Perancangan Sistem Irigasi Otomatis Tanaman Singkong Berbasis Internet of Things (IoT) dengan Metode Fuzzy Logic dan Protokol MQTT

Ananda Adhi Surya*[1], Alauddin Maulana Hirzan[2]
Universitas Semarang, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia 50196
e-mail: [1]anandaadi335@gmail.com, [2]maulanahirzan@usm.ac.id
*Penulis Korespondensi

Diterima: 26 Mei 2026; Direvisi: 29 Juni 2026; Disetujui: 7 Juli 2026

Abstrak

Tanaman singkong (Manihot esculenta Crantz) membutuhkan pengelolaan irigasi yang optimal untuk menjaga kelembaban tanah sesuai kebutuhan pertumbuhan. Penyiraman yang dilakukan secara manual memiliki keterbatasan dalam menyesuaikan perubahan kondisi lingkungan secara real-time, sehingga berpotensi menyebabkan penggunaan air menjadi kurang efisien. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengimplementasikan sistem irigasi otomatis berbasis Internet of Things (IoT) yang mengintegrasikan metode Fuzzy Logic Mamdani dengan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Sistem dirancang dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32 yang diintegrasikan dengan Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2, sensor DHT22, sensor BH1750, serta sensor debit air YF-S401. Berdasarkan hasil pengujian, sistem berhasil menjalankan pemantauan kondisi lingkungan sekaligus mengendalikan proses penyiraman secara otomatis dalam real-time. Nilai kelembaban tanah tercatat pada rentang 33,2%–84,8% dengan rata-rata 73,31%, suhu udara 28,6°C–29,4°C dengan rata-rata 28,96°C, kelembaban udara 84,7%–88,3% dengan rata-rata 86,48%, serta intensitas cahaya 225,17–362,01 lux dengan rata-rata 303,05 lux. Pemanfaatan metode Fuzzy Logic Mamdani memungkinkan sistem menyesuaikan keputusan penyiraman terhadap perubahan kelembaban tanah dan suhu lingkungan. Selain itu, protokol MQTT mampu mendukung komunikasi data yang ringan, stabil, dan responsif selama sistem beroperasi. Sistem yang dihasilkan berpotensi mendukung pengelolaan irigasi yang lebih efisien dalam penggunaan air serta mendorong penerapan smart farming pada budidaya tanaman singkong.

Kata kunci: *internet of things (iot), irigasi otomatis, singkong, fuzzy logic, mqtt.*

Abstract

Cassava (Manihot esculenta Crantz) requires effective irrigation management to maintain soil moisture according to plant growth requirements. Manual irrigation is considered less efficient because it cannot adapt to environmental changes in real time and may lead to excessive water consumption. This study aimed to develop and implement an Internet of Things (IoT)-based automatic irrigation system that integrates the Fuzzy Logic Mamdani method with the Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol. The proposed system was designed around an ESP32 microcontroller integrated with Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2, DHT22, BH1750, and YF-S401 water flow sensors. The evaluation results indicated that the proposed system successfully performed real-time environmental monitoring and automatic irrigation contro. Soil moisture values ranged from 33.2% to 84.8% with an average of 73.31%, air temperature ranged from 28.6°C to 29.4°C with an average of 28.96°C, air humidity ranged from 84.7% to 88.3% with an average of 86.48%, and light intensity ranged from 225.17 to 362.01 lux with an average of 303.05 lux. By applying the Fuzzy Logic Mamdani method, the system was able to adjust irrigation decisions according to changes in soil moisture and ambient temperature. In addition, the MQTT protocol provided lightweight, stable, and responsive data communication during system operation. Overall, the proposed system shows potential to enhance water-use efficiency and promote the adoption of smart farming practices in cassava cultivation.

Keywords*: internet of things (iot), automatic irrigation, cassava, fuzzy logic, mqtt.*

This is an open access article under the CC–BY-SA license.

I. PENDAHULUAN

Pemanfaatan *Internet of Things* (IoT) pada sektor pertanian terus mengalami perkembangan sebagai solusi untuk membangun sistem pemantauan dan pengendalian yang bekerja secara otomatis berdasarkan kondisi lingkungan. Melalui konektivitas internet, teknologi ini mampu menghubungkan berbagai perangkat untuk memperoleh, mengirimkan, serta mengolah data secara *real-time*, sehingga mendukung implementasi *smart farming* yang lebih optimal, adaptif, serta berkesinambungan [1], [2].

Singkong (*Manihot esculenta Crantz*) merupakan komoditas pertanian penting di Indonesia yang dimanfaatkan sebagai sumber pangan, pakan ternak, maupun bahan baku berbagai sektor manufaktur sehingga memberikan nilai ekonomi yang cukup besar. Walaupun tanaman ini dikenal memiliki kemampuan beradaptasi pada kondisi lahan yang relatif kering, kebutuhan air tetap harus diperhatikan, terutama selama fase awal pertumbuhan dan pembentukan umbi. Pada tahapan tersebut, kecukupan air berperan dalam mendukung akumulasi biomassa, perkembangan akar, serta proses pembesaran umbi yang pada akhirnya menentukan tingkat produktivitas tanaman [3], [4].

Sejumlah penelitian sebelumnya telah memanfaatkan teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam pengembangan sistem irigasi otomatis yang dapat melakukan pemantauan kondisi lingkungan sekaligus mengatur proses penyiraman tanaman. Hasil penelitian pada referensi [5], [6], [7], dan [8] memperlihatkan bahwa penerapan IoT memberikan kontribusi terhadap peningkatan kualitas pemantauan serta penggunaan air secara lebih efisien pada kegiatan budidaya. Di samping itu, integrasi sensor temperatur dan kelembaban tanah dengan website pemantauan memungkinkan informasi kondisi lingkungan tanaman ditampilkan secara otomatis maupun *real-time*, sehingga mempermudah kegiatan pemantauan oleh pengguna [9], [10].

Pada sistem irigasi otomatis yang menerapkan *Internet of Things* (IoT), metode *Fuzzy Logic* banyak dimanfaatkan sebagai mekanisme pengambilan keputusan karena mampu menyesuaikan pengendalian penyiraman dengan perubahan kondisi lahan, berbeda dengan pendekatan yang hanya menggunakan nilai ambang (*threshold*) tetap. Berdasarkan hasil penelitian pada referensi [11], [12], [13], [14], dan [15] penerapan metode tersebut mampu menghasilkan pengendalian penyiraman yang lebih responsif terhadap variasi kelembaban tanah maupun suhu lingkungan. Temuan lain pada penelitian [16], [17] juga memperlihatkan bahwa kombinasi sensor dengan metode *Fuzzy Logic* pada sistem *smart greenhouse* maupun pemantauan kondisi tanah dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan pertanian berbasis teknologi.

