

# The Comparison of the Performance of Fuzzy Tsukamoto and Fuzzy Mamdani in an Internet of Things Based Grape Greenhouse Control System

Athirah Rusadi<sup>1\*</sup>, Munirul Ula<sup>2</sup>, Muhammad Daud<sup>3</sup>, Nurdin<sup>4</sup>, Arnawan Hasibuan<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Magister Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe, 24355, Indonesia

## Informasi Artikel

Diterima : 15 Mei 2025  
Revisi : 21 Mei 2025  
Publikasi : 20 Juni 2025

## Kata Kunci:

Fuzzy Tsukamoto  
Fuzzy Mamdani  
Sistem kendali  
Greenhouse  
Internet of Things (IoT)

## ABSTRAK

Penerapan Internet of Things dalam pertanian, khususnya rumah kaca anggur, memungkinkan pengendalian lingkungan secara otomatis untuk meningkatkan efisiensi dan hasil produksi. Penelitian ini membandingkan performa dua metode logika fuzzy, yakni Fuzzy Mamdani dan Fuzzy Tsukamoto, dalam sistem kontrol suhu dan kelembapan berbasis IoT menggunakan sensor DHT22. Sistem dirancang untuk mengatur penyiraman secara otomatis melalui aktuator berdasarkan data suhu dan kelembapan. Evaluasi dilakukan menggunakan metrik RMSE, MAE, dan standar deviasi. Hasil menunjukkan bahwa metode Tsukamoto memiliki RMSE 2,6928, MAE 2,2625, dan standar deviasi 1,1080 yang lebih rendah dibandingkan Mamdani, yang mencatatkan nilai RMSE 2,9039, MAE 2,3947, dan standar deviasi 1,9268. Namun, uji statistik paired t-test menunjukkan p-value 0,0690 > 0,05, menandakan perbedaan performa tidak signifikan secara statistik. Dengan demikian, meskipun Fuzzy Tsukamoto lebih unggul secara metrik, kedua metode dinilai setara dalam pengendalian lingkungan rumah kaca anggur.

## ABSTRACT

The application of Internet of Things in agriculture, particularly in grape greenhouses, enables automated environmental control to enhance efficiency and crop yield. This study compares the performance of two fuzzy logic methods, Fuzzy Mamdani and Fuzzy Tsukamoto, in a temperature and humidity control system based on IoT using the DHT22 sensor. The system is designed to automate irrigation via actuators based on sensor data. Performance evaluation was conducted using RMSE, MAE, and standard deviation metrics. The results show that the Tsukamoto method achieved lower RMSE 2.6928, MAE 2.2625, and standard deviation 1.1080 compared to the Mamdani method, which recorded RMSE of 2.9039, MAE of 2.3947, and standard deviation of 1.9268. However, a paired t-test yielded a p-value of 0.0690 > 0.05, indicating no statistically significant performance difference. Thus, while Fuzzy Tsukamoto appears superior in metrics, both methods are considered equally effective for controlling environmental conditions in grape greenhouses.

This is an open-access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



## \*Penulis Koresponden

Email: [athirah.237110201011@mhs.unimal.ac.id](mailto:athirah.237110201011@mhs.unimal.ac.id)

Cara sitasi IEEE:

A. Rusadi, M. Ula, M. Daud, Nurdin, & A. Hasibuan, "The Comparison of the Performance of Fuzzy Tsukamoto and Fuzzy Mamdani in an Internet of Things Based Grape Greenhouse Control System"

*Journal of Artificial Intelligence and Software Engineering (J-AISE)*, vol. 5, no. 2, pp. 540-551, Juni 2025.

## 1. PENDAHULUAN

Penerapan Internet of Things (IoT) semakin merambah berbagai sektor, termasuk pertanian. Rumah kaca menjadi solusi efektif dalam mengendalikan lingkungan tumbuh tanaman, terutama untuk komoditas bernilai tinggi seperti anggur [1]. Rumah kaca memungkinkan petani untuk mengoptimalkan produksi dengan menjaga kondisi lingkungan yang ideal. Namun, manajemen yang efisien memerlukan sistem kontrol otomatis yang canggih untuk mengatur suhu, kelembaban, dan faktor lingkungan lainnya [2]. *Greenhouse* adalah struktur tertutup yang dirancang untuk menumbuhkan tanaman dalam kondisi yang dikendalikan [3]. Pengaturan kelembaban di rumah kaca sangat penting untuk pertumbuhan tanaman. Masalah yang dihadapi adalah penggunaan termometer sebagai sistem pengukuran masih dilakukan secara manual. Penggunaan logika fuzzy juga memungkinkan sistem untuk mengatur waktu penyiraman secara dinamis, menghasilkan kabut yang optimal berdasarkan suhu dan kelembaban sehingga variabel input lainnya yang pengaruh iklim rumah kaca ditambahkan, serta penggunaan metode selain logika fuzzy untuk meningkatkan akurasi [4].

Penyiraman secara manual sering dilakukan oleh pemilik tumbuhan pada saat jadwal penyiraman yang sesuai dengan cara menyediakan air pada media tanam. Namun penyiraman secara manual dapat menyita banyak waktu dan tenaga sehingga penyiraman ini kurang efektif [5]. Tanaman anggur bukanlah tanaman yang mudah untuk ditanam hingga berbuah, namun budidaya tanaman anggur di daerah tropis memerlukan perhatian khusus [6], diantaranya bergantung pada berbagai parameter lingkungan seperti suhu dan kelembaban tanah [7]. Penggunaan sumber daya seperti air secara berlebihan juga dapat berdampak negatif pada lingkungan [8]. Kolaborasi internet dan sensor merupakan hal yang sangat membantu para petani atau pemilik tanaman agar dapat dengan mudah monitoring dan controlling tanamannya dari jarak jauh tanpa harus mengunjungi atau melihat tanamannya secara langsung dengan memanfaatkan Internet of Things (IoT) [9].

