

SISTEM PENYIRAMAN OTOMATIS TANAMAN CABAI RAWIT BERBASIS IOT MENGGUNAKAN METODE FUZZY MAMDANI

Farrel Paksi Aditya^{1*}, Nabila Putri Asy Syifa², Eldoni Mosul³, Susilawati⁴

^{1,2,3,4}Universitas Singaperbangsa Karawang, Jl.HS.Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat 41361, Telp.(0267) 641177

Keywords:

Fuzzy Mamdani;
Internet of Things;
MQTT;
Cabai Rawit;
Penyiraman Tanaman
Otomatis.

Correspondent Email:

2210631170068@student.unsika.ac.id

Abstrak. Tanaman Cabai Rawit (*Capsicum frutescens*) memerlukan kondisi kelembaban tanah yang spesifik berkisar antara 60-70% dan suhu ideal 21-27°C untuk pertumbuhan optimal. Penyiraman manual seringkali tidak presisi, menyebabkan *over-watering* (tanah kelebihan air) atau kekeringan yang menghambat produktivitas. Penelitian ini bertujuan merancang sistem penyiraman otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) yang menerapkan logika *Fuzzy Mamdani* untuk menentukan durasi penyiraman berdasarkan ketidakpastian kondisi lingkungan. Sistem dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 yang berkomunikasi melalui protokol MQTT ke server berbasis Node.js. Antarmuka pengguna dikembangkan menggunakan Express.js dan Tailwind CSS untuk pemantauan secara *real-time*. Metode *Fuzzy Mamdani* memproses input dari sensor kelembaban tanah dan suhu udara melalui 9 basis aturan (*rule base*) untuk menghasilkan output durasi penyiraman yang presisi. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu menjaga kelembaban tanah pada rentang ideal 60-70% secara otomatis. Penerapan arsitektur Node.js dan MQTT terbukti meningkatkan efisiensi transmisi data dan respon sistem dibandingkan metode *polling* konvensional.



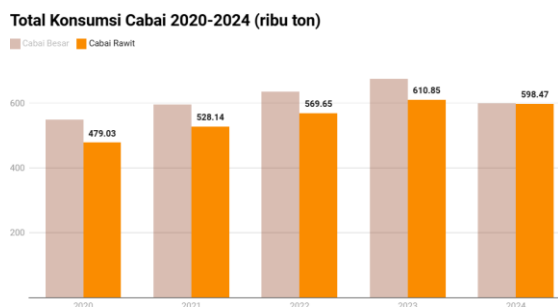
Copyright © 2026 The Author(s), Published by Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

Abstract. Cayenne Pepper (*Capsicum frutescens*) requires specific soil moisture conditions ranging from 60-70% and an ideal temperature of 21-27°C for optimal growth. Manual watering is often imprecise, leading to *over-watering* or dryness which hinders productivity. This study aims to design an *Internet of Things* (IoT) based automatic watering system that applies Fuzzy Mamdani logic to determine watering duration based on environmental uncertainty. The system is built using an ESP32 microcontroller communicating via the MQTT protocol to a Node.js-based server. The user interface is developed using Express.js and Tailwind CSS for real-time monitoring. The Fuzzy Mamdani method processes inputs from soil moisture and air temperature sensors through 9 rule bases to generate precise watering duration outputs. Test results show the system is able to maintain soil moisture in the ideal range of 60-70% automatically. The implementation of Node.js and MQTT architecture is proven to increase data transmission efficiency and system response compared to conventional polling methods.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara agraris yang memiliki potensi pertanian sangat besar, meliputi komoditas utama seperti padi, jagung, kedelai, coklat, serta berbagai jenis tanaman, sayuran, dan buah-buahan [1]. Dalam Sektor pertanian dan perkebunan memegang peran penting dalam perekonomian Indonesia, tercermin dari besarnya jumlah masyarakat yang bergantung pada bidang pertanian ini. Secara geografis, Indonesia berada di wilayah tropis dengan curah hujan tinggi, sehingga berbagai jenis tanaman dapat tumbuh subur, berkembang dengan cepat, dan menghasilkan produksi yang melimpah [2].

Salah satu potensi pertanian pada jenis sayuran adalah tanaman cabai rawit. Tanaman cabai rawit merupakan salah satu potensi pertanian yang sangat besar di Indonesia. Kondisi lingkungan, topografi, serta kondisi iklim Indonesia sangat mendukung untuk pembudidayaan tanaman cabai rawit [3].