Hasil penelitian pada referensi [18]. menunjukkan bahwa pemanfaatan sensor kelembaban tanah mampu menyediakan informasi kondisi tanah secara akurat sehingga kebutuhan penyiraman dapat ditentukan secara otomatis sesuai tingkat kelembaban yang terukur. Sistem irigasi berbasis Internet of Things (IoT) juga telah diterapkan pada berbagai komoditas, antara lain tomat, bawang, jagung, tanaman hias, *greenhouse*, dan hidroponik. Berbagai penelitian tersebut melaporkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mengoptimalkan penggunaan air serta menjaga kestabilan kondisi lingkungan tumbuh sehingga tanaman tetap berada pada kondisi yang optimal.

Keberhasilan penerapan sistem berbasis *Internet of Things* (IoT) tidak hanya ditentukan oleh perangkat keras dan sensor yang digunakan, tetapi juga oleh protokol komunikasi yang menangani proses pertukaran data. Salah satu protokol yang banyak digunakan ialah *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) karena memiliki mekanisme komunikasi yang ringan, andal, serta mampu mempertahankan respons pengiriman data dengan baik. Penelitian pada referensi [19] menunjukkan bahwa penggunaan MQTT memungkinkan informasi hasil pembacaan sensor dikirim dari mikrokontroler menuju sistem pemantauan berbasis web secara real-time melalui koneksi internet.

Berdasarkan telaah terhadap penelitian-penelitian sebelumnya, implementasi sistem irigasi otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) masih didominasi pada komoditas hortikultura, antara lain tomat, bawang, jagung, tanaman hias, *greenhouse*, dan hidroponik. Kajian tersebut umumnya lebih menitikberatkan pada fungsi pemantauan kondisi lingkungan maupun otomatisasi penyiraman, sedangkan penerapan metode *Fuzzy Logic* Mamdani yang dipadukan dengan protokol MQTT pada budidaya tanaman singkong masih sangat terbatas. Atas dasar kesenjangan tersebut, penelitian ini menawarkan kebaruan (*novelty*) berupa perancangan sistem irigasi otomatis berbasis IoT yang mengombinasikan metode *Fuzzy Logic* Mamdani sebagai mekanisme pengambilan keputusan penyiraman dengan protokol MQTT sebagai media komunikasi data untuk menyediakan proses pemantauan secara *real-time* pada budidaya tanaman singkong.

Sistem yang dirancang memanfaatkan ESP32 sebagai unit pengendali yang diintegrasikan dengan *Capacitive Soil Moisture Sensor* V1.2, sensor DHT22, sensor BH1750, serta sensor debit air YF-S401 untuk melakukan akuisisi data kondisi lingkungan secara berkelanjutan. Data yang diperoleh selanjutnya diolah

menggunakan metode *Fuzzy Logic* guna menghasilkan keputusan pengendalian penyiraman berdasarkan tingkat kelembaban tanah dan suhu udara. Selain itu, protokol MQTT dimanfaatkan sebagai media komunikasi data antara perangkat dengan website pemantauan sehingga informasi hasil monitoring dapat disajikan secara real-time melalui website yang terintegrasi dengan basis data MySQL.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem irigasi pada budidaya singkong berbasis *Internet of Things (IoT)* melalui penerapan metode *Fuzzy Logic* Mamdani sebagai mekanisme pengambilan keputusan penyiraman serta protokol MQTT sebagai media komunikasi data. Sistem yang dirancang diharapkan mampu menyediakan proses pemantauan kondisi lingkungan budidaya secara *real-time*, mengoptimalkan penggunaan air irigasi, serta mendukung implementasi *smart farming* dalam budidaya tanaman singkong.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan metode yang disusun secara bertahap sebagai pedoman dalam pengembangan, implementasi, serta evaluasi sistem irigasi otomatis. Rangkaian penelitian diawali dengan identifikasi kebutuhan sistem, dilanjutkan dengan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, implementasi metode *Fuzzy Logic Mamdani*, integrasi komunikasi berbasis *Internet of Things* (IoT) melalui protokol MQTT, serta diakhiri dengan pengujian dan evaluasi kinerja sistem yang dikembangkan. Tahapan penelitian meliputi penentuan jenis dan lokasi penelitian, perancangan sistem, implementasi metode *Fuzzy Logic*, proses pengambilan data, hingga pengujian sistem secara menyeluruh.

A. Jenis dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode *engineering research* dengan metode eksperimen untuk mengembangkan serta mengevaluasi sistem irigasi otomatis pada budidaya tanaman singkong berbasis *Internet of Things* (IoT). Tahap eksperimen dilaksanakan guna menguji kinerja sistem dalam memantau kondisi budidaya, mengolah data pembacaan sensor serta mengendalikan proses penyiraman secara otomatis sesuai kondisi aktual di lapangan. Agar keputusan penyiraman lebih adaptif terhadap perubahan kelembaban tanah, sistem mengimplementasikan metode *Fuzzy Logic* Mamdani sebagai mekanisme penentuan aksi pengendalian.