Hal ini cocok untuk kondisi rumah kaca yang lebih dinamis, di mana berbagai faktor lingkungan berperan. Penggunaan sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban udara menghasilkan kesalahan rata-rata sebesar 20,75% untuk suhu dan 18,7% untuk kelembaban, dibandingkan dengan termometer digital. Sistem kendali fuzzy Mamdani bekerja secara efektif dalam mengendalikan suhu dan kelembaban udara, dengan hasil yang signifikan dalam eksperimen menggunakan aktuator [10]. Sistem akan menggunakan metode fuzzy logic (Fuzzy Mamdani dan Fuzzy Tsukamoto) untuk memproses data sensor dan mengaktifkan aktuator secara efisien, dengan integrasi teknologi IoT untuk pemantauan jarak jauh. Sensor DHT11/DHT22 secara terus-menerus mengukur suhu dan kelembaban di dalam greenhouse, seperti yang ada pada penelitian [11]. Tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan metode tradisional menunjukkan bahwa metode fuzzy Tsukamoto dapat meminimalisir kesalahan prediksi, yang pada akhirnya membantu mengurangi kerugian akibat produksi berlebihan [12].

## 2. METODE PENELITIAN

### A. Fuzzy Tsukamoto

Metode Fuzzy Tsukamoto merupakan salah satu metode logika fuzzy yang digunakan dalam sistem pengambilan keputusan. Dalam metode ini, setiap aturan fuzzy direpresentasikan dalam bentuk implikasi if-then. Output dari setiap aturan dalam sistem inferensi Fuzzy Tsukamoto adalah nilai fuzzy dalam bentuk himpunan fuzzy monoton, yaitu naik atau turun [13].

$$\mu(x) = \frac{x-a}{b-a} \text{ for } a \leq x \leq b \quad (1)$$

Sementara itu, rumus himpunan fuzzy adalah sebagai berikut:

$$\mu(x) = \frac{b-x}{b-a} \text{ for } a \leq x \leq b \quad (2)$$

Dimana :

- x adalah nilai input,
- a dan b adalah batas interval himpunan fuzzy.

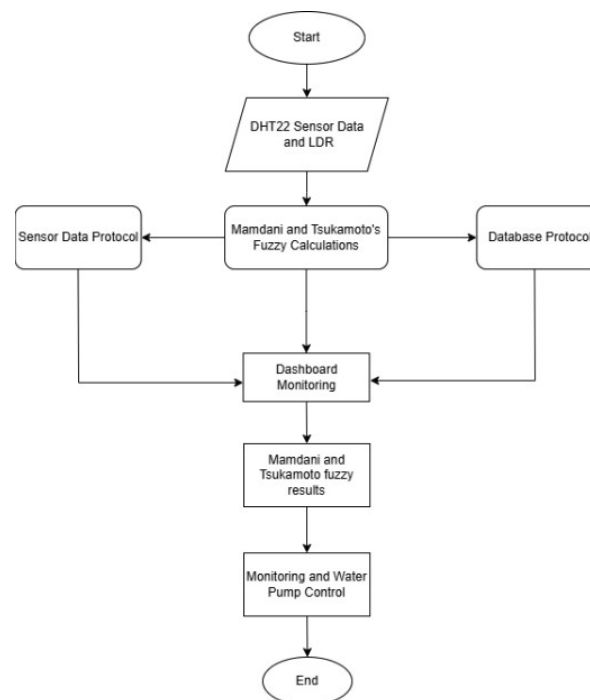
Setiap aturan fuzzy dalam bentuk if-then menghasilkan nilai predikat ( $\alpha$ ) yang merupakan nilai minimum derajat keanggotaan fuzzy pada bagian kondisi.

### B. Fuzzy Mamdani

Metode Mamdani merupakan salah satu metode dalam Sistem Inferensi Fuzzy (FIS) yang digunakan untuk mengambil keputusan terbaik dalam permasalahan yang tidak pasti. Metode ini pertama kali dicetuskan oleh Ebrahim Mamdani. Fuzzy Mamdani merupakan salah satu metode logika fuzzy yang sering digunakan dalam berbagai aplikasi pengambilan keputusan dan kontrol otomatis [14]. Metode ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk prediksi banjir, karena strukturnya yang sederhana dengan operasi MIN-MAX [15].

### C. Arsitektur Sistem

Penelitian ini merupakan jenis penelitian dan pengembangan karena akan meneliti dan mengembangkan rumah kaca pintar untuk tanaman anggur dengan memanfaatkan internet of things dengan tahapan inti yaitu survei awal, perancangan, uji coba, validasi, uji validasi dan implementasi, hal ini sama yang disebutkan pada penelitian [16]. Tahapan dalam proses ini dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut ini:



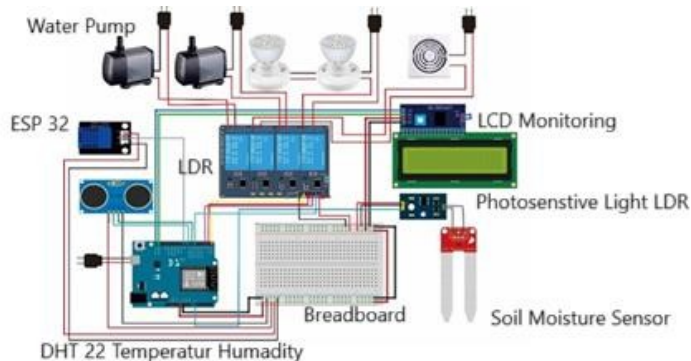
Gambar 1. Perancangan Sistem

Perancangan sistem kendali rumah kaca anggur berbasis IoT menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto dan Fuzzy Mamdani dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa aspek teknis penting, yaitu perlunya pemantauan secara real-time, pengambilan keputusan secara otomatis menggunakan logika fuzzy, dan konektivitas jarak jauh melalui Internet of Things (IoT).

1. Sensor suhu dan kelembaban yang digunakan adalah DHT22
2. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino
3. Fuzzy Processing dimana keputusan penggunaan dua metode fuzzy yaitu Fuzzy Mamdani dan Fuzzy Tsukamoto dilakukan untuk menguji perbandingan kinerja kedua metode tersebut dalam mengendalikan suhu dan kelembaban.