Gambar 1. Konsumsi Cabai Rawit di Indonesia

(Sumber : CNBC Indonesia, 2025)

Berdasarkan data pada Gambar 1 dari Badan Pusat Statistik melalui laman CNBC Indonesia, konsumsi cabai rawit rumah tangga di Indonesia menunjukkan peningkatan bertahap dari tahun 2020 hingga 2023, yaitu dari 479,03 ribu ton menjadi 610,85 ribu ton. Namun, pada tahun 2024 konsumsi cabai rawit mengalami penurunan menjadi 598,47 ribu ton atau turun sekitar 2,03% dari tahun sebelumnya [4].

Salah satu faktor penting dalam pertumbuhan tanaman cabai adalah kondisi kelembaban tanah serta suhu udara di sekitarnya. Kelembaban tanah perlu dijaga agar ketersediaan air tetap seimbang karena kekurangan maupun kelebihan air dapat

mengganggu proses penyerapan hara dan berdampak pada perkembangan tanaman [5].

Penyiraman menjadi komponen yang sangat menentukan, sebab tanaman membutuhkan air yang cukup untuk proses fotosintesis serta pertumbuhan secara optimal. Oleh karena itu, petani harus memantau kondisi tanaman untuk mencegah ketidakseimbangan air, mengingat kelembaban tanah merupakan parameter krusial dalam proses hidrologi, biologi, dan biogeokimia. Selain itu, suhu udara juga berpengaruh signifikan karena suhu yang terlalu rendah dapat menghambat pertumbuhan, sedangkan suhu yang tinggi tanpa penyiraman yang memadai akan membatasi suplai unsur hara. [6].

Cabai rawit (*Capsicum frutescens* L.) merupakan salah satu komoditas hortikultura yang memiliki nilai ekonomis tinggi dan banyak dikonsumsi oleh berbagai lapisan masyarakat, khususnya di Indonesia [7]. Selain nilai ekonomisnya, cabai rawit mengandung senyawa penting seperti capsaicin, karotenoid, asam askorbat, minyak atsiri, resin, dan flavonoid yang bermanfaat bagi kesehatan [8]. Oleh karena itu, cabai rawit sering dimanfaatkan tidak hanya sebagai bahan pangan rumah tangga, tetapi juga sebagai bahan baku industri makanan, minuman, hingga obat-obatan [9].

Meskipun permintaannya tinggi, budidaya cabai rawit menghadapi berbagai tantangan yang memengaruhi kualitas dan kuantitas hasil panen. Salah satu tantangan utama adalah perubahan iklim ekstrem, khususnya musim panas berkepanjangan yang menyebabkan kekeringan [10]. Risiko produksi akibat faktor alam ini menyebabkan fluktuasi harga yang tidak menentu, sehingga petani seringkali menghadapi risiko harga yang merugikan [11].

Dalam upaya mitigasi risiko tersebut, penyiraman menjadi aspek vital untuk menjaga kelembaban tanah yang ideal bagi fotosintesis dan penyerapan nutrisi. Namun, metode penyiraman manual dinilai tidak efektif karena petani tidak dapat memantau kondisi lahan selama 24 jam, yang seringkali menyebabkan ketidakkonsistenan kondisi tanah [12]. Maka dengan, penyiraman otomatis dapat diterapkan menggunakan sensor kelembaban tanah dan sensor suhu, dimana sensor kelembaban berfungsi mendeteksi kondisi kadar air dalam tanah, sedangkan sensor suhu digunakan untuk

memantau temperatur di sekitar tanaman cabai [13]. Hal ini diperkuat oleh penelitian Roziqin et al. yang menunjukkan bahwa penerapan sistem otomatis berbasis mikrokontroler dan sensor kelembaban terbukti mampu menjaga kondisi tanah tetap optimal bagi tanaman cabai dibandingkan intervensi manual [14]. Tanaman cabai rawit membutuhkan kondisi spesifik untuk tumbuh optimal, dengan referensi umum menyatakan kelembaban ideal berkisar 60-70% [15] dan suhu 21-27°C [16]. Dalam penelitian ini, parameter tersebut digunakan sebagai acuan untuk presisi yang lebih tinggi.

Penerapan teknologi Internet of Things (IoT) menawarkan solusi untuk pengawasan dan pengendalian pertanian secara nirkabel dan efisien, sebagaimana telah banyak diterapkan pada sistem penyiraman otomatis terdahulu [17]. Namun, sistem kendali konvensional seringkali kesulitan menangani ketidakpastian kondisi lingkungan. Oleh karena itu, metode Fuzzy Logic Mamdani dipilih karena kemampuannya mengakomodasi ketidakpastian data sensor dan meniru pengambilan keputusan manusia, yang terbukti lebih efektif dibandingkan metode lain dalam beberapa kasus [18]. Prinsip linguistik dalam Fuzzy Mamdani menjadikannya metode yang paling sesuai dengan naluri manusia dan mudah dipahami. Selain itu, integrasi sensor kelembaban dengan mikrokontroler seperti ESP32 telah terverifikasi efektif dalam pemantauan real-time kondisi lahan cabai [19] untuk mendukung optimalisasi produksi lahan [20] serta meningkatkan produktivitas tanaman secara keseluruhan melalui sistem irigasi cerdas [21].

