

SISTEM PENYIRAMAN OTOMATIS TERINTEGRASI IoT BERDASARKAN SUHU DAN KELEMBAPAN TANAH BERBASIS LOGIKA FUZZY PADA TANAMAN MELON

IOT-BASED SMART IRRIGATION SYSTEM USING FUZZY LOGIC, TEMPERATURE, AND SOIL MOISTURE FOR MELON CULTIVATION

Ivan Phedra Ega Saputra, *Lela Nurpulaela

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

2210631160042@student.unsika.ac.id, *lela.nurpulaela@ft.unsika.ac.id

INFO ARTIKEL

Diterima: 15 Juni 2026

Direvisi: 22 Juni 2026

Disetujui: 10 Juli 2026

Kata Kunci:

DS18B20; ESP32; *Internet of Things*;
Irigasi Cerdas; Logika Fuzzy; Melon.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan merancang bangun sistem irigasi cerdas yang mengintegrasikan *Fuzzy Logic* dengan teknologi IoT guna mempertahankan kelembapan tanah dan suhu optimal bagi pertumbuhan melon. Ketepatan volume irigasi sangat krusial karena irigasi yang kurang dapat menurunkan produksi hingga 25%. Mengatasi kelemahan sistem irigasi konvensional terjadwal, penelitian ini menawarkan kebaruan pada penyusunan aturan (*rule base*) fuzzy yang secara spesifik diformulasikan berdasarkan prinsip konservasi air untuk mencegah pembusukan akar melon; di mana aktuator pompa dipaksa mati total saat tanah berada di atas kelembapan 80% terlepas dari suhu udara. Metode mencakup perancangan perangkat keras (ESP32, sensor suhu DS18B20, sensor kelembapan tanah, pompa DC) dan perangkat lunak *Fuzzy Inference System* (FIS) Mamdani dengan defuzzifikasi Rata-rata Terbobot. Hasil pengujian menunjukkan sensor DS18B20 sangat presisi dengan rata-rata eror 0,4. Integrasi Blynk mentransmisikan data seketika (*real-time*) dengan jeda minim 200 ms. Validasi algoritma pada berbagai skenario fluktuasi lingkungan membuktikan sistem mampu memodulasi durasi aktuator pompa secara dinamis (0 hingga 7 detik), dengan salah satu pengujian spesifik pada suhu 24,8°C dan kelembapan 58% menghasilkan aktuator 4,57 detik yang presisi dengan perhitungan matematis. Berdasarkan komputasi yang adaptif tersebut, sistem secara teoritis mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air (*Water-Use Efficiency*) dibandingkan penyiraman manual. Implikasi praktis dari purwarupa ini dapat diwujudkan pada budidaya melon skala *greenhouse* maupun lapangan terbuka untuk mereduksi biaya operasional tenaga kerja dan menekan pemborosan air.

ABSTRACT

This study aims to design and develop a smart irrigation system that integrates Fuzzy Logic with IoT technology to maintain optimal soil moisture and temperature for melon growth. The precision of irrigation volume is crucial because insufficient irrigation can reduce production by up to 25%. Overcoming the weaknesses of conventional scheduled irrigation systems, this research offers novelty in formulating the fuzzy rule base, which is specifically designed based on water conservation principles to prevent melon root rot; where the pump actuator is forced to shut off completely when the soil moisture exceeds 80%, regardless of the air temperature. The methods include hardware design (ESP32, DS18B20 temperature sensor, soil moisture sensor, DC pump) and software design using the Mamdani Fuzzy Inference System (FIS) with the Weighted Average defuzzification method. The test results indicate that the DS18B20 sensor is highly precise with an average error of 0.4. Blynk integration successfully transmits real-time data with a minimal delay of 200 ms. Algorithm validation across various environmental fluctuation scenarios proves that the system can dynamically modulate pump actuation duration (0 to 7 seconds), with a specific test at 24.8°C and 58% moisture producing an actuation of 4.57 seconds, which is precise and equivalent to mathematical calculations. Based on this adaptive computation, the system is theoretically capable of increasing Water-Use Efficiency compared to manual watering. The practical implications of this prototype can be realized in both greenhouse and open-field melon cultivation to reduce operational labor costs and minimize water waste.

Keywords:

DS18B20; ESP32; Fuzzy Logic; *Internet of Things*; Melon; Smart Irrigation.

*Corresponding author: lela.nurpulaela@ft.unsika.ac.id

I. PENDAHULUAN

Pertanian modern, khususnya budidaya tanaman komersial, saat ini tengah mengalami transisi menuju digitalisasi dengan memanfaatkan berbagai instrumen sensor untuk pemantauan kondisi lingkungan secara berkelanjutan [1]. Transformasi ini semakin diperkuat dengan hadirnya teknologi *Internet of Things* (IoT) dan kecerdasan buatan (AI) yang diimplementasikan secara luas untuk mendukung efisiensi proses kultivasi [2]. Teknologi IoT telah mengubah lanskap sistem pertanian cerdas dengan mengintegrasikan sensor, topologi jaringan, dan platform pengambilan keputusan untuk mengoptimalkan parameter kritis seperti suhu dan kelembapan [3]. Sistem pertanian presisi berbasis IoT ini mampu meningkatkan efisiensi operasional lahan dengan menggabungkan pemantauan waktu nyata (*real-time*) beserta model alokasi sumber daya berbasis data yang berdampak langsung pada maksimalnya keuntungan ekonomi [4]. Lebih dari itu, integrasi teknologi cerdas ini juga diakui sangat krusial dalam menjaga pelestarian ekosistem lingkungan, khususnya untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air secara holistik pada lahan pertanian [5].