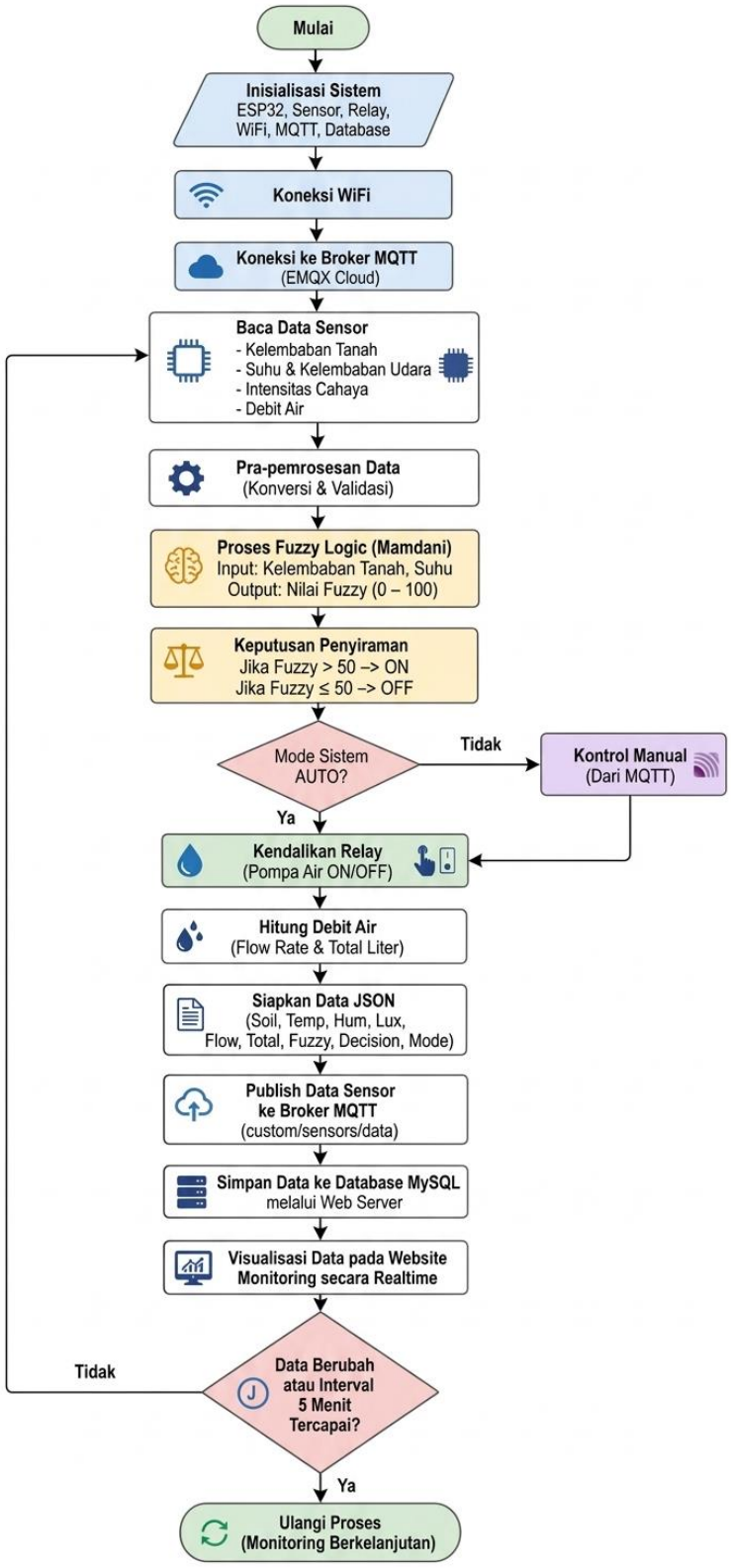
B. Perancangan Sistem

Perancangan sistem dilakukan melalui beberapa tahapan pengembangan yang dimulai dari identifikasi kebutuhan sistem, penyusunan arsitektur perangkat, integrasi sensor dengan mikrokontroler ESP32, penerapan metode *Fuzzy Logic* Mamdani, implementasi komunikasi data berbasis MQTT, hingga pengujian dan evaluasi kinerja sistem yang dibangun.

Sistem dikembangkan dengan konsep *Internet of Things* (IoT) yang mengintegrasikan sensor, mikrokontroler, aktuator, media komunikasi, basis data, dan website pemantauan dalam satu platform terintegrasi. Pada arsitektur tersebut, ESP32 berfungsi sebagai unit kendali untuk membaca data seluruh sensor, mengolah data menggunakan metode *Fuzzy Logic* Mamdani, kemudian meneruskan hasil pemantauan menuju server menggunakan protokol MQTT agar dapat disajikan secara *real-time* pada website pemantauan.

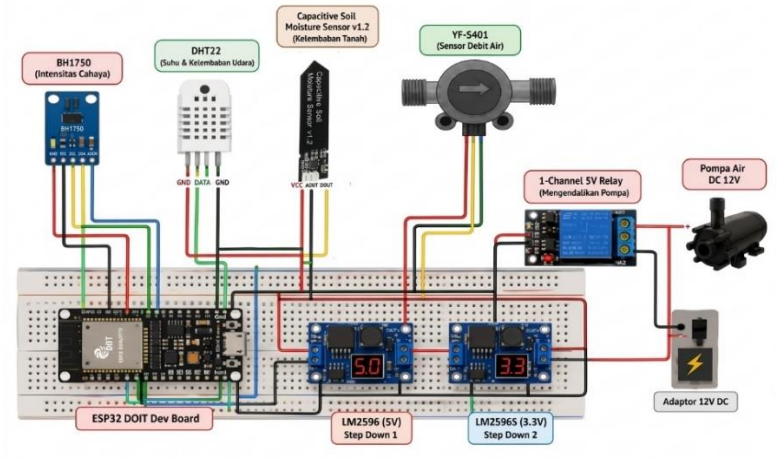
Pada rancangan yang ditunjukan pada Gambar 1, data kelembaban tanah dijadikan parameter utama untuk menentukan keputusan penyiraman. Selain itu, kondisi budidaya dipantau menggunakan sensor DHT22 untuk memperoleh nilai temperatur dan kelembaban udara. Sedangkan sensor BH1750 digunakan untuk mengukur intensitas cahaya. Sensor debit air YF-S401 dimanfaatkan untuk mengamati laju aliran air ketika proses irigasi berlangsung.

Aktivasi maupun penghentian pompa air dikendalikan oleh relay 1 kanal berdasarkan keluaran proses inferensi *Fuzzy Logic* Mamdani. Informasi yang diperoleh dari setiap sensor terlebih dahulu diolah menggunakan ESP32, kemudian dikirim ke *broker* MQTT EMQX Cloud agar dapat ditampilkan pada situs web pemantauan secara *real-time*. Selanjutnya, seluruh informasi hasil pemantauan disimpan ke basis data MySQL melalui peladen lokal berbasis XAMPP sehingga riwayat proses monitoring dapat terdokumentasi dengan baik.



Gambar 1. Diagram *flowchart* sistem irigasi otomatis berbasis IoT

Perangkat keras yang diterapkan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2 meliputi papan pengembang ESP32 DOIT Dev Board yang berperan sebagai unit pengendali sistem, *Capacitive Soil Moisture Sensor* V1.2, DHT22, BH1750, sensor debit air YF-S401, relay 1 kanal 5 V, pompa air DC 12 V, serta modul *step-down* LM2596 dan LM2596S yang dimanfaatkan untuk menyesuaikan tegangan keluaran sehingga memenuhi kebutuhan operasi setiap perangkat.