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada integrasi algoritma Fuzzy Mamdani dengan arsitektur komunikasi data yang ringan dan *real-time* menggunakan Node.js dan protokol MQTT Hivemq, tanpa ketergantungan pada layanan cloud berbayar atau database berat seperti MySQL atau Firebase yang umum digunakan pada penelitian sebelumnya. Sistem ini dirancang untuk memberikan kendali otomatis yang presisi sekaligus efisiensi sumber daya komputasi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanaman Cabai Rawit (*Capsicum frutescens* L.)

Cabai rawit merupakan salah satu komoditas hortikultura strategis yang memiliki nilai ekonomis tinggi namun menghadapi tantangan budidaya yang kompleks [10]. Tanaman ini memerlukan perawatan intensif, terutama terkait kondisi lingkungan tumbuh. Suhu udara dan kelembaban tanah adalah parameter kritis; suhu ideal untuk pertumbuhan cabai rawit berkisar antara 21-27°C, sedangkan kelembaban tanah yang dibutuhkan berada pada rentang 60-70% [13]. Ketidaksesuaian kondisi, seperti kekeringan akibat perubahan iklim, dapat menghambat fotosintesis dan menyebabkan kegagalan panen, sehingga diperlukan strategi budidaya yang adaptif terhadap fluktuasi lingkungan [10].

2.2 Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler yang dilengkapi dengan modul Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, menjadikannya komponen utama dalam sistem IoT karena konsumsi daya yang rendah dan kinerja prosesor *dual-core* yang tinggi. Kemampuannya mengintegrasikan berbagai sensor dan modul RTC memungkinkan pengendalian perangkat dari jarak jauh secara presisi. Penelitian Ariwibowo et al. menunjukkan bahwa ESP32 efektif dalam memantau kelembaban tanah secara *real-time* dan mentransmisikan data ke server dengan latensi rendah [19]. Selain itu, pemanfaatan ESP32 dalam rancang bangun sistem penyiraman otomatis terbukti mampu menjaga ketersediaan air bagi tanaman secara konsisten [14].

2.3 Protokol MQTT

Dalam sistem IoT *real-time*, efisiensi pengiriman data sangat krusial. Sistem ini menggunakan protokol MQTT yang berbasis arsitektur *publish-subscribe*. Berbeda dengan protokol HTTP yang bersifat *request-response*, MQTT memiliki *overhead* data yang lebih ringan (*lightweight*) dan membutuhkan *bandwidth* minimal, sehingga sangat cocok untuk implementasi perangkat IoT dengan sumber daya terbatas di area perkebunan [19]. Penggunaan protokol ini memastikan komunikasi antara perangkat keras (ESP32) dan

server berjalan stabil meskipun pada kondisi jaringan yang fluktuatif.

2.4 NodeJS

Node.js adalah lingkungan eksekusi (*runtime environment*) JavaScript yang bersifat *open-source* dan lintas platform. Dengan model *event-driven* dan *non-blocking I/O*, Node.js mampu menangani ribuan koneksi konkuren dari perangkat IoT secara bersamaan dengan efisiensi memori yang tinggi. Dalam penelitian ini, Node.js berfungsi sebagai *backend server* yang mengelola lalu lintas pesan MQTT dan menjembatani komunikasi ke antarmuka *dashboard*, menggantikan peran database relasional yang berat untuk memastikan respons sistem yang cepat (*real-time*) dalam pengendalian aktuatur pompa [21].

2.5 Logika Fuzzy Mamdani

Prof. Lotfi A. Zadeh menemukan logika fuzzy di tahun 1965. Beliau merupakan seorang ilmuwan asal Iran yang menjabat sebagai dosen tertinggi di University of California di Berkeley [5]. Logika Fuzzy adalah cabang dari sistem kecerdasan buatan Artificial intelligence (AI) yang meniru kemampuan seseorang untuk berpikir dalam bentuk sebuah algoritma yang kemudian dijalankan oleh sebuah mesin. Membership Function (MF) menunjukkan derajat keanggotaan untuk setiap nilai pada variabel input atau output. Fuzzy Mamdani merupakan salah satu dari metode Fuzzy Logic [22]. Menurut buku “Komputer Masa Depan Pengenalan Artificial Intelligence”, Profesor Lotfi A. Zadeh menciptakan logika fuzzy, yang dikenal dengan logika samar. Nilai keanggotaan yaitu angka satu (1) merupakan anggota himpunan dan angka nol (0) merupakan bukan anggota himpunan. Nilai keanggotaan tersebut digunakan untuk menilai suatu kondisi seperti tinggi, usia, berat dan keadaan lainnya yang sulit untuk dipastikan dengan tepat. Himpunan Fuzzy yang mewakili suatu kondisi pada suatu variabel. Himpunan Fuzzy memiliki 2 atribut, yaitu [23]:

- a. Linguistik, yaitu penamaan suatu group yang mewakili suatu kondisi, misalnya: Dingin, Hangat, Panas.
- b. Numerik, yaitu ukuran dari suatu variabel seperti: 35, 38, 40.