### B. Perancangan Elektronik

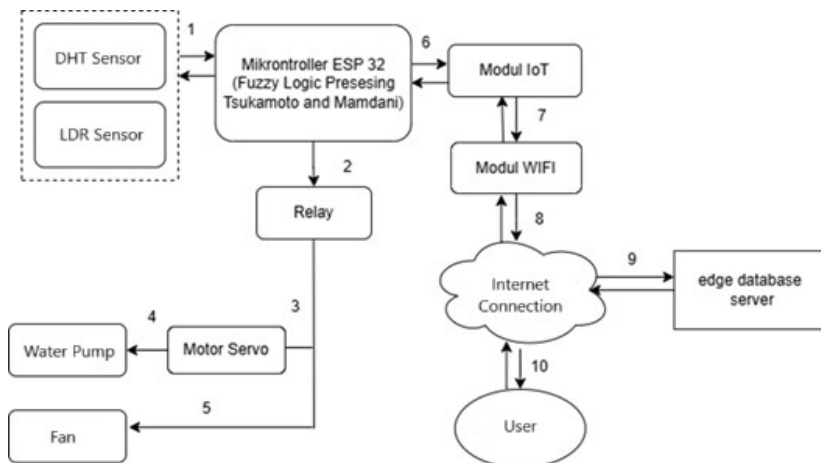
Sistem kendali rumah kaca berbasis IoT berperan penting sebagai penghubung antara sensor, aktuator, dan sistem pemrosesan data. Kestabilan, keakuratan, dan responsivitas komponen elektronik sangat menentukan keberhasilan integrasi sistem, hal ini selaras dengan penelitian [17] seperti desain elektronik pada Gambar 2.2, dengan pengaturan konfigurasi elektronik sebagai salah satu aspek krusial dalam penelitian ini.



Gambar 2. Perancangan Elektronik

C. Aspek Mekanis

Sistem yang dirancang bertujuan untuk mengendalikan kondisi lingkungan rumah kaca anggur berbasis IoT dengan menggunakan metode Fuzzy Mamdani dan Tsukamoto. Analisis kebutuhan sistem dilakukan untuk memastikan bahwa rancangan sistem dapat memenuhi tujuan seperti pada penelitian[14]. Berikut ini dapat dilihat pada gambar 2.3 analisis kebutuhan dari aspek perangkat keras, perangkat lunak, data, dan pengguna.



Gambar 3. Aspek Mekanis

Diagram blok sistem menggambarkan sistem kontrol otomatis di rumah kaca anggur berbasis IoT. Berikut adalah alur utamanya:

1. Sensor (DHT22 dan LDR) Mengukur suhu dan kelembapan di rumah kaca. Data ini dikirim ke mikrokontroler dan sensor intensitas cahaya
2. Kontroler (ESP32) Memproses data sensor menggunakan metode logika fuzzy (Mamdani dan Tsukamoto) untuk menghasilkan keputusan.
3. Aktuator - Sistem Pendingin: Mendinginkan suhu jika terlalu tinggi. - Sistem Pemanas: Memanaskan suhu jika terlalu rendah. - Sistem Penyiraman: Menjaga kelembapan dengan menyiram.
4. Platform IoT (Cloud Server) Menyimpan data dan memungkinkan pemantauan waktu nyata.
5. Antarmuka Pengguna (Aplikasi Seluler dan Dasbor Web) Memudahkan pengguna untuk memantau dan mengontrol kondisi rumah kaca dari jarak jauh.

D. Metode Logika Defuzzifikasi

Metode logika defuzzifikasi digunakan untuk mengubah nilai fuzzy hasil inferensi menjadi nilai crisp yang dapat dipahami dan diimplementasikan secara langsung oleh sistem kontrol. Pada sistem pengendalian irigasi ini, variabel input seperti intensitas cahaya (Lux), kelembapan tanah (%), dan suhu

udara ( $^{\circ}\text{C}$ ) diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori linguistik dengan rentang nilai tertentu. Selanjutnya, output berupa durasi irigasi (detik) juga didefinisikan dalam kategori dengan rentang nilai spesifik. Adapun parameter defuzzifikasi dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Parameter Defuzzifikasi

Jenis Variabel	Nama Variabel	Kategori	Rentang Nilai
Input	Cahaya (Lux)	Rendah	0 – 2000
		Sedang	1500 – 5000
		Tinggi	4000 – 8000
	Kelembaban Tanah (%)	Kering	0 – 30
		Normal	20 – 60
		Basah	50 – 100
	Suhu ( $^{\circ}\text{C}$ )	Sejuk	15 – 25
		Normal	20 – 35
		Panas	30 – 45
Output	Durasi Irigasi (detik)	Pendek	0 – 5
		Sedang	4 – 10
		Panjang	8 – 15

Setelah sensor mengirim data mentah (angka numerik), langkah selanjutnya adalah proses fuzzifikasi, yaitu mengubah nilai numerik menjadi nilai linguistik (kategori fuzzy). Berikut langkah-langkahnya:

#### Langkah 1 : Tentukan Derajat Keanggotaan

Langkah pertama dalam proses fuzzy adalah menentukan derajat keanggotaan untuk setiap himpunan fuzzy pada variabel input. Derajat keanggotaan ini dihitung dengan menggunakan metode interpolasi linier berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditetapkan. Proses ini bertujuan untuk mengukur sejauh mana nilai input termasuk dalam setiap kategori fuzzy sehingga dapat digunakan dalam tahap inferensi selanjutnya.

Tabel 2. Derajat Keanggotaan

Variabel	Nilai Sensor	Kategori	Rumus Derajat Keanggotaan ( $\mu$ )	Nilai $\mu$
Cahaya (Lux)	3000	Sedang	$(3000 - 1500) / (5000 - 1500)$	0,428
		Tinggi	$(8000 - 3000) / (8000 - 4000)$	0,5
Kelembaban Tanah	25%	Kering	$(30 - 25) / (30 - 0)$	0,167
		Normal	$(25 - 20) / (60 - 20)$	0,125
Suhu ( $^{\circ}\text{C}$ )	30	Normal	$(35 - 30) / (35 - 20)$	0,333
		Panas	$(30 - 25) / (45 - 30)$	0,333

#### Langkah 2 : Aktivasi Aturan (Min-Maks)

Dengan menggunakan aturan tersebut, kami menentukan derajat keanggotaan minimum untuk setiap aturan:

- Cahaya Sedang (0,428), Kelembaban Tanah Kering (0,167),

Suhu Normal (0,333)

$\rightarrow \alpha_4 = \min(0.428, 0.167, 0.333) = 0.167 \rightarrow \text{Long Irrigation}$

- Cahaya Sedang (0,428), Kelembaban Tanah Normal (0,125),

Suhu Panas (0,333)

$\rightarrow \alpha_6 = \min(0.428, 0.125, 0.333) = 0.125 \rightarrow \text{Medium irrigation}$

#### Langkah 3 : Komposisi Output Fuzzy (Aturan Maks)

Menggunakan output fuzzy maksimum untuk menggabungkan aturan:

- Long Irrigation: 0.167
- Medium Irrigation: 0.125

Langkah 4 : Defuzzifikasi menggunakan Metode Centroid

Untuk mendapatkan nilai renyah untuk durasi irigasi, kami menerapkan metode centroid (rata-rata tertimbang):

$$Z = \frac{(0.167 \times 12) + (0.125 \times 8)}{0.167 + 0.125}$$

$$Z = \frac{(2.004) + (1)}{0.292}$$

$$Z = \frac{3.004}{0.292} \approx 10.29 \text{ seconds}$$

Berdasarkan metode Fuzzy Mamdani, durasi irigasi yang disarankan adalah sekitar 10 detik. Hasil ini menunjukkan bagaimana aturan fuzzy dan metode Mamdani memungkinkan sistem untuk secara adaptif menentukan kebutuhan irigasi berdasarkan berbagai masukan sensor, dengan keluaran akhir berupa nilai yang jelas untuk durasi, hal ini selaras dengan yang disebutkan pada penelitian[18].