Pemilihan tanaman melon (*Cucumis melo L.*) sebagai objek penelitian didasarkan pada karakteristik agronomisnya yang sangat bergantung pada ketepatan volume irigasi. Pengaturan ketersediaan air yang tidak presisi akan berdampak langsung pada kualitas dan kuantitas panen. Jika volume air irigasi yang diberikan terlalu kecil atau kurang, produksi tanaman melon dapat mengalami penurunan hingga 25% yang sebagian besar disebabkan oleh berkurangnya bobot buah [6]. Di sisi lain, irigasi dengan volume air yang sesuai dan presisi tidak akan menurunkan produksi, melainkan justru mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air secara keseluruhan. Hal ini dikarenakan laju absorpsi air oleh akar tanaman sangat esensial sebagai bahan baku utama fotosintesis dan berperan penting dalam meningkatkan turgor sel, yang secara langsung berfungsi untuk memperbesar ukuran buah melon [6]. Kondisi tersebut menuntut adanya sistem kendali irigasi cerdas yang mampu mengatur kapan penyiraman harus dilakukan dan dihentikan sesuai dengan kebutuhan riil tanaman guna meminimalkan intervensi manual [7]. Secara agronomis, pertumbuhan vegetatif dan reproduktif tanaman melon membutuhkan suhu lingkungan optimal yang berkisar antara 25°C hingga 30°C [8]. Selain itu, sistem perakaran melon juga menuntut manajemen kelembapan tanah yang presisi. Penelitian terkait sistem pengairan ladang melon menunjukkan bahwa tingkat kelembapan tanah di bawah 60% merupakan ambang batas kekeringan kritis, sedangkan nilai di atas persentase tersebut mencukupi untuk mencegah cekaman air tanpa memicu asfiksia akar akibat genangan [9].

Penerapan kecerdasan buatan dan IoT pada sistem irigasi pintar telah membawa transformasi besar dalam memberikan solusi yang lebih cerdas, cepat, dan ramah lingkungan pada sektor pertanian [10]. Secara spesifik, penggunaan logika *fuzzy* (*Fuzzy Logic*) menawarkan solusi unggul untuk meningkatkan otomatisasi irigasi dengan menentukan durasi penyiraman yang tepat sasaran. Sistem

kendali pintar dengan algoritma logika *fuzzy* mampu memutus aliran irigasi seketika saat parameter kelembapan ideal tercapai [11]. Berdasarkan studi terkait, implementasi kontrol *fuzzy* pada irigasi berbasis IoT terbukti mampu menghemat konsumsi air hingga lebih dari 20% dibandingkan metode penyiraman terjadwal konvensional, sekaligus mempertahankan kondisi pertumbuhan tanaman pada titik optimal melalui pemrosesan mikrokontroler yang terdistribusi [12].

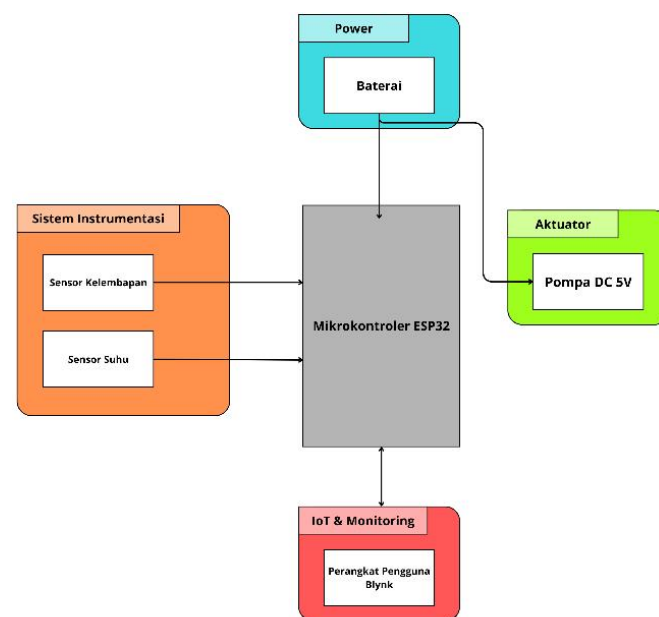
Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun dan menguji sistem irigasi cerdas yang mengintegrasikan metode logika *fuzzy* dengan teknologi IoT guna mempertahankan parameter kelembapan tanah dan suhu pada tingkat yang paling optimal bagi pertumbuhan tanaman melon. Diharapkan sistem ini dapat menyajikan solusi irigasi jarak jauh yang responsif, efisien dalam penggunaan air, dan mampu menggantikan sistem irigasi terjadwal yang konvensional.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode perancangan rekayasa kuantitatif yang berfokus pada pengembangan purwarupa (*prototype*) sistem kontrol penyiraman otomatis. Tahapan penelitian dibagi menjadi tiga bagian utama: perancangan perangkat keras (*hardware*), perancangan perangkat lunak (*software*) dengan algoritma logika *fuzzy*, dan pengujian sistem.

A. Perancangan sistem

Perancangan sistem memberikan gambaran umum mengenai arsitektur kerja dari purwarupa yang dibangun. Sistem ini terbagi menjadi beberapa blok fungsional yang berinteraksi untuk menjalankan tugas akuisisi data, komputasi keputusan, hingga eksekusi aktuator secara otomatis. Alur kerja dan interaksi antar blok fungsional tersebut secara ringkas direpresentasikan melalui diagram blok sistem.

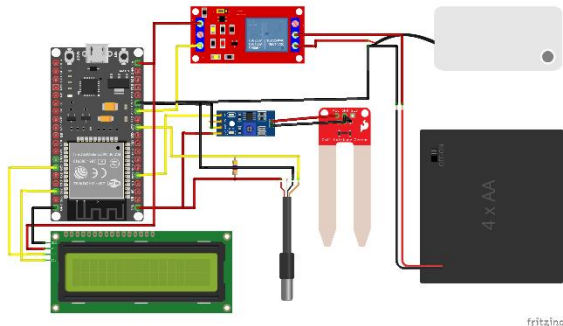


Gambar 1 Diagram blok sistem

Berdasarkan Gambar 1, arsitektur sistem secara keseluruhan terdiri dari lima blok utama yang saling berkesinambungan. Blok *power* menggunakan baterai sebagai sumber energi utama yang menyuplai tegangan DC ke mikrokontroler dan aktuator pompa. Selanjutnya, blok sistem instrumentasi yang terdiri dari sensor kelembapan tanah dan sensor suhu berfungsi untuk mendeteksi parameter lingkungan pada area perakaran dan kanopi tanaman melon secara riil. Data dari kedua sensor tersebut kemudian diteruskan menuju blok pusat kendali yang berotakan mikrokontroler ESP32. Di dalam pusat kendali inilah algoritma logika *fuzzy* dieksekusi untuk menentukan apakah blok aktuator, yaitu pompa air celup DC 5V, harus diaktifkan atau dimatikan. Secara paralel, ESP32 juga mentransmisikan data parameter pembacaan tersebut menuju blok *IoT* dan *monitoring* yang memanfaatkan platform antarmuka Blynk pada perangkat ponsel pintar pengguna, sehingga kondisi lahan dapat dipantau dari jarak jauh melalui konektivitas internet.