Metode Mamdani atau sering disebut dengan Metode MAX-MIN. Fuzzy logic Mamdani adalah salah satu metode yang paling fleksibel dan toleran terhadap data yang tersedia. Metode fuzzy lebih efisien dalam menggunakan angka daripada metode peramalan. Dalam proses pemrograman tersebut akan memakai kondisi JIKA-MAKA (IF-THEN), yang dimana setiap hasil inputan sensor akan digabungkan dengan inputan dari software pengontrol sehingga menghasilkan kondisi output yang sesuai [24]. Dalam logika fuzzy model mamdani terdapat 4 tahapan yang harus dilalui, yaitu:

1. Pembentukan Himpunan Fuzzy (Fuzzifikasi)

Tahapan yang pertama merupakan tahapan yang berfungsi untuk mengubah suatu nilai input yang memiliki kebenaran yang pasti (*crisp input*) kedalam bentuk fuzzy input. Tetapi sebelumnya harus ditentukan terlebih dahulu mengenai variabel yang akan digunakan baik variabel masukan (*Input*) atau variabel keluaran (*output*). Bahwa nilai input yang digunakan harus berupa bilangan tegas (*riil*) [25]. Yang mana fungsi karakteristiknya dimungkinkan untuk bernilai antara 0 dan 1 [23].

Pada metode Fuzzy Mamdani ini tipe fungsi keanggotaan (*Membership Function*) yang digunakan adalah tipe kurva trapesium, tipe kurva segitiga, dan tipe kurva bahu kiri atau kanan. Penentuan tipe yang dipakai yaitu dari banyaknya keanggotaan, apabila menggunakan 2 titik dari himpunan Fuzzy maka menggunakan tipe trapesium, apabila menggunakan 1 titik dari himpunan Fuzzy maka menggunakan tipe segitiga, dan tipe bahu kiri dan kanan digunakan apabila diawali dan diakhiri variabel suatu daerah Fuzzy [22].

Derajat keanggotaan sebuah variabel x dilambangkan dengan simbol. Rule-rule menggunakan nilai keanggotaan sebagai faktor bobot untuk menentukan pengaruhnya pada saat melakukan inferensi untuk menarik kesimpulan [26].

2. Pembentukan rules fuzzy (Aplikasi fungsi implikasi)

Tahapan kedua yaitu disusunnya aturan yang akan digunakan dan biasanya berupa implikasi yang memetakan antara variabel input dengan variabel output. Secara umum, persamaan atau, lebih tepatnya, aturan dalam sistem fuzzy Mamdani dinyatakan sebagai [23]:

$$IF\ x\ is\ A\ Then\ y\ is\ B \quad (1)$$

A dan B adalah himpunan wajib, sedangkan x dan y adalah variabel yang digunakan dalam proses inferensi (saklar). Bagian pernyataan yang mengikuti kata IF disebut anteseden, sedangkan bagian yang mengikuti kata THEN disebut sebagai konsekuen [23].

Aturan fuzzy dapat diperluas dengan menggabungkan beberapa variabel input menggunakan operator logika, seperti AND atau OR, seperti [23]:

$$IF\ (x_1\ is\ A_1) o (x_2\ is\ A_2) o (x_3\ is\ A_3) \\ o \dots o (x_n\ is\ A_n) THEN\ y\ is\ B \quad (2)$$

Rumus dengan lambang o adalah operator OR atau AND.

Pada model Mamdani, fungsi implikasi standard dan paling umum yang digunakan adalah MIN (minimum). Fungsi implikasi min ini akan memotong atau membatasi output nilai keanggotaan himpunan fuzzy konsekuen berdasarkan nilai derajat keanggotaan anteseden [25].

$$\mu(x_i) = \min(\mu_{sf}(x_i), \mu_{kf}(x_i)) \quad (3)$$

Keterangan:

$\min()$ = operator minimum yang digunakan untuk menentukan batas maksimum keluaran fuzzy berdasarkan firing strength aturan tersebut.

$\mu_{sf}(x_i)$ = nilai keanggotaan anteseden fuzzy (bagian IF) pada aturan ke-i.