Gambar 2. Purwarupa sistem irigasi otomatis berbasis *internet of things* (IoT)

Pengembangan sisi perangkat lunak dilaksanakan dengan memanfaatkan Arduino IDE sebagai lingkungan pengembangan untuk mikrokontroler ESP32. Proses pemantauan melalui situs web dijalankan menggunakan peladen lokal XAMPP yang terkoneksi dengan basis data MySQL sehingga seluruh informasi hasil pengukuran sensor dapat disimpan secara *real-time*. Adapun spesifikasi perangkat keras beserta perangkat lunak yang diterapkan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi sistem yang digunakan

No.	Komponen	Tipe/Spesifikasi	Fungsi
1	Mikrokontroler	ESP32 DOIT Dev Board	Pusat kendali sistem
2	Sensor kelembaban tanah	Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2	Mengukur tingkat kelembapan tanah
3	Sensor suhu dan kelembaban	DHT22	Mengukur suhu serta kelembapan udara
4	Sensor intensitas cahaya	BH1750	Mengukur intensitas cahaya
5	Sensor debit air	YF-S401	Mengukur debit aliran air
6	Modul Relay	Relay 1 Channel 5V	Mengatur operasi pompa air
7	Pompa air	Pompa DC 12V	Menyalurkan air irigasi
8	Modul *Step Down*	LM2596 dan LM2596S	Menyesuaikan kebutuhan tegangan perangkat

Berdasarkan spesifikasi tersebut, seluruh komponen kemudian dirakit dan diintegrasikan menjadi sistem irigasi otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk mendukung budidaya tanaman singkong. Implementasi sistem meliputi pemasangan sensor, mikrokontroler ESP32, relay, pompa air, serta jaringan irigasi yang terhubung dengan situs web pemantauan sehingga seluruh parameter operasional dapat dimonitor secara *real-time* yang dapat doilihat pada Gambar 3.



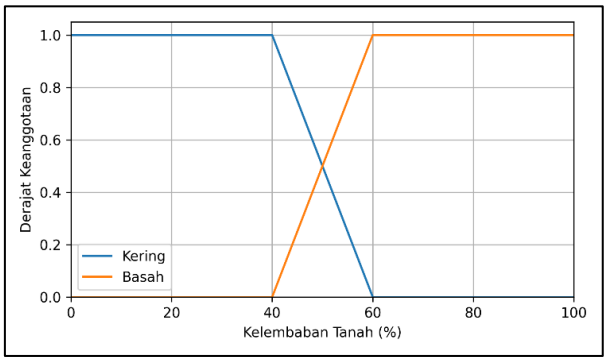
Gambar 3. Implementasi sistem irigasi otomatis pada lahan perkebunan

C. Metode Fuzzy Logic

Metode *Fuzzy Logic* Mamdani digunakan sebagai mekanisme pengambilan keputusan dalam menetapkan tindakan penyiraman dengan memanfaatkan dua variabel masukan, yaitu kelembapan tanah serta suhu udara. Pendekatan ini dipilih karena mampu memodelkan ketidakpastian kondisi lingkungan ke dalam bentuk variabel linguistik sehingga proses pengambilan keputusan menjadi lebih adaptif dibandingkan

pendekatan yang hanya mengandalkan nilai ambang (*threshold*) tetap. Metode ini dilaksanakan melalui tiga tahapan, yaitu fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi, yang secara bertahap menghasilkan keputusan pengendalian penyiraman.

Tahap defuzzifikasi menerapkan metode *weighted average* untuk mengubah keluaran proses inferensi menjadi nilai tegas (*crisp value*). Nilai akhir diperoleh melalui perhitungan rata-rata berbobot dengan memanfaatkan derajat aktivasi (*firing strength*) dari setiap aturan sebagai bobot sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (5). Pada implementasinya, variabel keluaran ditetapkan menjadi dua nilai konsekuen, yaitu 100 yang menunjukkan kondisi pompa aktif (*ON*) dan 0 yang menunjukkan kondisi pompa tidak aktif (*OFF*). Selanjutnya, kedua nilai konsekuen tersebut dihitung menggunakan metode *weighted average* sehingga diperoleh *crisp output* yang digunakan sebagai acuan dalam pengendalian pompa air.

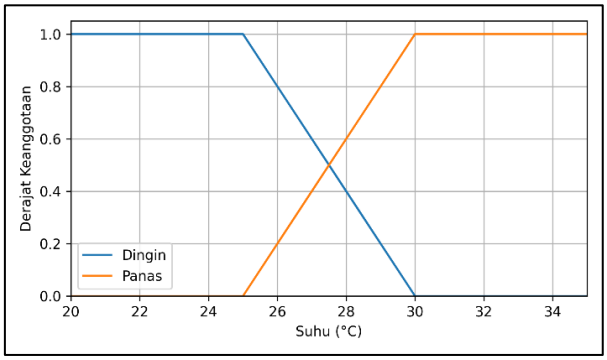


Gambar 4. Kurva fungsi keanggotaan variabel kelembaban tanah

Karakteristik kurva keanggotaan pada parameter kelembapan tanah dalam Gambar 4 dijelaskan menggunakan Persamaan (1) dan Persamaan (2).

$$\mu_{\text{kering}}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 40 \\ \frac{60-x}{20}, & 40 < x < 60 \\ 0, & x \geq 60 \end{cases} \tag{1}$$

$$\mu_{\text{basah}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 40 \\ \frac{x-40}{20}, & 40 < x < 60 \\ 1, & x \geq 60 \end{cases} \tag{2}$$



Gambar 5. Kurva keanggotaan variabel suhu udara

Representasi matematis kurva keanggotaan untuk parameter suhu udara dari Gambar 5 disajikan melalui Persamaan (3) dan Persamaan (4).

$$\mu_{\text{dingin}}(T) = \begin{cases} 1, & T \leq 25 \\ \frac{30-T}{5}, & 25 < T < 30 \\ 0, & T \geq 30 \end{cases} \tag{3}$$

$$\mu_{\text{panas}}(T) = \begin{cases} 0, & T \leq 25 \\ \frac{T-25}{5}, & 25 < T < 30 \\ 1, & T \geq 30 \end{cases} \quad (4)$$

Pada tahap inferensi diterapkan operator MIN untuk memperoleh derajat aktivasi (*firing strength*) setiap aturan berdasarkan kombinasi derajat keanggotaan parameter kelembapan tanah serta suhu udara. Kumpulan aturan inferensi yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Basis aturan *Fuzzy Logic* Mamdani

Kelembaban Tanah	Suhu	Keputusan
Kering	Panas	*ON*
Kering	Dingin	*ON*
Basah	Panas	*OFF*
Basah	Dingin	*OFF*

Penyusunan aturan pada Tabel 2 didasarkan pada kondisi kelembaban tanah sebagai parameter utama yang dipadukan dengan suhu udara sebagai faktor pendukung dalam proses pengambilan keputusan. Pompa diaktifkan apabila tanah berada pada kondisi kering agar kebutuhan air tanaman tetap terpenuhi, sedangkan pada kondisi tanah basah pompa dinonaktifkan untuk mencegah pemberian air secara berlebihan.

