sholihah, A. N., Tohir, T., & Al Tahtawi, A. R. (2021). Kendali TDS Nutrisi Hidroponik Deep Flow Technique Berbasis IoT Menggunakan Fuzzy Logic. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, Dan Listrik Tenaga)*, 1(2), 89–98. <https://doi.org/10.35313/jitel.v1.i2.2021.89-98>
- 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. In *AgriEngineering* (Vol. 7, Number 2, pp. 1–23). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/agriengineering7020043>
- Tang, H. H., & Ahmad, N. S. (2024). Fuzzy Logic Approach for Controlling Uncertain and Nonlinear Systems: a Comprehensive Review of Applications and Advances. *Systems Science and Control Engineering*, 12(1), 1–34. <https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2394429>
- Untoro, M. C., & Hidayah, F. R. (2022). IoT-Based Hydroponic Plant Monitoring and Control System to Maintain Plant Fertility. *INTEK: Jurnal Penelitian*, 9(1), 33–41. <https://doi.org/10.31963/intek>