$\mu_{kf}(x_i)$ = nilai keanggotaan konsekuen fuzzy (bagian THEN) pada aturan ke-i berada pada himpunan B.

3. Komposisi Aturan

Tahapan ketiga yaitu komposisi aturan yang memetakan beberapa aturan yang terpenuhi terkait nilai fuzzy. Apabila terpenuhi beberapa aturan, maka inferensi diperoleh berdasarkan kumpulan serta korelasi antar Rules yang sudah tersedia. Metode yang digunakan pada umumnya adalah metode Max. Metode max yaitu pengambilan nilai terbesar dari nilai keluaran suatu aturan, kemudian menggunakannya untuk memodifikasi daerah dan mengaplikasikannya ke output dengan menggunakan operator OR atau Union. Jika semua proposisi telah dievaluasi, maka output akan berisi suatu himpunan Fuzzy yang merefleksikan kontribusi dari tiap-tiap proposisi. Secara umum dapat dituliskan seperti pada persamaan [27]

$$\mu(x_i) = \max(\mu_{sf}(x_i), \mu_{kf}(x_i)) \quad (4)$$

Keterangan:

$\max()$ = operator maksimum yang digunakan untuk menentukan batas maksimum keluaran fuzzy berdasarkan firing strength aturan tersebut.

$\mu_{sf}(x_i)$ = nilai keanggotaan anteseden fuzzy (bagian IF) pada aturan ke-i.

$\mu_{kf}(x_i)$ = nilai keanggotaan konsekuen fuzzy (bagian THEN) pada aturan ke-i berada pada himpunan B.

4. Defuzzifikasi

Tahap ini merupakan langkah terakhir dalam sistem logika fuzzy yang berfungsi mengubah keluaran *inference engine* dari bentuk himpunan fuzzy menjadi nilai riil. Pada proses ini, input berupa himpunan fuzzy hasil komposisi aturan, sedangkan

outputnya adalah satu nilai numerik yang mewakili keputusan pada domain tersebut. Ada beberapa metode defuzzifikasi pada komposisi aturan Mamdani, antara lain [23],[25].

a. Metode Centroid

Metode centroid yaitu suatu metode dimana semua daerah Fuzzy dari hasil komposisi aturan digabungkan dengan tujuan untuk membentuk hasil yang optimal dan mengambil titik pusat daerah. Metode ini terbilang sering digunakan karena hasil yang didapat terbaik selalu mengikuti referensi. Pada metode centroid ini penyelesaiannya diperoleh dengan cara mengambil titik pusat (z^*) daerah [23].

$$z^* = \frac{\int \mu(z) \cdot z \, dz}{\int \mu(z) \, dz} \quad (5)$$

Keterangan:

$\int \mu(z) \cdot z \, dz$ = momen luas (*moment of area*) dari himpunan fuzzy

$\int \mu(z) \, dz$ = luas daerah dari himpunan fuzzy

b. Metode Bisektor

Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai pada domain Fuzzy yang memiliki nilai keanggotaan separuh dari jumlah total nilai keanggotaan pada daerah [23].

c. Metode Mean of Maximum (MOM)

Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai rata-rata domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum [28].

d. Metode Large of Maximum (LOM)

Pada metode largest of maximum solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai terbesar dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum [29].

e. Metode Smallest of Maximum (SOM)

Pada metode smallest of maximum solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai terkecil dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum [30].

2.6 Soil Moisture

Sistem ini menggunakan sensor *Capacitive Soil Moisture* untuk mengukur kadar air dalam tanah. Berbeda dengan sensor resistif, sensor kapasitif lebih tahan terhadap korosi sehingga cocok untuk penggunaan jangka panjang di lahan pertanian [12]. Sensor ini digunakan untuk mengukur tingkat kelembaban tanah secara real-time. Data sensor akan menjadi parameter utama dalam menentukan kapan pompa air harus diaktifkan [31]. Sehingga, sensor ini akan bekerja dengan mengukur resistansi listrik antara dua probe logam yang tertanam di tanah. Semakin kering tanah, semakin besar resistansi yang terbaca. Data ini sangat berguna untuk menentukan kebutuhan penyiraman tanaman secara otomatis, sehingga mencegah kekeringan maupun penyiraman berlebih [32].

2.7 DHT22

DHT22 merupakan sensor suhu dan kelembaban udara yang lebih akurat dibanding DHT11. Digunakan untuk memantau kondisi suhu dan kelembaban lingkungan sekitar tanaman sebagai data pendukung keputusan penyiraman [33]. Untuk parameter udara, digunakan sensor DHT22 yang mampu mengukur suhu dan kelembaban relatif udara dengan akurasi yang memadai untuk aplikasi pertanian [15].