B. Perancangan perangkat keras

Perancangan perangkat keras mencakup integrasi komponen fisik elektronika dan penyusunan jalur kelistrikan (*wiring*) antar modul agar purwarupa dapat beroperasi sesuai dengan perancangan sistem. Pemetaan jalur komunikasi data dan distribusi daya harus dilakukan dengan presisi untuk menghindari malfungsi komponen dan memastikan akurasi pembacaan sensor. Konfigurasi kelistrikan dari sistem ini divisualisasikan secara komprehensif melalui skematik rangkaian perangkat keras.



Gambar 2 Diagram wiring alat

Berdasarkan skematik pada Gambar 2, interkoneksi perangkat keras berpusat pada mikrokontroler ESP32. ESP32 dipilih sebagai pusat kendali karena merupakan mikrokontroler berdaya rendah berarsitektur 32-bit yang telah terintegrasi dengan modul komunikasi *Wi-Fi*, sehingga sangat ideal untuk penerapan sistem *Internet of Things (IoT)*. Pada bagian instrumentasi, sistem menggunakan sensor suhu digital DS18B20 yang memiliki tingkat akurasi tinggi menggunakan protokol komunikasi 1-Wire, serta sensor kelembapan tanah analog tipe YL-69 yang bekerja dengan mengukur tingkat resistansi media tanam.

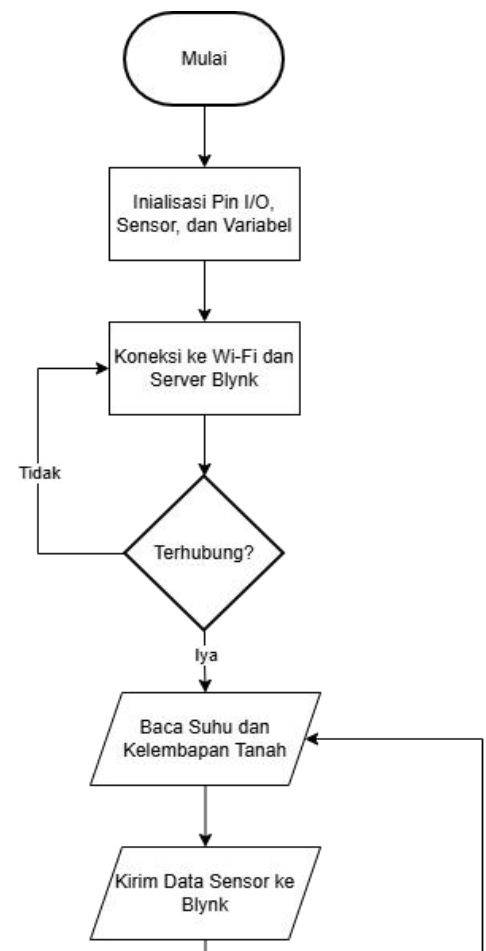
Pin tegangan (VCC) dan pin Ground dari sensor suhu DS18B20 maupun modul komparator sensor kelembapan tanah dihubungkan secara paralel ke pin 3V3 dan GND pada ESP32. Jalur data sensor kelembapan tanah dihubungkan ke pin GPIO 34 (D34) untuk membaca sinyal

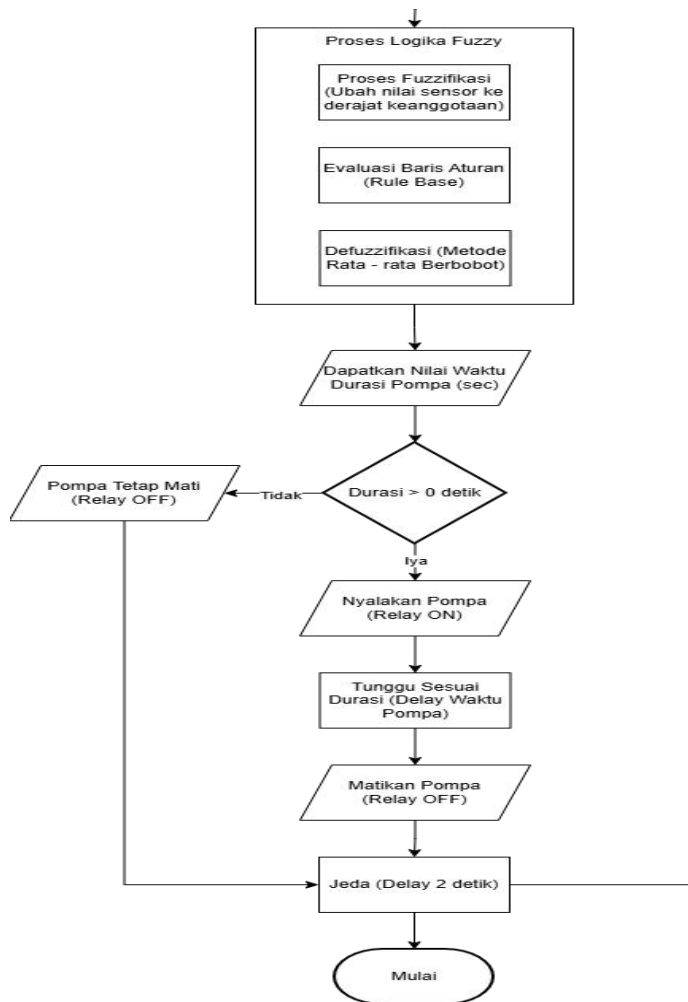
analog, sedangkan jalur data antarmuka 1-Wire dari sensor DS18B20 dihubungkan ke pin GPIO 4 (D4) yang telah dijumpatani dengan resistor pull-up 4,7 k Ω menuju jalur VCC.

Sistem ini juga dilengkapi aktuator berupa pompa air celup arus DC 5V yang dikendalikan melalui modul relay. Relay berfungsi sebagai saklar elektronik mekanis untuk memutus dan menghubungkan arus beban pompa menggunakan sinyal listrik tegangan rendah dari mikrokontroler. Untuk kebutuhan pemantauan data secara lokal, sistem menggunakan penampil LCD 16x2 berbasis antarmuka I2C (Inter-Integrated Circuit). Jalur daya modul I2C mengambil suplai dari pin VIN (V5) dan GND ESP32, sementara komunikasi datanya menggunakan pin GPIO 21 (D21) untuk jalur SDA dan pin GPIO 22 (D22) untuk jalur SCL.