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Penentuan Durasi Irigasi Berbasis Fuzzy

Penentuan durasi irigasi yang optimal pada sistem greenhouse dilakukan melalui proses defuzzifikasi menggunakan metode centroid. Metode ini digunakan untuk memperoleh nilai crisp dari hasil inferensi fuzzy berdasarkan aturan yang telah ditetapkan. Proses defuzzifikasi dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata tertimbang dari seluruh output fuzzy yang dihasilkan, dengan mempertimbangkan nilai derajat keanggotaan dari masing-masing variabel input. Variabel input yang digunakan dalam sistem mencakup intensitas cahaya, kelembaban tanah, dan suhu udara. Setiap variabel diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori linguistik menggunakan fungsi keanggotaan fuzzy, yang mencerminkan kondisi lingkungan aktual. Kombinasi dari kategori-kategori tersebut kemudian digunakan dalam aturan fuzzy untuk menentukan respons sistem berupa durasi penyiraman.

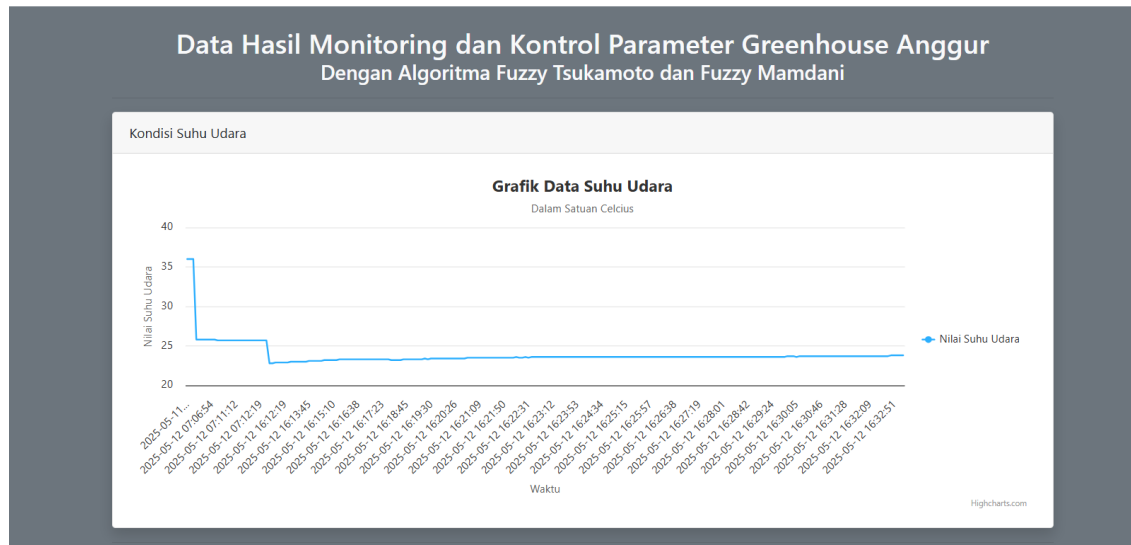
Penentuan durasi irigasi pada sistem *greenhouse* dilakukan melalui proses inferensi fuzzy menggunakan metode Tsukamoto dan Mamdani. Tujuan dari proses ini adalah untuk mengatur jumlah air yang diberikan secara otomatis berdasarkan kondisi lingkungan yang terdeteksi oleh sensor. Parameter input yang digunakan meliputi intensitas cahaya, kelembaban tanah, dan suhu udara, yang masing-masing diklasifikasikan ke dalam kategori linguistik tertentu melalui fungsi keanggotaan fuzzy. Definisi kategori setiap variabel input dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Variabel Input Data

Variabel	Kategori
Cahaya	Rendah, Sedang, Tinggi
Kelembaban Tanah	Kering, Normal, Basah
Suhu	Dingin, Normal, Panas

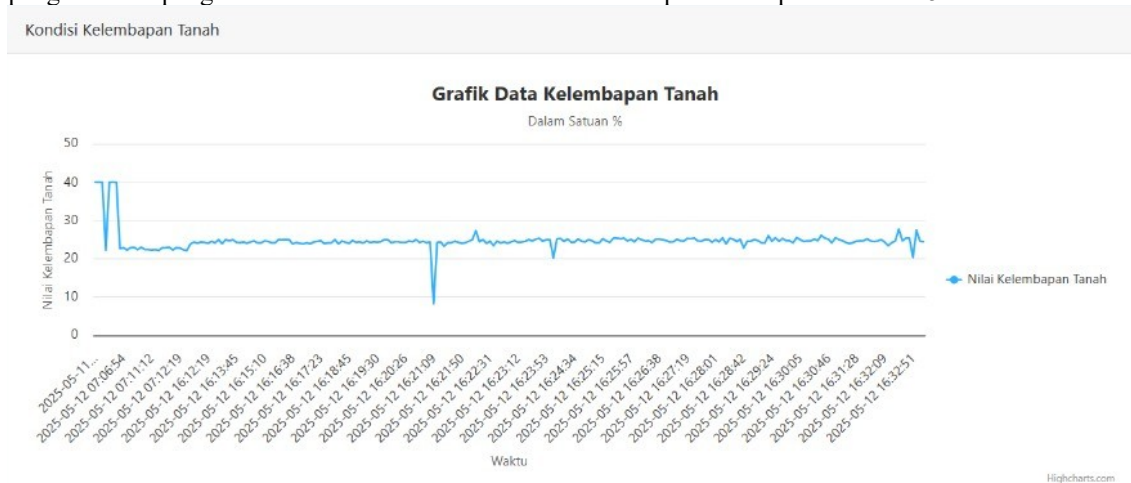
#### B. Implementasi dan Monitoring Sistem Kontrol Greenhouse dengan Metode Tsukamoto dan Mamdani