3. METODOLOGI PENELITIAN

Dalam pembuatan penelitian ini, terdapat beberapa tahapan untuk menyelesaikannya. Adapun tahap pengerjaan dalam penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Kerangka Penelitian

3.1 Identifikasi Masalah

Penelitian diawali dengan observasi kondisi di lapangan, di mana proses penyiraman tanaman cabai rawit saat ini masih sangat bergantung pada metode manual. Penerapan metode konvensional ini memunculkan sejumlah permasalahan teknis, antara lain ketidakteraturan jadwal penyiraman akibat keterbatasan pemantauan manusia, fluktuasi kelembaban tanah yang tidak stabil, serta inefisiensi konsumsi air yang berlebih. Permasalahan tersebut diidentifikasi sebagai dasar urgensi untuk merancang sistem penyiraman otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 [14] yang mampu bekerja secara presisi dan *real-time*.

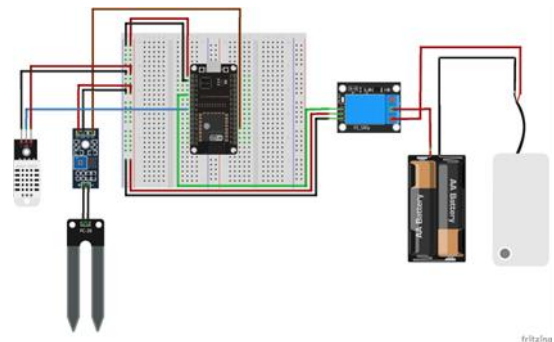
3.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperkuat landasan teori penelitian ini, meliputi teknologi IoT, sensor *Capacitive Soil Moisture*, sensor DHT22, mikrokontroler ESP32, logika *Fuzzy Mamdani*, serta arsitektur komunikasi MQTT dan Node.js. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan IoT menawarkan solusi pengawasan pertanian yang efisien [12], [13] serta mampu meningkatkan produktivitas tanaman melalui pemantauan *real-time* [21]. Secara spesifik, penelitian dalam

jurnal JITET menekankan efektivitas ESP32 yang terintegrasi dengan sensor kelembaban tanah dalam otomatisasi irigasi presisi [7], [10]. Selain itu, penggunaan metode *Fuzzy Logic Mamdani* terbukti lebih unggul dalam mengakomodasi ketidakpastian kondisi lingkungan dibandingkan metode kendali konvensional maupun *Fuzzy Sugeno* [9], [17], sementara pemanfaatan protokol MQTT memastikan transmisi data yang ringan dan stabil pada sistem berbasis mikrokontroler [19].

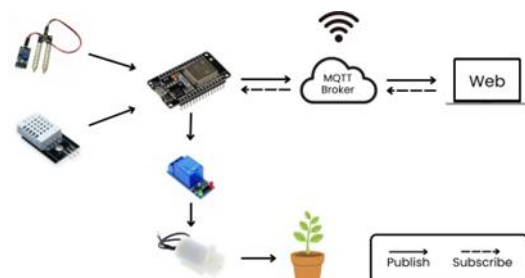
3.3 Perancangan Perangkat

Tahap ini mencakup penyusunan daftar kebutuhan alat dan bahan yang akan digunakan selama penelitian. Contohnya seperti mikrokontroler, sensor, perangkat lunak pendukung, kabel, dan komponen elektronika lainnya. Selain itu, juga termasuk menyiapkan lingkungan pengembangan seperti IDE, database, atau platform uji coba agar proses perancangan dan implementasi dapat dilakukan tanpa hambatan teknis.



Gambar 3. Rangkaian Perangkat

Rangkaian pada Gambar 3 memperlihatkan hubungan antar komponen mulai dari sensor, mikrokontroler ESP32, modul relay, hingga pompa air sebagai aktuator penyiraman.



Gambar 4. Diagram Arsitektur Sistem

Diagram sistem pada Gambar 4 menggambarkan alur kerja mulai dari akuisisi data sensor, pengiriman ke MQTT Broker, monitoring dari dashboard web, hingga aktuasi pompa air oleh ESP32 melalui modul relay.

3.4 Implementasi Logika Fuzzy Mamdani

Penelitian ini menerapkan metode Fuzzy Mamdani karena sangat fleksibel untuk data yang diterima, dan *output* nya lebih intuitif serta mudah dipahami oleh penggunaanya [34]. *Output* yang dihasilkan dari proses Logika Fuzzy tersebut berupa himpunan durasi dari lamanya waktu penyiraman yang meliputi kondisi “Mati”, “Sedang”, dan “Lama”. Hal tersebut yang membuat tanaman cabai rawit terjaga kondisi kelembaban tanahnya di batas ideal (60-70%).