C. Perancangan perangkat lunak

Perancangan perangkat lunak berfokus pada pengembangan algoritma program yang ditanamkan ke dalam mikrokontroler ESP32. Program ini ditulis menggunakan bahasa C/C++ pada *Integrated Development Environment (IDE)*. Fungsi utama dari perangkat lunak ini adalah mengatur siklus akuisisi data lingkungan, melakukan perhitungan kendali cerdas, serta mengelola komunikasi dua arah dengan server IoT Blynk. Alur kerja program secara berurutan dan logis direpresentasikan melalui diagram alir.





Gambar 3 Diagram alir sistem

Berdasarkan diagram alir pada Gambar 3, program dimulai dengan tahap inisialisasi pin *Input/Output* (I/O) dan koneksi mikrokontroler ke jaringan *Wi-Fi* lokal serta server Blynk. Setelah koneksi berhasil, sistem akan masuk ke dalam siklus pengulangan utama (*main loop*). Pada tahap ini, mikrokontroler membaca data nilai tegangan analog dari sensor kelembapan tanah dan data digital dari antarmuka *1-Wire* sensor suhu DS18B20. Kedua data metrik lingkungan tersebut kemudian dikirimkan ke platform Blynk untuk divisualisasikan pada layar ponsel pengguna. Selanjutnya, nilai suhu dan kelembapan yang telah terbaca dijadikan sebagai variabel masukan (*input*) untuk diproses di dalam sub-rutin algoritma logika *fuzzy*. Hasil dari pemrosesan tersebut berupa nilai durasi waktu dalam detik yang akan menginstruksikan modul *relay* untuk mengaktifkan aktuator pompa air DC (*output*), sebelum akhirnya siklus program kembali mengulang proses pembacaan sensor.

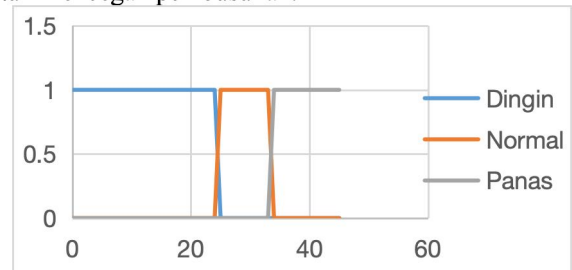
D. Perancangan logika fuzzy

Perancangan algoritma kecerdasan buatan pada penelitian ini menggunakan metode *Fuzzy Inference System* (FIS) Mamdani. Logika *fuzzy* merupakan metodologi komputasi yang efektif untuk memetakan ruang masukan dari pembacaan sensor ke dalam ruang keluaran (keputusan aktuator) menggunakan basis aturan (*rule base*) yang

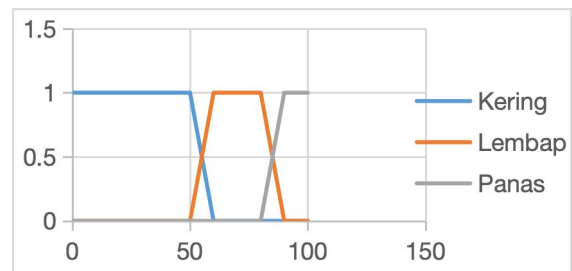
mengadopsi bahasa alami manusia. Algoritma ini diprogram secara langsung ke dalam memori mikrokontroler tanpa menggunakan pustaka (*library*) pihak ketiga guna memastikan proses komputasi berjalan secara efisien di dalam sistem tertanam. Proses implementasinya terbagi menjadi tiga tahapan komputasi utama:

1. Tahap fuzzifikasi

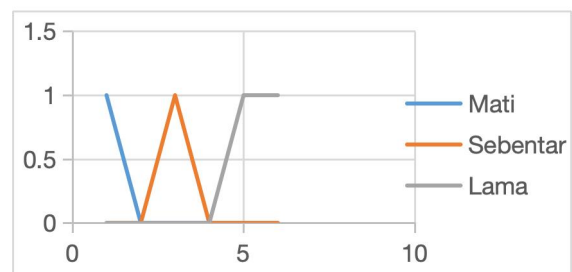
Tahap fuzzifikasi berfungsi memetakan nilai pembacaan tegas (*crisp input*) dari sensor suhu dan kelembapan tanah ke dalam derajat keanggotaan yang direpresentasikan melalui kurva linear. Penetapan batas himpunan fungsi keanggotaan pada kodingan sistem secara langsung merujuk pada kebutuhan fisiologis tanaman melon yang telah diuraikan. Batas himpunan suhu 'Normal' diperlebar hingga 33°C guna mengakomodasi fluktuasi wajar iklim tropis, di mana suhu >33°C (Panas) akan memicu stres tanaman. Pada variabel kelembapan, sistem menetapkan rentang 60%–80% sebagai kondisi 'Lembap' yang menjadi target ekuilibrium, memastikan aktuasi pompa merespons kondisi 'Kering' secara proporsional dan memutuskan arus sepenuhnya pada kondisi 'Basah' (>80%) untuk mencegah pembusukan.



Gambar 4 Grafik fungsi keanggotaan suhu



Gambar 5 Grafik fungsi keanggotaan kelembapan



Gambar 6 Grafik fungsi keanggotaan durasi pompa

Berdasarkan Gambar 4, variabel masukan pertama yaitu Suhu Udara dikategorikan ke dalam tiga himpunan:

- Dingin : Suhu kurang dari 25°C (<25°C)
- Normal : Suhu berada pada rentang 25°C hingga 33°C
- Panas : Suhu lebih dari 33°C (>33°C)

Variabel masukan kedua pada gambar 5, yaitu Kelembapan Tanah, diklasifikasikan ke dalam tiga himpunan linguistik berdasarkan persentase kadar air pada media tanam:

- Kering : Kadar air 0% hingga 50%
- Lembap : Kadar air 60% hingga 80%
- Basah : Kadar air 80% hingga 100%

Untuk variabel keluaran berupa Durasi Penyiraman Pompa pada gambar 6, penentuan *crisp value* didasarkan pada estimasi volume air yang optimal untuk mencegah pembusukan akar akibat genangan. Waktu aktif aktuator diklasifikasikan menjadi tiga parameter:

- Mati : 0 detik (Pompa mati)
- Sebentar : 5 detik
- Lama : 7 detik

2. Tahap evaluasi basis aturan (*rule base*)

Setelah himpunan fuzzy terbentuk, sistem melakukan tahap inferensi dengan mengevaluasi kondisi menggunakan struktur implikasi logika IF-THEN. Penyusunan 9 aturan (*rule base*) dalam logika fuzzy ini diformulasikan berdasarkan pendapat pakar praktisi budidaya hidroponik serta hasil observasi empiris terhadap respons tanaman melon terhadap cekaman kekeringan. Aturan ini dirancang secara spesifik dengan prinsip konservasi air: pompa air aktuator hanya akan dipaksa beroperasi paling lama (7 detik) jika terjadi kombinasi kritis antara suhu lingkungan yang panas dan kondisi media tanam yang kering kerontang. Sebaliknya, sistem secara otomatis akan memutus arus pompa (0 detik/Mati) pada seluruh kondisi tanah 'Basah' tanpa mempedulikan variabel suhu udara, guna menekan pemborosan air dan menghindari hipoksia pada akar. Operasi logika yang digunakan adalah operator AND, yang secara komputasi akan mengambil nilai minimum dari derajat keanggotaan kedua variabel masukan. Evaluasi ini menggunakan 9 kombinasi aturan yang dirancang untuk menjaga stabilitas kelembapan media tanam melon secara presisi, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel I.

TABEL I
MATRIKS RULE BASE LOGIKA FUZZY

Suhu Udara (input1)	Kelembapan Tanah (input2)	Durasi Penyiraman (output)
Dingin	Kering	Sebentar
Normal	Kering	Lama
Panas	Kering	Lama
Dingin	Lembap	Mati
Normal	Lembap	Sebentar
Panas	Lembap	Sebentar
Dingin	Basah	Mati
Normal	Basah	Mati
Panas	Basah	Mati

3. Tahap defuzzifikasi

Tahap komputasi terakhir adalah defuzzifikasi, di mana sistem mengonversi hasil inferensi linguistik kembali menjadi nilai tegas (*crisp output*) yang dapat dieksekusi oleh aktuator perangkat keras. Metode defuzzifikasi yang diterapkan pada mikrokontroler adalah metode Rata-rata Terbobot (*Weighted Average*). Sistem akan mengalkulasi nilai keluaran berdasarkan himpunan aturan yang aktif menggunakan persamaan matematis berikut:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (1)$$

Keterangan :

- Z = Nilai keluaran tegas (*crisp output*) berupa durasi akhir penyiraman pompa.
- α_i = Nilai minimum (*firing strength* / bobot parameter) dari aturan ke-i.
- z_i = Nilai ketetapan keluaran dari aturan ke-i (Mati = 0.0 s, Sebentar = 5.0 s, dan Lama = 7.0 s).
- n = Jumlah total aturan (*rules*).

Melalui persamaan ini, sistem dapat menghasilkan keputusan durasi penyiraman yang adaptif dan proporsional berdasarkan gabungan kondisi lingkungan secara *real-time*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil implementasi sistem

Prototipe sistem penyiraman otomatis terintegrasi Internet of Things (IoT) pada tanaman melon berbasis ESP32 telah berhasil dirancang dan direalisasikan sesuai dengan tahapan perancangan sistem yang telah dilakukan. Sistem ini mengintegrasikan berbagai komponen perangkat keras seperti mikrokontroler ESP32, sensor suhu DS18B20, sensor kelembapan tanah, modul relay 1-channel, pompa air celup arus DC 5V, serta modul pendukung catu daya (baterai) dalam satu kesatuan sistem kelistrikan.



Gambar 7 Prototipe perangkat keras sistem penyiraman otomatis

Gambar 7 menunjukkan hasil implementasi fisik prototipe yang telah dirakit. Sistem mampu melakukan fungsi utamanya secara terintegrasi, meliputi akuisisi data parameter lingkungan sensor suhu dan kelembapan tanah, eksekusi penyiraman air secara otomatis berdasarkan algoritma komputasi logika fuzzy, serta monitoring kondisi lahan secara *real-time* dari jarak jauh melalui aplikasi Blynk. Karena prototipe fisik ini dirakit untuk memvalidasi konsep fungsionalitas, penataan tata letak komponen masih

belum sepenuhnya rapi dan optimal. Meskipun demikian, seluruh fungsi sistem elektronika dan perangkat lunak telah berjalan dengan baik sesuai dengan perancangan awal.

B. Pengujian sensor suhu

Pengujian sensor suhu DS18B20 bertujuan untuk mengukur tingkat akurasi dan reliabilitas pembacaan suhu lingkungan di sekitar area kanopi tanaman melon. Pengujian ini dilakukan dengan cara mengkalibrasi dan membandingkan nilai suhu yang terbaca oleh sistem. Ditampilkan pada penampil LCD 16x2 dan aplikasi Blynk dengan instrumen ukur pembandingan, yaitu termometer digital standar. Pengambilan data sampel dilakukan pada waktu yang berbeda untuk mendapatkan variasi suhu lingkungan, kemudian dihitung selisih (*error*) pembacaannya. Hasil perbandingan pembacaan sensor ditunjukkan pada Tabel II.

TABEL II
HASIL PENGUJIAN SENSOR DS18B20

No	Termometer Digital	Sensor DS18B20	Error
1	28,1	28,4	0,3
2	30,4	30	0,4
3	31,6	31,2	0,4
4	27,8	28	0,2
5	33	32,7	0,3

Berdasarkan Tabel 2, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor suhu DS18B20 mampu membaca kondisi suhu lingkungan dengan tingkat presisi yang sangat baik. Rata-rata selisih pembacaan *error* antara sensor yang digunakan pada sistem dengan instrumen pembandingan hanyalah sebesar 0,4. Nilai toleransi kesalahan yang sangat kecil ini membuktikan bahwa sensor DS18B20 layak dan valid untuk digunakan sebagai variabel masukan (*input*) yang akurat pada sistem komputasi logika *fuzzy*.