Monitoring dan kontrol parameter lingkungan pada greenhouse anggur yang dikendalikan menggunakan algoritma fuzzy Tsukamoto dan Mamdani disajikan pada bagian ini. Parameter meliputi suhu udara, kelembaban tanah, dan intensitas cahaya matahari. Data tersebut direkam secara berkala untuk mengevaluasi efektivitas sistem kontrol dalam mempertahankan kondisi lingkungan yang optimal bagi pertumbuhan tanaman anggur. Implementasi fuzzy dapat dilihat pada server dengan alamat localhost/greenhouse. Metode ini menghitung derajat keanggotaan nilai input intensitas cahaya sebesar 55 ke dalam kategori tertentu, seperti cahaya rendah, sedang, atau tinggi. Dengan menggunakan fungsi keanggotaan yang telah didefinisikan. Hasil pengukuran nilai suhu udara tersebut dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Tampilan Hasil Suhu Udara

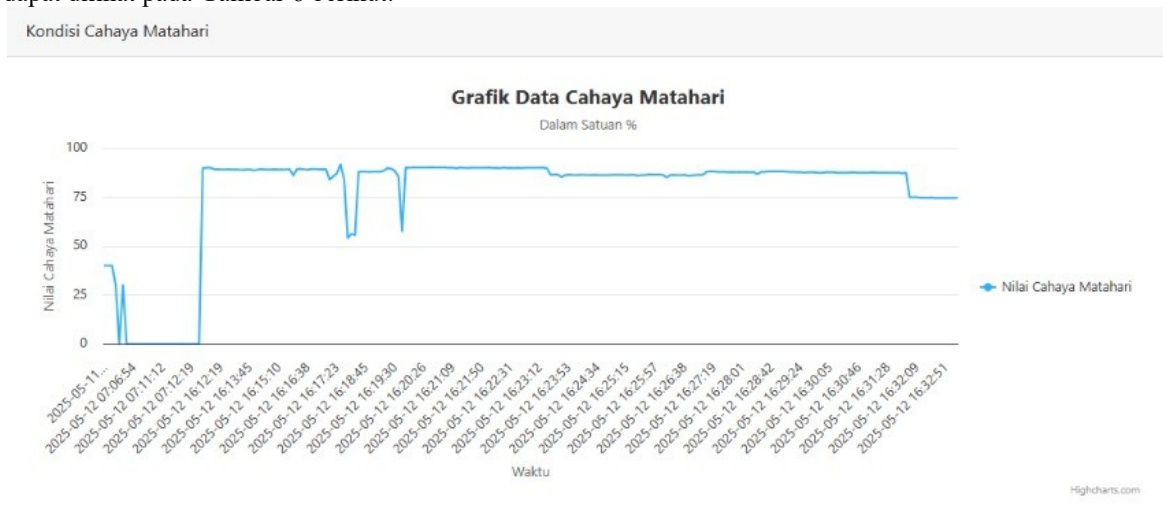
Kelembapan tanah pada sistem greenhouse anggur berbasis Internet of Things (IoT) yang dikendalikan oleh algoritma Fuzzy Tsukamoto dan Fuzzy Mamdani menunjukkan perubahan nilai kelembapan tanah dalam satuan persen (%) secara kontinu terhadap waktu. Berdasarkan hasil pengamatan, pada awal proses pengukuran terjadi fluktuasi nilai kelembapan yang cukup signifikan. Namun, setelah sistem kontrol berbasis logika fuzzy diaktifkan, nilai kelembapan tanah cenderung stabil pada kisaran 27–32%. Stabilitas ini mengindikasikan bahwa sistem pengendalian yang diterapkan mampu menjaga kelembapan tanah dalam batas optimal sesuai dengan kebutuhan tanaman anggur. Penerapan logika fuzzy dalam proses pengambilan keputusan memungkinkan sistem untuk melakukan penyesuaian tingkat irigasi secara otomatis berdasarkan input yang diterima dari sensor kelembapan tanah. Dengan demikian, kondisi lingkungan tumbuh dapat dipertahankan secara konsisten dan adaptif terhadap perubahan kondisi aktual di lapangan. Hasil pengukuran nilai kelembapan tanah tersebut dapat dilihat pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Tampilan Hasil Kelembapan Tanah

Pemantauan intensitas cahaya matahari dalam sistem greenhouse anggur berbasis Internet of Things (IoT) yang didukung oleh algoritma Fuzzy Tsukamoto dan Fuzzy Mamdani bertujuan untuk memastikan ketersediaan pencahayaan optimal bagi proses fotosintesis tanaman. Pada awal periode pengamatan, terjadi fluktuasi nilai cahaya matahari dengan intensitas yang relatif rendah, yang kemudian meningkat secara signifikan hingga mendekati 100%. Setelah aktivasi sistem kontrol, nilai intensitas cahaya cenderung stabil dan berada dalam rentang tinggi, meskipun masih terdapat sedikit penurunan sesekali yang diduga disebabkan oleh perubahan kondisi cuaca atau bayangan struktur dalam greenhouse. Hal ini mencerminkan bahwa sistem kontrol berbasis logika fuzzy mampu memberikan respons adaptif terhadap variasi intensitas cahaya dengan mengatur elemen pendukung seperti penutup otomatis atau pencahayaan buatan. Dengan demikian, penerapan algoritma fuzzy memberikan kontribusi terhadap pemeliharaan intensitas cahaya yang

konsisten guna menunjang pertumbuhan optimal tanaman anggur. Data intensitas cahaya matahari tersebut dapat dilihat pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Tampilan Hasil Cahaya Matahari

Riwayat monitoring dan kontrol greenhouse dengan menggunakan metode Tsukamoto direkam secara berkala dan disimpan dalam sistem untuk mendukung analisis dan evaluasi kinerja. Data riwayat tersebut mencakup parameter-parameter penting seperti suhu udara (°C), kelembapan tanah (%), intensitas cahaya (%), durasi penyiraman (detik), serta waktu pencatatan (timestamp). Hasil monitoring dan kontrol yang diperoleh melalui metode Tsukamoto tersebut dapat dilihat secara detail pada Gambar 7 berikut.