Tahap defuzzifikasi menerapkan metode *weighted average* untuk mengubah keluaran proses inferensi menjadi nilai tegas (*crisp value*). Nilai tersebut dihitung menggunakan pendekatan rata-rata berbobot dengan menjadikan derajat aktivasi (*firing strength*) dari masing-masing aturan sebagai bobot sesuai Persamaan (5).

$$z = \frac{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i z_i}{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i} \quad (5)$$

Dengan:

z : nilai keluaran (*crisp output*);

α_i : derajat aktivasi (*firing strength*) untuk aturan ke- i;

z_i : nilai keluaran yang dihasilkan oleh aturan ke- i.

Nilai hasil defuzzifikasi berada pada rentang 0 hingga 100 dan digunakan sebagai dasar penentuan status pompa air. Apabila nilai keluaran melebihi 50 maka pompa diaktifkan, sedangkan nilai yang sama dengan atau lebih kecil dari 50 menunjukkan bahwa pompa tetap berada pada kondisi tidak aktif sesuai Persamaan (6).

$$\text{Decision} = \begin{cases} \text{ON}, & z^* > 50, \\ \text{OFF}, & z^* \leq 50. \end{cases} \quad (6)$$

Penerapan metode *Fuzzy Logic* Mamdani memungkinkan sistem menetapkan keputusan penyiraman berdasarkan kondisi kelembapan tanah serta suhu udara yang diperoleh melalui proses pemantauan secara *real-time*. Melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi, sistem mampu mengendalikan proses penyiraman secara adaptif sehingga pemanfaatan air menjadi lebih efisien sekaligus memenuhi kebutuhan tanaman.

D. Pengumpulan Data dan Pengujian Sistem

Pengumpulan data dilaksanakan menggunakan sistem pemantauan yang telah diintegrasikan dengan seluruh sensor serta mikrokontroler ESP32. Data yang dicatat mencakup nilai kelembapan tanah, suhu udara, kelembapan udara, intensitas cahaya, debit aliran air, dan status operasional pompa air. Seluruh data sensor diolah secara otomatis oleh ESP32 sebelum ditransmisikan melalui protokol MQTT ke situs web pemantauan. Selanjutnya, data tersebut disimpan pada basis data MySQL secara *real-time*. Proses akuisisi data dilakukan secara berkala setiap lima menit selama sistem beroperasi.

Sebelum memasuki tahap analisis, data hasil pemantauan terlebih dahulu divalidasi untuk menghilangkan data yang tidak memenuhi kriteria, seperti hasil pembacaan pada saat inisialisasi sensor maupun nilai yang masih berfluktuasi. Tahap berikutnya berupa pengujian sistem untuk mengevaluasi kinerja serta tingkat keandalannya. Pengujian meliputi evaluasi kestabilan pembacaan sensor, respons relay dan pompa air, keandalan komunikasi data melalui MQTT, serta kemampuan metode *Fuzzy Logic* Mamdani dalam menetapkan keputusan penyiraman berdasarkan kondisi lingkungan yang dibaca oleh sensor.

Seluruh hasil pengujian kemudian dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif guna mengevaluasi performa sistem dalam melakukan pemantauan kondisi lingkungan secara berkesinambungan, menjaga kestabilan kelembapan tanah, serta meningkatkan efisiensi proses penyiraman pada budidaya tanaman singkong.

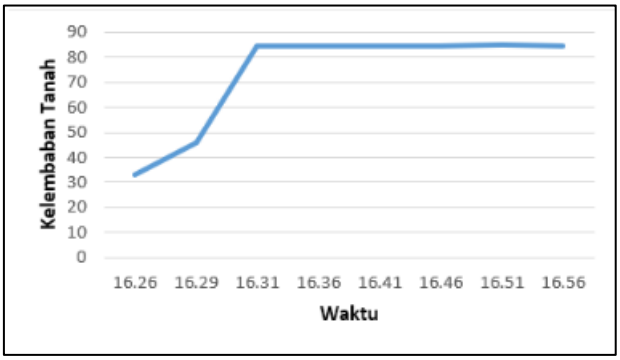
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilaksanakan untuk mengevaluasi performa sistem irigasi otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dirancang dalam melakukan pemantauan kondisi lingkungan sekaligus mengendalikan penyiraman tanaman singkong menggunakan metode *Fuzzy Logic* Mamdani. Evaluasi dilakukan dengan menganalisis beberapa parameter, meliputi kelembapan tanah, suhu udara, kelembapan udara, intensitas cahaya, debit aliran air, serta status operasional pompa. Seluruh data yang diperoleh dari sensor diproses oleh ESP32, kemudian ditransmisikan melalui protokol MQTT menuju situs web pemantauan dengan interval pengiriman setiap lima menit. Selanjutnya, data disimpan pada basis data MySQL sebagai penyimpanan riwayat hasil pengamatan sekaligus digunakan untuk analisis kinerja sistem.

Berdasarkan hasil pemantauan yang ditunjukan pada Tabel 3, nilai kelembapan tanah yang diukur menggunakan *Capacitive Soil Moisture Sensor* V1.2 berada pada rentang 33,2% hingga 84,8% dengan rata-rata sebesar 73,31%. Nilai rata-rata tersebut menunjukkan bahwa kelembapan tanah selama periode pengamatan secara umum berada dalam kisaran yang mendukung pertumbuhan tanaman singkong. Variasi hasil pengukuran yang ditunjukkan oleh simpangan baku sebesar 21,06% mengindikasikan adanya perubahan kelembapan sebagai dampak dinamika kondisi lingkungan serta respons sistem penyiraman otomatis. Temuan tersebut menunjukkan bahwa metode *Fuzzy Logic* Mamdani mampu menyesuaikan keputusan penyiraman berdasarkan perubahan kondisi kelembapan tanah yang terpantau secara berkelanjutan.

Tabel 3. Statistik deskriptif kelembaban tanah

No.	Parameter	Nilai
1	Minimum	33,2%
2	Maksimum	84,8%
3	Rata-rata	73,31%
4	Simpangan Baku	21,06%



Gambar 6. Kelembaban tanah

Gambar 6 memperlihatkan perubahan nilai kelembaban tanah selama proses pengujian sistem. Ketika kelembaban turun hingga mencapai nilai terendah sebesar 33,2%, metode *Fuzzy Logic* Mamdani menghasilkan keputusan untuk mengaktifkan pompa air sebagai respons terhadap kondisi tanah yang mulai mengering. Setelah irigasi berlangsung, kandungan air di dalam tanah meningkat secara bertahap hingga berada pada kisaran 84%, sehingga sistem menghentikan penyiraman secara otomatis karena kondisi kelembaban telah memenuhi kriteria yang ditetapkan. Pola perubahan tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu menyesuaikan proses irigasi secara dinamis sesuai hasil pembacaan sensor, sehingga kelembaban tanah tetap berada dalam kisaran yang relatif stabil selama periode pengamatan.

Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa keputusan penyiraman tidak dilakukan berdasarkan nilai ambang tetap (*fixed threshold*), melainkan mempertimbangkan hasil inferensi *Fuzzy Logic* Mamdani yang mengakomodasi perubahan kondisi kelembaban tanah secara bertahap. Pendekatan ini menghasilkan proses

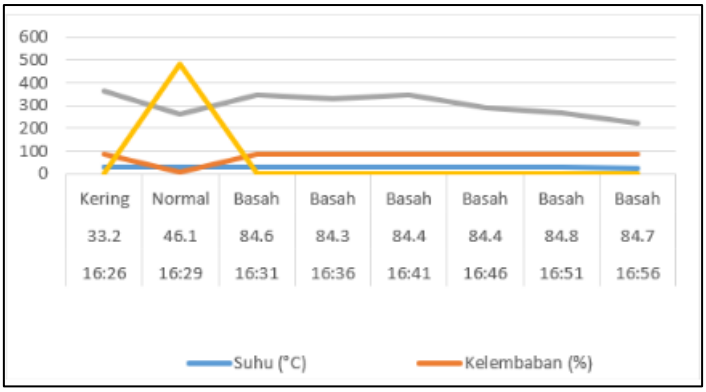
penyiraman yang lebih fleksibel dibandingkan metode konvensional karena pompa hanya bekerja ketika kondisi tanah benar-benar memerlukan penambahan air, sehingga potensi penggunaan air secara berlebihan dapat dikurangi

Selain mengukur kelembapan tanah, sistem melakukan pemantauan terhadap parameter suhu udara, kelembapan udara, serta intensitas cahaya menggunakan sensor DHT22 dan BH1750 untuk memperoleh informasi mengenai kondisi lingkungan. Selama pengujian berlangsung, suhu udara berada pada rentang 28,6°C–29,4°C dengan nilai rata-rata sebesar 28,96°C. Sementara itu, kelembapan udara tercatat berkisar antara 84,7% hingga 88,3% dengan rata-rata 86,48%. Pengukuran intensitas cahaya menghasilkan nilai dalam rentang 225,17 lux hingga 362,01 lux dengan rata-rata sebesar 303,05 lux. Kisaran nilai tersebut mengindikasikan bahwa kondisi lingkungan selama pengujian cenderung stabil sehingga keputusan penyiraman yang dihasilkan oleh metode *Fuzzy Logic* Mamdani lebih dipengaruhi oleh perubahan kelembapan tanah dibandingkan variasi suhu udara maupun intensitas cahaya.

Perubahan data yang direkam oleh setiap sensor mengindikasikan bahwa sistem mampu melakukan pemantauan kondisi lingkungan secara berkesinambungan. Seluruh data sensor kemudian ditransmisikan melalui protokol MQTT menuju situs web pemantauan sehingga informasi dapat ditampilkan kepada pengguna secara *real-time*. Sebagai ilustrasi proses tersebut, beberapa contoh data hasil pengukuran sensor beserta status pompa selama pengujian disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Sampel data monitoring sistem irigasi otomatis

Waktu	Kelembaban Tanah (%)	Status Tanah	Suhu (°C)	Kelembaban Udara (%)	Intensitas Cahaya (Lux)	Keputusan *Fuzzy* (%)	Status Pompa
16:26	33,2	Kering	29,4	84,7	362,01	99,99	*ON*
16:29	46,1	Normal	29,2	85,1	264,08	99,88	*ON*
16:31	84,6	Basah	29	86,7	345,17	0	*OFF*
16:36	84,3	Basah	29	86,8	327,75	0	*OFF*
16:41	84,4	Basah	28,9	86,5	348,08	0	*OFF*
16:46	84,4	Basah	28,9	86,9	290,05	0	*OFF*
16:51	84,8	Basah	28,7	86,8	267,08	0	*OFF*
16:56	84,7	Basah	28,6	88,3	225,17	0	*OFF*



Gambar 7. Sampel data *monitoring* sistem irigasi otomatis

Gambar 7 memperlihatkan hubungan antara perubahan kelembaban tanah dengan keputusan penyiraman yang dihasilkan oleh metode *Fuzzy Logic* Mamdani. Pada kondisi awal ketika kelembaban tanah berada pada nilai 33,2% (kategori kering), sistem menghasilkan nilai keluaran sebesar 99,99 sehingga pompa air diaktifkan. Seiring meningkatnya kelembaban tanah setelah proses irigasi berlangsung, nilai keluaran metode *Fuzzy Logic* menurun hingga mencapai 0 ketika kelembaban tanah telah memasuki kategori basah. Pola tersebut mengindikasikan bahwa keputusan pengendalian pompa selalu menyesuaikan kondisi aktual yang dibaca sensor, sehingga penyiraman dilakukan hanya ketika tanah memerlukan tambahan air kemudian dihentikan setelah kelembaban kembali berada pada kisaran yang diinginkan.

Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa mekanisme pengambilan keputusan tidak bergantung pada satu nilai ambang (*fixed threshold*), melainkan memanfaatkan proses inferensi *Fuzzy Logic* Mamdani yang mempertimbangkan kondisi kelembaban tanah secara bertahap. Pendekatan ini menghasilkan proses penyiraman yang lebih fleksibel sebab pompa diaktifkan hanya ketika kelembaban tanah benar-benar

memerlukan penambahan air. Oleh karena itu, pemanfaatan air menjadi semakin efisien dibandingkan metode penyiraman yang beroperasi berdasarkan batas kelembaban tetap.

Penerapan metode *Fuzzy Logic* Mamdani menghasilkan mekanisme pengendalian penyiraman yang mampu menyesuaikan keputusan berdasarkan kombinasi kelembaban tanah serta suhu udara. Pendekatan tersebut membuat sistem tidak hanya mengandalkan satu nilai ambang (*threshold*), melainkan mengevaluasi perubahan parameter lingkungan secara bertahap sebelum menentukan tindakan penyiraman. Nilai keluaran (*fuzzy output*) yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar pengaktifan maupun penghentian pompa air, sehingga proses irigasi berlangsung lebih responsif terhadap kondisi aktual di lapangan.