C. Pengujian sensor kelembapan

Pengujian sensor kelembapan tanah dilakukan untuk memvalidasi respons pembacaan instrumen terhadap variasi kadar air di dalam media tanam. Karena sistem logika *fuzzy* yang dirancang bergantung pada parameter persentase batas kelembapan (Kering: 0%-50%, Lembap: 60%-80%, dan Basah: 80%-100%), maka pengujian ini difokuskan pada kemampuan sensor untuk membedakan ketiga kondisi fisik tanah tersebut. Pengujian direalisasikan dengan menancapkan *probe* sensor secara langsung pada tiga sampel media tanam melon dengan tingkat kejenuhan air yang direkayasa, mulai dari kondisi kering kerontang, kondisi disiram secukupnya, hingga kondisi tergenang lumpur. Hasil pengujian respons sensor ditunjukkan pada Tabel 3.

TABEL III
HASIL PENGUJIAN SENSOR KELEMBAPAN TANAH

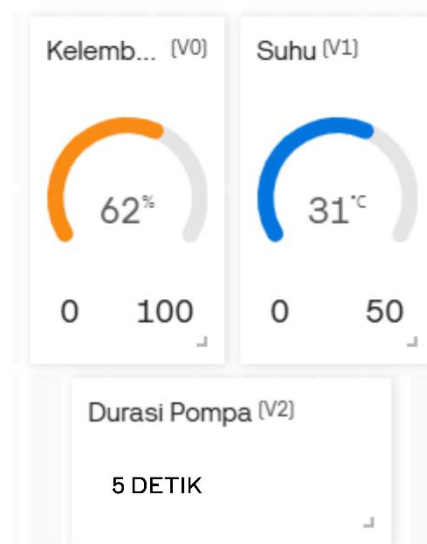
Kondisi Tanah	Pembacaan Sensor	Kategori Fuzzy
---------------	------------------	----------------

Tanah belum disiram	40%	Kering (0%-50%)
Tanah disiram sedikit air	71%	Lembap (60%-80%)
Tanah disiram hingga menggenang	96%	Basah (80%-100%)

Berdasarkan data pada Tabel 3, dapat dianalisis bahwa sensor kelembapan tanah berfungsi dengan optimal dalam mendeteksi dan mengonversi nilai resistansi tanah menjadi persentase kadar air. Modul sensor secara konsisten memberikan nilai pembacaan yang masuk ke dalam rentang parameter himpunan *fuzzy* yang telah diprogramkan di dalam mikrokontroler ESP32. Respons pembacaan ini memastikan bahwa sistem pusat kendali akan menerima data masukan keadaan tanah yang valid sebelum melakukan evaluasi aturan dan mengeksekusi durasi aktuasi pompa air.

D. Pengujian sistem IoT dan antarmuka Blynk

Pengujian fungsionalitas *Internet of Things (IoT)* bertujuan untuk mengevaluasi kinerja komunikasi data nirkabel antara mikrokontroler ESP32 dengan server awan (*cloud server*). Pengujian ini berfokus pada keberhasilan transmisi data telemetri dari sensor menuju platform antarmuka pemantauan jarak jauh, yaitu aplikasi Blynk pada ponsel cerdas.

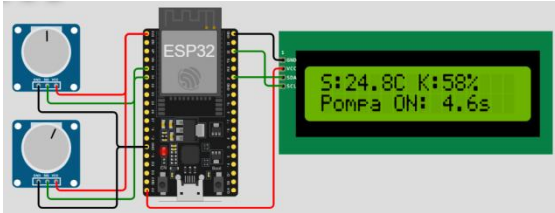


Gambar 8 Tampilan antarmuka aplikasi blynk pada ponsel

Berdasarkan implementasi pada Gambar 8, pengujian menunjukkan bahwa ESP32 berhasil membangun koneksi dengan jaringan *Wi-Fi* lokal dan melakukan proses otentikasi dengan server Blynk secara stabil. Data aktual mengenai suhu udara (°C) dan tingkat kelembapan media tanam (%) dapat divisualisasikan dengan baik melalui *widget* indikator pada layar. Pembaruan data berjalan secara *real-time* dengan waktu jeda pengiriman (*delay*) sekitar 200 ms yang sangat minim, mengindikasikan bahwa siklus komputasi di dalam program tidak membebani lalu lintas pengiriman data *IoT*.

E. Pengujian algoritma logika fuzzy

Untuk membuktikan keakuratan sistem mikrokontroler dalam mengolah algoritma logika fuzzy, dilakukan perbandingan antara hasil komputasi sistem dengan perhitungan matematis secara manual. Pengujian ini mengambil sampel skenario pembacaan sensor dengan nilai Suhu 24.8 °C dan Kelembapan 58%.



Gambar 9 Simulasi algoritma fuzzy logic menggunakan wokwi simulator

Algoritma logika fuzzy ini memiliki 3 proses, yaitu: proses fuzzifikasi, evaluasi aturan (*rule base*), dan proses defuzzifikasi.

1. Proses fuzzifikasi

Pada tahap ini, nilai tegas suhu 24.8 °C dan kelembapan 58% dihitung derajat keanggotaannya (μ) berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditetapkan dalam sistem.

- Parameter Suhu = 24.8 °C

Nilai 24.8 °C berada pada irisan himpunan Dingin dan Normal, maka:

$$\mu_{Dingin}(24.8) = \frac{25-24.8}{25-24} = 0.2 \quad (2)$$

$$\mu_{Normal}(24.8) = \frac{24.8-24}{25-24} = 0.8 \quad (3)$$

$$\mu_{Panas}(24.8) = 0 \quad (4)$$

- Parameter Kelembapan = 58%

Nilai 58% berada pada irisan himpunan Kering dan Lembap, maka:

$$\mu_{Kering}(24.8) = \frac{60-58}{60-50} = 0.2 \quad (5)$$

$$\mu_{Lembap}(24.8) = \frac{58-60}{60-50} = 0.8 \quad (6)$$

$$\mu_{Basah}(24.8) = 0 \quad (7)$$

Dengan kodingan sistem untuk proses fuzzifikasi sebagai berikut:

```
float fuzzifySuhuDingin(float s) {
    if (s <= 24.0) return 1.0;
    if (s >= 25.0) return 0.0;
    return (25.0 - s) / (25.0 - 24.0);
}

float fuzzifySuhuNormal(float s) {
    if (s <= 24.0 || s >= 34.0) return 0.0;
    if (s > 24.0 && s < 25.0) return (s - 24.0) / (25.0 - 24.0);
    if (s >= 25.0 && s <= 33.0) return 1.0;
    if (s > 33.0 && s < 34.0) return (34.0 - s) / (34.0 - 33.0);
    return 0.0;
}

float fuzzifySuhuPanas(float s) {
    if (s <= 33.0) return 0.0;
    if (s >= 34.0) return 1.0;
    return (s - 33.0) / (34.0 - 33.0);
}

float fuzzifyTanahKering(float k) {
    if (k <= 50.0) return 1.0;
    if (k >= 60.0) return 0.0;
    return (60.0 - k) / (60.0 - 50.0);
}

float fuzzifyTanahLembap(float k) {
    if (k <= 50.0 || k >= 90.0) return 0.0;
    if (k > 50.0 && k < 60.0) return (k - 50.0) / (60.0 - 50.0);
    if (k >= 60.0 && k <= 80.0) return 1.0;
    if (k > 80.0 && k < 90.0) return (90.0 - k) / (90.0 - 80.0);
    return 0.0;
}

float fuzzifyTanahBasah(float k) {
    if (k <= 80.0) return 0.0;
    if (k >= 90.0) return 1.0;
    return (k - 80.0) / (90.0 - 80.0);
}
```

Gambar 10 Kodingan proses fuzzifikasi

2. Proses evaluasi aturan (*rule base*)

Berdasarkan hasil fuzzifikasi, nilai derajat keanggotaan yang aktif lebih dari 0 dievaluasi menggunakan operator logika MIN terhadap aturan basis pengetahuan. Dari 9 aturan yang ada, terdapat 4 aturan yang aktif:

- Rule 1: Jika suhu Dingin (0.2) AND kelembapan Kering (0.2) maka pompa Sebentar.
 $a_1 = \min(0.2, 0.2) = 0.2$
- Rule 2: Jika suhu Normal (0.8) AND kelembapan Kering (0.2) maka pompa Lama.
 $a_2 = \min(0.8, 0.2) = 0.2$
- Rule 4: Jika suhu Dingin (0.2) AND kelembapan Lembap (0.8) maka pompa Mati.
 $a_3 = \min(0.2, 0.8) = 0.2$
- Rule 5: Jika suhu Normal (0.8) AND kelembapan Lembap (0.8) maka pompa Sebentar.
 $a_4 = \min(0.8, 0.8) = 0.8$

```
float hitungFuzzy(float suhu, float kelembapan) {
    float rule1 = min(fuzzifySuhuDingin(suhu), fuzzifyTanahKering(kelembapan));
    float rule2 = min(fuzzifySuhuNormal(suhu), fuzzifyTanahKering(kelembapan));
    float rule3 = min(fuzzifySuhuPanas(suhu), fuzzifyTanahKering(kelembapan));
    float rule4 = min(fuzzifySuhuDingin(suhu), fuzzifyTanahLembap(kelembapan));
    float rule5 = min(fuzzifySuhuNormal(suhu), fuzzifyTanahLembap(kelembapan));
    float rule6 = min(fuzzifySuhuPanas(suhu), fuzzifyTanahLembap(kelembapan));
    float rule7 = min(fuzzifySuhuDingin(suhu), fuzzifyTanahBasah(kelembapan));
    float rule8 = min(fuzzifySuhuNormal(suhu), fuzzifyTanahBasah(kelembapan));
    float rule9 = min(fuzzifySuhuPanas(suhu), fuzzifyTanahBasah(kelembapan));
}
```

Gambar 11 Kodingan evaluasi aturan (*rule base*)

3. Proses defuzzifikasi

Tahap defuzzifikasi dihitung menggunakan metode Rata-rata Terbobot (*Weighted Average*). Setiap nilai alpha (α) dikalikan dengan ketetapan durasi waktu untuk masing-masing keluaran, yaitu: Mati = 0.0 s, Sebentar = 5.0 s, dan

Lama = 7.0 s. Untuk proses defuzzifikasi ini menggunakan rumus yang sudah diberikan sebelumnya :

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (8)$$

Dengan rumus tersebut proses defuzzifikasi dihitung sebagai berikut:

$$Z = \frac{(a_1 \cdot z_1) + (a_2 \cdot z_2) + (a_4 \cdot z_4) + (a_5 \cdot z_5)}{a_1 + a_2 + a_3 + a_4} \quad (9)$$

$$Z = \frac{(0.2 \cdot 5) + (0.2 \cdot 7) + (0.2 \cdot 0) + (0.8 \cdot 5)}{0.2 + 0.2 + 0.2 + 0.8} \quad (10)$$

$$Z = \frac{1 + 1.4 + 0 + 4}{1.4} \quad (11)$$

$$Z = \frac{6.4}{1.4} = 4.57 \text{ atau } 4.6 \quad (12)$$

Guna membuktikan konsistensi performa sistem komputasi, pengujian algoritma juga dilakukan pada beberapa skenario yang merepresentasikan fluktuasi variasi kondisi lahan nyata. Validasi ini bertujuan untuk memastikan aktuasi keluaran adaptif dan tidak mengalami kegagalan logika (*logic error*) saat parameter lingkungan berubah. Ringkasan hasil pengujian skenario logika fuzzy ditunjukkan pada Tabel IV.

TABEL IV
HASIL PENGUJIAN SKENARIO LOGIKA FUZZY

Skenario	Suhu	Kelembapan Tanah	Kondisi Dominan	Hasil Durasi Pompa
1 (Kondisi Transisi)	40%	58,0%	Dingin/Normal - Kering/Lembap	4,57 detik
2 (Kondisi Panas)	71%	52,0%	Normal/Panas - Kering/Lembap	6,43 detik
3 (Kondisi Jenuh)	96%	92,3%	Normal - Basah	0,00 detik

Berdasarkan Tabel IV, mikrokontroler terbukti mampu mengeksekusi rule base dengan dinamis. Pada skenario 2 saat suhu memanaskan di angka 33,6°C dan kelembapan tanah turun di level 52,0%, sistem mengalkulasi berbagai irisan fungsi keanggotaan yang aktif dan merespons secara proporsional dengan mengaktifkan pompa selama 6,43 detik untuk mengejar defisit air. Sebaliknya, pada skenario 3 saat tanah jenuh hingga kelembapan 92,3%, sistem memutuskan daya aktuatur sepenuhnya (0 detik) meskipun suhu lingkungan berada pada tingkat normal (28,4°C).