NO	SUHU (°C)	KELEMBAPAN TANAH(%)	CAHAYA (%)	DURASI PENYIRAMAN (DETIK)	ALGORITMA FFUZZY	TIMESTAMP
221	25.70	22.42	0.00	0.00	Tsukamoto	2025-05-12 07:11:02
222	25.70	22.44	0.00	0.00	Tsukamoto	2025-05-12 07:10:52
223	25.70	23.03	0.00	0.00	Tsukamoto	2025-05-12 07:10:42
224	25.70	22.37	0.00	0.00	Tsukamoto	2025-05-12 07:10:32
225	25.70	23.03	0.00	0.00	Tsukamoto	2025-05-12 07:10:22
226	25.70	22.88	0.00	0.00	Tsukamoto	2025-05-12 07:07:14
227	25.80	22.27	0.00	0.00	Tsukamoto	2025-05-12 07:07:04
228	25.80	22.88	0.00	0.00	Tsukamoto	2025-05-12 07:06:54
229	25.80	22.66	0.00	0.00	Tsukamoto	2025-05-12 07:06:44
230	25.80	40	0.00	0.00	Tsukamoto	2025-05-12 07:06:34

Showing 221 to 230 of 236 entries

Gambar 7. Tampilan Hasil Monitoring Menggunakan Metode Tsukamoto

Riwayat monitoring dan kontrol greenhouse dengan menggunakan metode Mamdani dicatat secara otomatis oleh sistem pada interval waktu tertentu untuk mendukung proses evaluasi dan analisis. Data riwayat tersebut mencakup parameter-parameter penting seperti suhu udara (°C), kelembapan tanah (%), intensitas cahaya (%), durasi penyiraman (detik), serta waktu pencatatan (timestamp). Hasil monitoring dan kontrol yang diperoleh melalui metode Mamdani dapat dilihat secara rinci pada Gambar 8 berikut.

**Data Riwayat Monitoring dan Kontrol Greenhouse**

10 entries per page Search:

NO	SUHU (°C)	KELEMBAPAN TANAH(%)	CAHAYA (%)	DURASI PENYIRAMAN (DETIK)	ALGORITMA FFUZZY	TIMESTAMP
1	23.80	24.49	74.73	0.00	Mamdani	2025-05-12 16:33:07
2	23.80	24.59	74.60	0.00	Mamdani	2025-05-12 16:33:01
3	23.80	27.45	74.58	0.00	Mamdani	2025-05-12 16:32:56
4	23.80	20.37	74.63	0.00	Mamdani	2025-05-12 16:32:51
5	23.80	25.37	74.65	0.00	Mamdani	2025-05-12 16:32:45
6	23.70	25.37	74.63	0.00	Mamdani	2025-05-12 16:32:40
7	23.70	24.71	74.65	0.00	Mamdani	2025-05-12 16:32:35
8	23.70	27.74	74.82	0.00	Mamdani	2025-05-12 16:32:30
9	23.70	24.64	74.75	0.00	Mamdani	2025-05-12 16:32:24
10	23.70	24.22	74.73	0.00	Mamdani	2025-05-12 16:32:19

Showing 1 to 10 of 236 entries « < 1 2 3 4 5 ... 24 > »

Gambar 8. Tampilan Hasil Monitoring Menggunakan Metode Mamdani

### C. Penerapan Fuzzy Tsukamoto dan Mamdani

Implementasi algoritma fuzzy Tsukamoto dan Mamdani yang digunakan dalam sistem pengendalian irigasi otomatis pada greenhouse. Penerapan kedua metode fuzzy ini diwujudkan dalam bentuk kode program yang dijalankan pada mikrokontroler untuk memproses data sensor lingkungan, seperti suhu udara, kelembapan tanah, dan intensitas cahaya. Hasil pemrosesan dari logika fuzzy ini digunakan untuk menentukan durasi dan frekuensi irigasi secara otomatis. Potongan kode berikut menggambarkan penerapan logika fuzzy dalam sistem yang telah dikembangkan dapat dilihat pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Potongan Kode Metode Fuzzy Tsukamoto dan Mamdani

```
// ===== METODE MAMDANI =====
String algo_mamdani = "Mamdani";

// Fungsi keanggotaan segitiga untuk Mamdani
float membership_mamdani(float x, float a, float b, float c) {
if (x <= a) return 0;
else if (x > a && x <= b) return (x - a) / (b - a);
else if (x > b && x <= c) return (c - x) / (c - b);
else return 0;
}

// ===== METODE TSUKAMOTO =====
String algo_tsukamoto = "Tsukamoto";
#include <DHT.h> // Library untuk sensor DHT
#define DHTPIN 2 // Pin sensor DHT
#define DHTTYPE DHT11 // Tipe sensor DHT11

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // Inisialisasi sensor

// Fungsi keanggotaan segitiga untuk Tsukamoto
float membership_tsukamoto(float x, float a, float b, float c) {
```

```

if (x <= a) return 0;
else if (x > a && x <= b) return (x - a) / (b - a);
else if (x > b && x <= c) return (c - x) / (c - b);
else return 0;
}

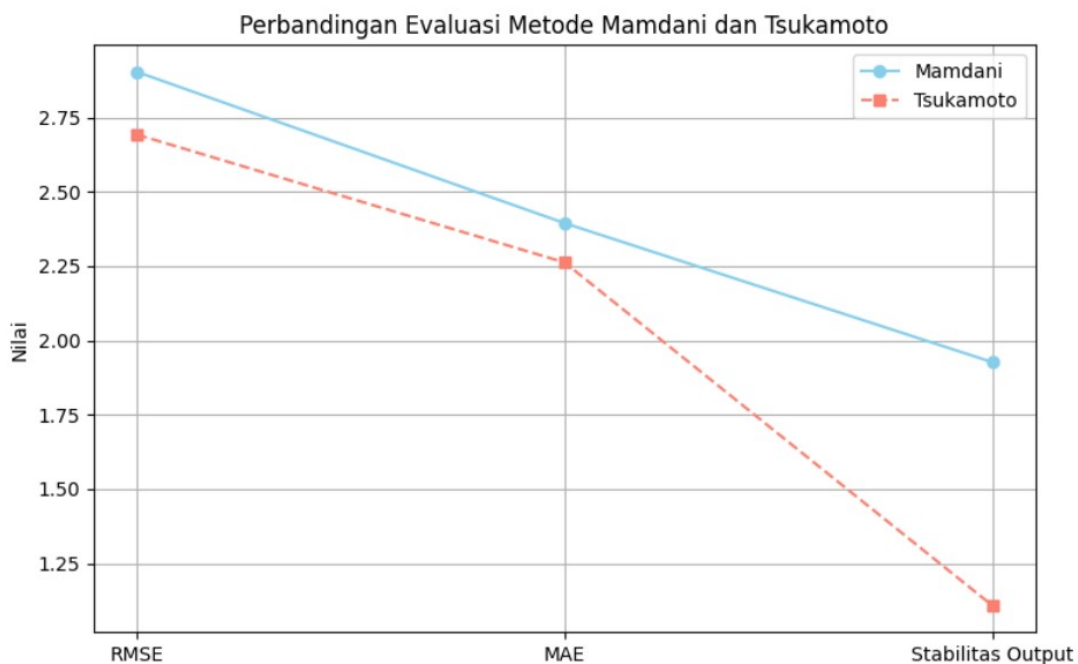
```