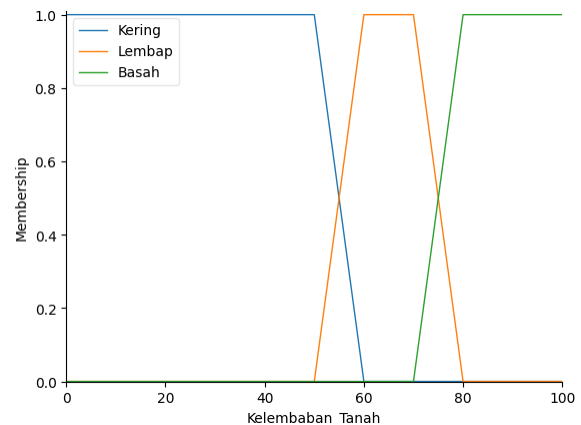
3.4.1 Fuzzifikasi

Tahap fuzzifikasi merupakan proses pemetaan nilai input tegas (*crisp input*) dari sensor menjadi nilai derajat keanggotaan fuzzy (*membership degree*) yang berada dalam interval 0 hingga 1. Penelitian ini menggunakan representasi kurva fungsi keanggotaan trapesium (*Trapezoidal Membership Function*). Variabel input yang diproses terdiri dari data sensor kelembaban tanah dan suhu udara. Pada variabel kelembaban tanah, nilai input diklasifikasikan ke dalam tiga himpunan fuzzy linguistik, yaitu “Kering”, “Lembap”, dan “Basah”. Parameter fungsi keanggotaan untuk variabel kelembaban tanah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Himpunan Fuzzy Variabel Kelembaban Tanah

Rentang Nilai (%)	Parameter	Himpunan Fuzzy
0 – 59	[0, 0, 50, 60]	Kering
60 – 70	[50, 60, 70, 80]	Lembap
> 70	[70, 80, 100, 100]	Basah

Berdasarkan Tabel 1, visualisasi dari fungsi keanggotaan Trapezoidal untuk himpunan fuzzy variabel kelembaban tanah dapat dilihat dalam Gambar 5 berikut ini.



Gambar 5. Fungsi Keanggotaan Trapezoidal pada Himpunan Fuzzy Kelembaban Tanah

Rumus pada fungsi keanggotaan Trapezoidal untuk menghitung nilai input tegas (*CRISP Input*) pada sensor kelembaban tanah, yang himpunan nya berupa “Kering”, “Lembap”, dan “Basah” adalah sebagai berikut.

$$\mu_{(Kering)}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x-0}{0-0}, & 0 < x < 0 \\ 1, & 0 \leq x \leq 50 \\ \frac{60-x}{60-50}, & 50 < x < 60 \\ 0, & x \geq 60 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{(Lembap)}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 50 \\ \frac{x-50}{60-50}, & 50 < x < 60 \\ 1, & 60 \leq x \leq 70 \\ \frac{80-x}{80-70}, & 70 < x < 80 \\ 0, & x \geq 80 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{(Basah)}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 70 \\ \frac{x-70}{80-70}, & 70 < x < 80 \\ 1, & 80 \leq x \leq 100 \\ \frac{100-x}{100-100}, & 100 < x < 100 \\ 0, & x \geq 100 \end{cases} \quad (8)$$

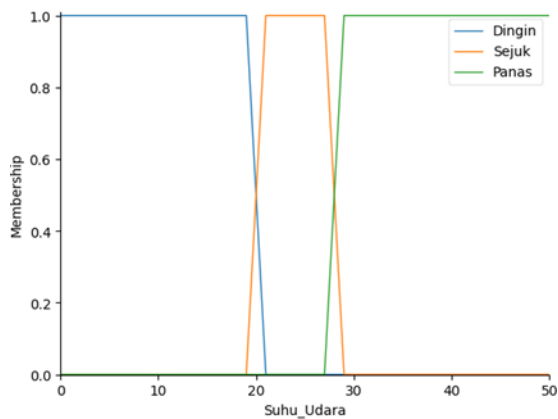
Lalu, proses fuzzifikasi diterapkan pada variabel input suhu udara. Nilai masukan dari sensor diklasifikasikan ke dalam tiga himpunan fuzzy linguistik, yaitu “Dingin”, “Sejuk”, dan

“Panas”. Representasi parameter fungsi keanggotaan untuk variabel suhu udara dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Himpunan Fuzzy Variabel Suhu Udara

Rentang Nilai (°C)	Parameter	Himpunan Fuzzy
0 – 20	[0, 0, 19, 21]	Dingin
21 – 27	[19, 21, 27, 29]	Sejuk
> 27	[27, 29, 37, 39]	Panas

Berdasarkan Tabel 2, visualisasi dari fungsi keanggotaan Trapezoidal untuk himpunan fuzzy suhu udara dapat dilihat dalam Gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. Fungsi Keanggotaan Trapezoidal pada Himpunan Fuzzy Suhu Udara