Hasil pengujian skenario ini sekaligus mendemonstrasikan keunggulan metode logika fuzzy dibandingkan sistem kontrol berbasis ambang batas konvensional (ON/OFF threshold control). Pada kendali ON/OFF konvensional, pompa hanya diprogram untuk menyala dengan durasi statis saat kelembapan berada di bawah satu nilai set-point tertentu, tanpa mempertimbangkan faktor penguapan akibat suhu udara. Kelemahan ini sering memicu penyiraman berlebih

(overwatering). Melalui pendekatan komputasi fuzzy, sistem ESP32 pada purwarupa ini mampu beradaptasi, memodulasi waktu nyala pompa secara luwes (seperti 4,57 detik atau 6,43 detik) mengikuti tingkat keparahan kondisi, sehingga efisiensi air tercapai dan risiko hipoksia pada perakaran melon dapat dihindari sepenuhnya.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian sistem penyiraman otomatis terintegrasi *Internet of Things* (IoT) pada tanaman melon, dapat ditarik beberapa kesimpulan. Pertama, purwarupa perangkat keras berhasil beroperasi secara terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali. Instrumen sensor bekerja dengan sangat baik, dibuktikan oleh sensor suhu DS18B20 yang presisi dengan rata-rata selisih pembacaan (*error*) hanya sebesar 0,4 dibandingkan alat ukur digital, serta sensor kelembapan yang responsif membedakan kondisi kadar air tanah. Kedua, sistem pemantauan jarak jauh berbasis IoT berjalan stabil melalui aplikasi Blynk pada ponsel pintar, di mana sistem mampu mentransmisikan data metrik lingkungan secara *real-time* dengan waktu jeda pengiriman (*delay*) yang sangat minim yakni sekitar 200 ms. Ketiga, komputasi algoritma logika fuzzy dengan metode defuzzifikasi rata-rata terbobot terbukti berjalan adaptif dan akurat pada perangkat keras. Validasi matematis pada berbagai skenario fluktuasi lingkungan menunjukkan mikrokontroler mampu memodulasi durasi aktuasi pompa secara dinamis (seperti 4,57 detik hingga 6,43 detik pada saat kondisi kering) dan memutuskan arus sepenuhnya (0 detik) saat kelembapan tanah jenuh (>80%), yang ekuivalen dan presisi dengan perhitungan manual. Secara keseluruhan, sistem cerdas ini menyajikan solusi kendali aktuasi yang jauh lebih luwes dibandingkan metode irigasi ON/OFF konvensional, serta dirancang agar lebih efisien dalam menghemat penggunaan air guna mencegah pembusukan akar pada kondisi lahan nyata.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Ibu Lela Nurpulaela selaku dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, serta masukan konstruktif yang diberikan selama pelaksanaan penelitian hingga penyusunan jurnal ini. Apresiasi juga disampaikan kepada Program Studi Teknik Elektro dan Universitas Singaperbangsa Karawang atas dukungan akademik dan fasilitas yang telah diberikan, sehingga seluruh rangkaian penelitian dapat terlaksana secara sistematis dan berjalan dengan baik.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] M. E. Mondejar *et al.*, "Digitalization to achieve sustainable development goals: Steps towards a Smart Green Planet," *Sci. Total Environ.*, vol. 794, p. 148539, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.148539.
- [2] A. Rejeb, K. Rejeb, A. Abdollahi, F. Al-Turjman, and H. Treiblmaier, "The Interplay between the

- Internet of Things and agriculture: A bibliometric analysis and research agenda,” *Internet of Things*, vol. 19, p. 100580, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.iot.2022.100580.
- [3] R. Rayhana, G. Xiao, and Z. Liu, “Internet of Things Empowered Smart Greenhouse Farming,” *IEEE J. Radio Freq. Identif.*, vol. 4, no. 3, pp. 195–211, Sep. 2020, doi: 10.1109/JRFID.2020.2984391.
- [4] N. Lin, X. Wang, Y. Zhang, X. Hu, and J. Ruan, “Fertigation management for sustainable precision agriculture based on Internet of Things,” *J. Clean. Prod.*, vol. 277, p. 124119, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.124119.
- [5] E. Bwambale, F. K. Abagale, and G. K. Anornu, “Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review,” *Agric. Water Manag.*, vol. 260, p. 107324, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.agwat.2021.107324.
- [6] E. Sulistyono and H. Riyanti, “Volume Irigasi untuk Budidaya Hidroponik Melon dan Pengaruhnya terhadap Pertumbuhan dan Produksi,” *J. Agron. Indones. (Indonesian J. Agron.)*, vol. 43, no. 3, p. 213, Feb. 2016, doi: 10.24831/jai.v43i3.11247.
- [7] C. Jamroen, P. Komkum, C. Fongkerd, and W. Krongpha, “An Intelligent Irrigation Scheduling System Using Low-Cost Wireless Sensor Network Toward Sustainable and Precision Agriculture,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 172756–172769, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3025590.
- [8] R. A. Afriyani, D. Carsidi, F. Al Asad, P. Sumarna, and Y. Mahmud, “Respons Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Melon (Cucumis melo L.) Terhadap Macam Media Tanam Dan Pestisida Organik,” *Agro Wiralodra*, vol. 7, no. 1, pp. 15–26, 2024, doi: 10.31943/agrowiralodra.v7i1.105.
- [9] F. R. Saragih, “Sistem Pengairan dan Penghitungan Jumlah Penggunaan Air di Ladang Pertanian Melon Berbasis Internet Of Things,” *Techno Xplore J. Ilmu Komput. dan Teknol. Inf.*, vol. 8, no. 2, pp. 77–88, 2023, doi: 10.36805/technoxplore.v8i2.5881.
- [10] H. K. Ornek, *Artificial Intelligence Reflections in Agriculture*. 2024.
- [11] R. S. Krishnan *et al.*, “Fuzzy Logic based Smart Irrigation System using Internet of Things,” *J. Clean. Prod.*, vol. 252, p. 119902, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119902.
- [12] P. K. Kashyap, S. Kumar, A. Jaiswal, M. Prasad, and A. H. Gandomi, “Towards Precision Agriculture: IoT-Enabled Intelligent Irrigation Systems Using Deep Learning Neural Network,” *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 16, pp. 17479–17491, Aug. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3069266.