#### D. Pengujian RMSE dan MAE

Hasil pengujian model dievaluasi menggunakan dua metrik utama, yaitu Root Mean Square Error (RMSE) dan Mean Absolute Error (MAE). RMSE mengukur rata-rata kuadrat selisih antara nilai prediksi dengan nilai aktual, sehingga memberikan penekanan lebih pada kesalahan yang besar, sementara MAE menghitung rata-rata nilai absolut selisih tersebut yang menunjukkan kesalahan rata-rata model tanpa memperbesar efek kesalahan ekstrem. Kedua metrik ini penting untuk menilai akurasi model, di mana nilai RMSE dan MAE yang lebih rendah menandakan prediksi yang lebih mendekati nilai sebenarnya dan model yang lebih baik dalam performa. Adapun hasil pengujiannya dapat dilihat pada Tabel 3. Berikut

Tabel 3. Pengujian RMSE dan MAE

Metode	Jumlah Data	RMSE	MAE	Stabilitas Output (Std Dev)
Tsukamoto	560	2.6928	2.2625	1.1080
Mamdani	560	2.9039	2.3947	1.9268



Gambar 9. Grafik Perbandingan Metode

Berdasarkan Gambar 9. hasil evaluasi yang dilakukan, metode Tsukamoto menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan metode Mamdani pada ketiga aspek pengukuran yang digunakan. Nilai Root Mean Square Error (RMSE) pada metode Tsukamoto sebesar 2,6928, lebih rendah dibandingkan metode Mamdani yang mencapai 2,9039, yang mengindikasikan tingkat kesalahan prediksi yang lebih kecil pada metode Tsukamoto. Selain itu, nilai Mean Absolute Error (MAE) metode Tsukamoto sebesar 2,2625 juga lebih rendah dibandingkan Mamdani yang sebesar 2,3947, sehingga menunjukkan deviasi absolut yang lebih rendah dan akurasi prediksi yang lebih tinggi. Dari segi stabilitas output, metode Tsukamoto memiliki standar deviasi sebesar 1,1080, yang jauh lebih konsisten dibandingkan dengan metode Mamdani yang mencapai 1,9268.

Table 4. Uji Normalitas dan Uji Perbedaan Berpasangan

No	Jenis Uji	Test Statistic	Probability Value	Hasil
1	Shapiro-Wilk	-	0.1469	Data berdistribusi normal
2	Paired t-test	1.8219	0.0690	Tidak signifikan prediksi setara secara statistik

Tabel 4. Uji normalitas terhadap selisih hasil prediksi antara metode Mamdani dan Tsukamoto dilakukan menggunakan uji Shapiro-Wilk, menghasilkan nilai p sebesar 0,1469 yang lebih besar dari tingkat signifikansi 0,05, sehingga data selisih berdistribusi normal. Selanjutnya, uji perbedaan berpasangan (paired t-test) dilakukan untuk mengetahui signifikansi perbedaan hasil prediksi kedua metode, dengan nilai statistik uji sebesar 1,8219 dan p-value 0,0690, yang juga lebih besar dari 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan secara statistik antara hasil prediksi metode Mamdani dan Tsukamoto.

#### E. Hasil Implementasi Perangkat IoT Greenhouse

Implementasi perangkat IoT pada sistem greenhouse dilakukan dengan memasang beberapa sensor di media tanam, antara lain sensor kelembaban tanah, sensor suhu udara, dan sensor intensitas cahaya. Seluruh sensor ini terhubung ke mikrokontroler melalui breadboard sebagai media koneksi sementara. Sistem juga dilengkapi dengan pompa air otomatis yang diaktifkan berdasarkan hasil pemrosesan data sensor menggunakan algoritma fuzzy Tsukamoto dan Mamdani. Perangkat ini berfungsi untuk mengotomatiskan proses irigasi serta memantau kondisi lingkungan secara real-time, sehingga mendukung terciptanya lingkungan tumbuh yang optimal bagi tanaman anggur. Adapun hasil implementasi perangkat dapat dilihat pada Gambar 10 berikut.



Gambar 10. Perangkat Internet Of Things Greenhouse

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi kinerja pada sistem kontrol rumah kaca anggur berbasis Internet of Things, metode Fuzzy Tsukamoto menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan metode Fuzzy Mamdani. Hal ini dibuktikan dengan nilai Root Mean Square Error (RMSE) dan Mean Absolute Error (MAE) yang lebih rendah pada metode Tsukamoto, yaitu masing-masing sebesar 2,6928 dan 2,2625, dibandingkan dengan metode Mamdani yang memiliki RMSE sebesar 2,9039 dan MAE sebesar 2,3947. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa metode Tsukamoto memberikan prediksi kontrol yang lebih akurat dan deviasi yang lebih kecil terhadap nilai aktual kondisi lingkungan di dalam rumah kaca anggur. Selain itu, dari segi stabilitas output, metode Tsukamoto juga lebih konsisten dengan standar deviasi sebesar 1,1080, sementara metode Mamdani menunjukkan standar deviasi yang lebih tinggi yakni 1,9268. Artinya, hasil kontrol yang dihasilkan oleh metode Tsukamoto cenderung lebih stabil dan minim fluktuasi dibandingkan metode Mamdani. Namun demikian, hasil uji statistik menunjukkan bahwa perbedaan performa kedua metode tersebut tidak signifikan secara statistik. Uji normalitas Shapiro-Wilk menunjukkan data berdistribusi normal dengan p-value 0,1469, sedangkan uji paired t-test menghasilkan p-value sebesar 0,0690, yang lebih besar dari tingkat signifikansi 0,05. Dengan demikian, meskipun metode Tsukamoto secara metrik tampak lebih unggul, secara statistik hasil prediksi kedua metode ini dianggap setara dalam pengendalian sistem rumah kaca anggur berbasis IoT.