Temuan pada penelitian ini memperlihatkan kecenderungan yang konsisten dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Walid dkk. [10] dan Pogasang [13] yaitu bahwa implementasi *Fuzzy Logic* mampu memberikan mekanisme penyiraman yang semakin adaptif apabila dibandingkan dengan pendekatan berbasis nilai ambang (*threshold*) tetap. Tidak seperti kedua studi tersebut, sistem yang dirancang pada penelitian ini mengintegrasikan pendekatan *Fuzzy Logic* Mamdani, komunikasi data menggunakan protokol MQTT, serta website pemantauan sehingga proses inferensi, transmisi data sensor, dan pemantauan kondisi lahan berlangsung dalam satu platform secara *real-time*. Integrasi tersebut tidak hanya mendukung proses penentuan keputusan penyiraman yang mampu merespons perubahan kondisi lingkungan, tetapi juga meningkatkan kemudahan pengguna dalam memonitor kondisi lahan melalui penyajian data historis yang tersimpan pada basis data MySQL.

Selain mendukung mekanisme pengendalian penyiraman, implementasi protokol MQTT melalui broker EMQX Cloud menunjukkan bahwa komunikasi data antara ESP32 dan website pemantauan dapat berlangsung secara stabil selama proses pengujian. Setiap pembacaan sensor beserta status pompa berhasil diteruskan ke sistem pemantauan dan ditampilkan kepada pengguna secara *real-time*, sehingga perubahan kondisi lingkungan dapat diamati tanpa jeda yang berarti. Integrasi ESP32, protokol MQTT, server lokal XAMPP, dan basis data MySQL juga mendukung penyimpanan data historis secara otomatis, sehingga informasi hasil monitoring dapat dimanfaatkan sebagai dasar evaluasi kinerja sistem maupun analisis kondisi lahan pada periode pengamatan berikutnya.

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa aktivasi pompa air sepenuhnya ditentukan oleh hasil evaluasi metode *Fuzzy Logic* terhadap kondisi kelembaban tanah. Pompa bekerja ketika nilai kelembaban menunjukkan kebutuhan penyiraman dan secara otomatis berhenti setelah tanah mencapai kondisi basah. Mekanisme tersebut menunjukkan bahwa proses irigasi berlangsung secara adaptif berdasarkan data sensor yang diperoleh secara *real-time*, sehingga pemberian air lebih terarah sesuai kondisi aktual lahan tanpa melakukan penyiraman secara terus-menerus.

Website pemantauan yang dikembangkan berperan sebagai media visualisasi seluruh data hasil pengukuran sensor, mencakup kelembaban tanah, suhu udara, kelembaban udara, intensitas cahaya, debit aliran air, akumulasi penggunaan air, beserta status pompa yang diperbarui secara *real-time*. Melalui dashboard ini, pengguna dapat mengamati perubahan kondisi lingkungan pada tanaman tanpa harus berada di lokasi, sehingga kegiatan pengawasan sistem menjadi semakin praktis tanpa memerlukan observasi langsung di lahan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh komponen sistem telah terintegrasi dan bekerja sesuai dengan rancangan. Data hasil pembacaan sensor diproses menggunakan metode *Fuzzy Logic* Mamdani, dikirim melalui protokol MQTT, disimpan pada basis data MySQL, kemudian ditampilkan pada website pemantauan secara *real-time*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mendukung pemantauan kondisi lingkungan serta pengendalian penyiraman tanaman singkong secara otomatis dan adaptif selama proses pengujian.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sebuah rangkaian irigasi otomatis untuk tanaman singkong berbasis *Internet of Things* (IoT) yang memadukan pendekatan *Fuzzy Logic* Mamdani dan protokol MQTT. Hasil implementasi mengindikasikan bahwa integrasi ESP32 beserta sensor lingkungan, relay serta pompa air, website pemantauan, beserta basis data MySQL mampu mendukung proses pemantauan terhadap kondisi lingkungan sekaligus pengendalian proses penyiraman secara otomatis dalam satu platform terintegrasi.

Pengujian sistem membuktikan bahwa proses pemantauan kondisi lingkungan berjalan secara *real-time* dengan rentang kelembaban tanah 33,2%–84,8% (rata-rata 73,31%), suhu udara 28,6°C–29,4°C (rata-rata 28,96°C), kelembaban udara 84,7%–88,3% (rata-rata 86,48%), serta intensitas cahaya 225,17–362,01 lux

(rata-rata 303,05 lux). Seluruh data hasil pembacaan sensor berhasil diteruskan melalui protokol MQTT, tersimpan pada basis data MySQL, dan ditampilkan pada website pemantauan, agar informasi kondisi lingkungan bisa diakses secara *real-time* selama sistem beroperasi.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa metode *Fuzzy Logic* Mamdani menghasilkan keputusan penyiraman yang adaptif berdasarkan kondisi kelembaban tanah dan suhu udara. Pompa hanya diaktifkan saat tanah memerlukan penyiraman dan berhenti ketika kelembaban telah mencapai kategori basah, sehingga sistem berpotensi mengoptimalkan penggunaan air dibandingkan penyiraman manual.

Secara keseluruhan, integrasi *Fuzzy Logic* Mamdani, protokol MQTT, dan website pemantauan menghasilkan sistem irigasi otomatis yang mampu beroperasi secara adaptif dan *real-time*. Sistem ini berpotensi mendukung penerapan *smart farming* pada budidaya singkong melalui pengelolaan penyiraman yang lebih efisien serta penyediaan informasi mengenai kondisi lingkungan secara berkelanjutan.

Studi ini berkontribusi terhadap pengembangan sistem irigasi berbasis *Internet of Things* (IoT) yang memadukan pendekatan *Fuzzy Logic* Mamdani dengan protokol MQTT guna mendukung pengambilan keputusan penyiraman secara adaptif disertai komunikasi data *real-time*. Keterbatasan penelitian ini terletak pada penggunaan sepasang parameter masukan, yakni kelembaban tanah serta suhu udara, sehingga faktor lingkungan lain belum diakomodasi dalam proses pengambilan keputusan. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem pada skala lahan yang lebih luas, memperpanjang periode pengujian, menambahkan parameter lingkungan yang relevan, serta membandingkan performa metode *Fuzzy Logic* Mamdani dengan pendekatan kecerdasan buatan lainnya guna meningkatkan akurasi penyiraman.

DAFTAR PUSTAKA

[1] P. S. Ningsi, "Peran Smartfarming, IoT, dan Pertanian Presisi dalam Mewujudkan Ketahanan Pangan Berkelanjutan," *Interface: Journal of Multidisciplinary*, vol. 1, no. 1, pp. 22–36, 2025.

[2] F. Dirayati, R. A. Sari, and R. F. Purnomo, "Perancangan dan Implementasi Sistem Smart Agriculture Berbasis Internet of Things untuk Meningkatkan Produktivitas Pertanian," *Jurnal Media Informatika (JUMIN)*, vol. 6, no. 2, pp. 863–872, Jan. 2025, doi: 10.55338/jumin.v6i2.4982.