## REFERENSI

- [1] Y. Ananda, M. H. H. Ichsan, and A. S. Budi, "Sistem Kontrol dan Monitoring Prototype Smart Green House pada Tanaman Stroberi menggunakan Logika Fuzzy berbasis Aplikasi Cayenne," *J. Pengemb. Teknol. ....*, vol. 7, no. 2, pp. 991–1002, 2023, [Online]. Available: <https://j-ptiik.ub.ac.id/index.php/j-ptiik/article/view/12363>
- [2] M. S. P. Y. Sarjito, M. Marwati, and S. Juddah, "Green House Sebagai Wadah Penelitian Tanaman Pada Pusat Penelitian Dan Pengembangan Tanaman Pangan Dan Hortikultura Di Kabupaten Maros," *TIMPALAJA Archit. Student Journals*, vol. 5, no. 2,

- pp. 131–138, 2023, doi: 10.24252/timpalaja.v5i2a5.
- [3] C. Umam, S. Suhartono, and E. Saputro, “Pendekatan Logika Fuzzy dalam Pengontrolan Suhu dan Kelembaban pada Persemaian Otomatis Full Closed System Tanaman Selada Hijau (*Lactuca sativa* L.),” *J. Keteknikan Pertan. Trop. dan Biosist.*, vol. 10, no. 2, pp. 144–153, 2022, doi: 10.21776/ub.jkptb.2022.010.02.07.
- [4] S. Widiono and I. Hartadi TU, “Fuzzy Logic Implementation In Internet Of Things Technology For Fogging Greenhouse Plants,” *Int. J. Eng. Technol. Nat. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 59–66, 2023, doi: 10.46923/ijets.v5i1.205.
- [5] Z. U. Zamzamil Umam and Denny Irawan, “Sistem Pemantauan dan Kendali Penyiraman Otomatis pada Tanaman menggunakan Logika Fuzzy berbasis Outseal SCADA,” *J. Ampere*, vol. 9, no. 1, pp. 1–9, 2024, doi: 10.31851/ampere.v9i1.15183.
- [6] S. Firdaus, T. Rismawan, and U. Ristian, “Sistem Manajemen Pengairan Pada Budidaya Tanaman Anggur Berbasis Internet of Things (Iot),” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 11, no. 3s1, pp. 907–916, 2023, doi: 10.23960/jitet.v11i3s1.3389.
- [7] E. Alfonsius, W. Kalengkongan, and S. C. W. Ngangi, “Sistem Monitoring Dan Kontroling Prototype Penyiram Tanaman Otomatis Berbasis Iot (Internet of Things),” *J. Teknoinfo*, vol. 18, no. 1, pp. 44–55, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal.teknokrat.ac.id/index.php/teknoinfo/index>
- [8] M. F. R. Yazid, D. Alia, and F. Nofandi, “Rancang Bangun Smart Pond Berbasis Internet Of Things (IoT),” ... *J. Ilmu Tek. dan ...*, vol. 3, no. 2, pp. 8416–8426, 2024, [Online]. Available: <https://journal.unimar-amni.ac.id/index.php/ocean/article/view/2111>
- [9] I. Ruslianto and Y. Erniajan, “Penerapan Model Waterfall dalam Pengembangan Perangkat Lunak Pemantauan Tanaman Anggur Berbasis Mobile Menggunakan IoT,” *J. Comput. Syst. Informatics*, vol. 5, no. 3, pp. 526–534, 2024, doi: 10.47065/josyc.v5i3.5099.
- [10] A. Sapounas, N. Katsoulas, B. Slager, R. Bezemer, and C. Lelieveld, “Design , Control , and Performance Aspects of Semi-Closed Greenhouses,” pp. 1–22, 2020.
- [11] M. Ula, R. Tjut Adek, B. Bustami, S. Mulaesy, and M. Bayu Juhri, “A Monitoring System for Aquaponics Based on Internet of Things,” *Proc. Malikussaleh Int. Conf. Multidiscip. Stud.*, vol. 3, no. 3, p. 00008, 2022, doi: 10.29103/micoms.v3i.49.
- [12] N. P. Juliya Pradnyawati, Y. Dri Handarkho, and P. Ardanari, “Implementasi Logika Fuzzy Metode Tsukamoto Berbasis Web Untuk Prediksi Jumlah Produksi Jajan Banten,” *J. Inform. Atma Jogja*, vol. 4, no. 1, pp. 9–16, 2023, doi: 10.24002/jiaj.v4i1.7437.
- [13] M. Fuad, F. Y. Wattimena, A. Rizani, and Yuswardi, “Investment Decision Making in Digital Business Using Tsukamoto Fuzzy Logic,” *Int. J. Softw. Eng. Comput. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 144–150, 2023, doi: 10.35870/ijsecs.v3i2.1525.
- [14] I. Raihan, M. Daud, A. Hasibuan, A. Mardhiah, and G. Kerimzade, “Implementation of Fuzzy Logic to Automatic Flower Irrigation Device Using Matlab,” *Andalasian Int. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 137–142, 2024, doi: 10.25077/aijaset.v4i2.117.
- [15] W. Z. Wu Junhao, “A Hybrid Model for Water Quality Prediction Based on an Short-Term Memory,” *Water*, 2022.
- [16] T. Taufik, N. Nurdin, and T. Taufiq, “Penerapan Smart Wastafel Berbasis Internet of Things dengan Menggunakan Aplikasi Blynk dan Cloud,” *Med. Tek. J. Tek. Elektromedik Indones.*, vol. 5, no. 1, pp. 67–78, 2023, doi: 10.18196/mt.v5i1.19576.
- [17] A. Rusadi and Z. Ardian, “Implementasi Radio Frekuensi Untuk Memonitoring Suhu Tumbuhan Hidroponik Berbasis Iot the Implementation of Frequency Radio in the Monitoring of the Temperature of Hydroponic Plants With Iot Based,” *J. Informatics Comput. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 121–124, 2024.
- [18] V. Thomopoulos, F. Tolis, T. F. Blounas, D. Tsipianitis, and A. Kavga, “Application of Fuzzy logic and IoT in a small-scale Smart Greenhouse System,” *Smart Agric. Technol.*, vol. 8, no. February, p. 100446, 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100446.