[3] S. Hardiani, Suwarto, and D. P. Hapsari, "Pertumbuhan Varietas Ubi Kayu (Manihot esculenta Crantz.) pada Perlakuan Irigasi Simulasi Kondisi Bulan Kering," *Bul. Agrohorti*, vol. 12, no. 2, pp. 216–226, May 2024, doi: 10.29244/agrob.v12i2.51536.

[4] P. Sanjaya, I. S. Banuwa, A. K. Basri, A. Afandi, S. Surnayanti, and N. W. Masruri, "Pengaruh Guludan dan Pemupukan Terhadap Aliran Permukaan dan Erosi pada Pertanaman Singkong (Manihot Esculenta Crantz) Tahun Ketujuh," *JAT*, vol. 11, no. 3, pp. 531–537, Sep. 2023, doi: 10.23960/jat.v11i3.7737.

[5] Cokorda Agung Yujana, I Kadek Agus Wahyu Raharja, and I Made Surya Kumara, "TIRTA (Teknologi IoT untuk Irigasi Terkendali dan Automasi): Sistem Irigasi Pintar Berbasis IoT dengan Kontrol Otomatis dan Penjadwalan Dinamis," *Jurnal Abdi Daya*, vol. 5, no. 2, pp. 53–62, Dec. 2025, doi: 10.22225/jad.5.2.2025.53-62.

[6] F. Ananda, R. W. Arsianti, A. Fadllhullah, A. Pradana, and D. Harto, "Sistem Irigasi Otomatis pada Tanaman Hias Berbasis Internet of Thing," *Jurnal Otomasi*, vol. 1, no. 2, pp. 60–67, Oct. 2021, doi: 10.55123/otomasi.v1i2.674.

[7] Dani Rofianto *et al.*, "IoT-Based Smart Irrigation and Fertilization System with Realtime Cloud Integration," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 15, no. 1, pp. 34–43, Feb. 2026, doi: 10.22146/jnteti.v15i1.23124.

[8] A. Thoriq, L. H. Pratopo, R. M. Sampurno, and S. H. Shafiyullah, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban Tanah Berbasis Internet of Things," *Jurnal Keteknikan Pertanian*, vol. 10, no. 3, pp. 268–280, 2022, doi: 10.19028/jtep.10.3.268-280.

[9] M. A. Azzani, "Sistem Kontrol Suhu dan Kelembaban Tanah Pada Irigasi Tetes Berbasis Internet of Things (IoT) Pada Tanaman Selada Merah," Undergraduate Thesis, Universitas Islam Malang, Malang, Indonesia, 2023.

[10] M. Walid, M. Ashar, and M. H. Wahyudi, "Smart Drip Irrigation System Based on IoT Using Fuzzy Logic," *INTENSIF: Jurnal Ilmiah Penelitian dan Penerapan Teknologi Sistem Informasi*, vol. 8, no. 1, pp. 52–67, Feb. 2024, doi: 10.29407/intensif.v8i1.21351.

[11] K. A. Saragih and R. Kurniawan, "Sistem Penyiraman Otomatis Berbasis IoT dengan Logika Fuzzy Sugeno untuk Pengendalian Kelembaban Tanah di Greenhouse," *Jurnal Algoritma*, vol. 22, no. 1, pp. 808–819, Jun. 2025, doi: 10.33364/algoritma/v.22-1.2327.

[12] N. Nuruddin, M. Walid, and M. Makruf, "Sistem Cerdas Irigasi Sprinkler Pada Tanaman Bawang Berbasis Iot Menggunakan Logika Fuzzy: Sistem Cerdas Irigasi Sprinkler Pada Tanaman Bawang Berbasis Iot Menggunakan Logika Fuzzy," *Jurnal Sistem Komputer dan Kecerdasan Buatan (SISKOM-KB)*, vol. 8, no. 1, pp. 71–76, Feb. 2025, doi: 10.47970/siskom-kb.v8i1.671.

[13] J. Pogasang, G. Gunawan, and L. Surimi, "SISTEM CERDAS IRIGASI MENGGUNAKAN METODE FUZZY LOGIC PADA TANAMAN TOMAT," *AnoaTIK*, vol. 2, no. 2, pp. 90–93, Dec. 2024, doi: 10.33772/anoatik.v2i2.69.

[14] A. M. Shobri, B. M. Basuki, and A. Habibi, "Penerapan Irigasi Alur Tanaman Jagung Menggunakan Metode Fuzzy Logic Berbasis Internet of Things di Desa Bringin, Kediri," *SCIENCE ELECTRO*, vol. 19, no. 1, pp. 152–163, Sep. 2025.

[15] H. Ardiansyah, M. Shodiq, M. A. Mahbubillah, and R. Agustina, "Optimasi Durasi pada Sistem Irigasi Tetes dengan Sensor Kelembaban dan Suhu Tanah Menggunakan Logika Fuzzy Takagi-Sugeno," *Techne*, vol. 24, no. 1, pp. 73–88, Jun. 2025, doi: 10.31358/techne.v24i1.562.

[16] T. A. Hariyantia, H. Yutanto, and Y. Effendi, "Pemanfaatan IoT dan Algoritma Fuzzy Logic untuk Optimalisasi Penyiraman: Studi Kasus pada Smart Greenhouse," *Djtechno: Jurnal Teknologi Informasi*, vol. 6, no. 3, pp. 849–858, Dec. 2025, doi: 10.46576/djtechno.v6i3.7080.

[17] A. W. Hakis, A. L. Arda, and A. Jalil, "IoT-based Soil Nutrient Monitoring and Control Using Fuzzy Logic and Multi-Modal Sensor Integration," *JAIC*, vol. 9, no. 5, pp. 2736–2745, Oct. 2025, doi: 10.30871/jaic.v9i5.10575.

[18] I. A. Azam, H. Pujiharsono, and S. Indriyanto, "Sistem Irigasi Tetes Menggunakan Sensor Kelembapan Tanah YL-69 Berbasis Internet of Things (IoT)," *Jurnal Teodolita: Media Komunikasi Ilmiah di Bidang Teknik*, vol. 24, no. 1, pp. 65–73, Jun. 2023, doi: 10.53810/jt.v24i1.477.

[19] M. Umam, S. Adi Wibowo, and Y. Agus Pranoto, "Implementasi Protokol MQTT pada Aplikasi Smart Garden Berbasis IoT (Internet of Things)," *Jurnal Informatika dan Teknologi Informasi (JATI)*, vol. 7, no. 1, pp. 899–906, Jun. 2023, doi: 10.36040/jati.v7i1.6131.