Rumus pada fungsi keanggotaan Trapezoidal untuk menghitung nilai input tegas (*CRISP Input*) pada sensor suhu udara, yang himpunannya berupa “Dingin”, “Sejuk”, dan “Panas” adalah sebagai berikut.

$$\mu_{(Dingin)}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x-0}{0-0}, & 0 < x < 0 \\ 1, & 0 \leq x \leq 19 \\ \frac{21-x}{21-19}, & 19 < x < 21 \\ 0, & x \geq 21 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{(Sejuk)}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 19 \\ \frac{x-19}{21-19}, & 19 < x < 21 \\ 1, & 21 \leq x \leq 27 \\ \frac{29-x}{29-27}, & 27 < x < 29 \\ 0, & x \geq 29 \end{cases} \quad (10)$$

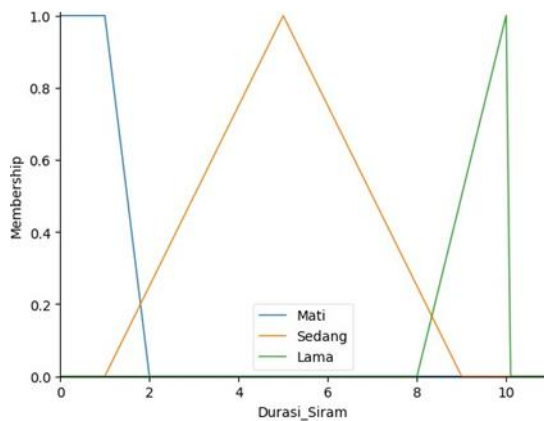
$$\mu_{(Panas)}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 27 \\ \frac{x-27}{29-27}, & 27 < x < 29 \\ 1, & 29 \leq x \leq 37 \\ \frac{39-x}{39-37}, & 37 < x < 39 \\ 0, & x \geq 39 \end{cases} \quad (11)$$

Terakhir, pendefinisian himpunan fuzzy dilakukan pada variabel output, yaitu durasi penyiraman. Variabel ini merepresentasikan lamanya waktu pompa aktif dalam satuan detik (s). Variabel durasi penyiraman diklasifikasikan ke dalam tiga himpunan fuzzy linguistik, yaitu “Mati”, “Sedang”, dan “Lama”. Parameter fungsi keanggotaan untuk variabel output ini disajikan secara rinci pada Tabel 3.

Tabel 3. Variabel Linguistik Durasi Penyiraman

Rentang Nilai (s)	Parameter	Himpunan Fuzzy
0 – 2	[0, 0, 19, 21]	Mati
1 – 9	[19, 21, 27, 29]	Sedang
8 – 10	[27, 29, 37, 39]	Lama

Berdasarkan Tabel 3, visualisasi dari fungsi keanggotaan Trapezoidal untuk himpunan fuzzy durasi penyiraman dapat dilihat dalam Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Fungsi Keanggotaan Trapezoidal pada Himpunan Fuzzy Durasi Penyiraman

Rumus pada fungsi keanggotaan Trapezoidal untuk menghitung nilai output pada durasi penyiraman, yang himpunan nya berupa “Mati”, “Sedang”, dan “Lama” adalah sebagai berikut.

$$\mu_{(Mati)}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x-0}{0-0}, & 0 < x < 0 \\ 1, & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{2-x}{2-1}, & 1 < x < 2 \\ 0, & x \geq 2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{(Sedang)}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1 \\ \frac{x-1}{5-1}, & 1 < x < 5 \\ 1, & 5 \leq x \leq 5 \\ \frac{9-x}{9-5}, & 5 < x < 9 \\ 0, & x \geq 9 \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_{(Lama)}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 8 \\ \frac{x-8}{10-8}, & 8 < x < 10 \\ 1, & 10 \leq x \leq 10 \\ \frac{10-x}{10-10}, & 10 < x < 10 \\ 0, & x \geq 10 \end{cases} \quad (14)$$

3.4.2 Mesin Inferensi (Implikasi)

Mesin inferensi berfungsi sebagai unit pemrosesan utama yang memetakan variabel input linguistik ke dalam variabel output berdasarkan basis pengetahuan (*knowledge base*). Penelitian ini menerapkan metode Mamdani dengan prinsip Max-Min. Fungsi Min digunakan untuk mengevaluasi *antecedent* pada setiap aturan yang menggunakan operator logika AND, sedangkan fungsi Max digunakan untuk melakukan agregasi antar aturan. Penyusunan 9 aturan fuzzy (*rule base*) didasarkan pada karakteristik pertumbuhan tanaman cabai rawit (*Capsicum frutescens L.*) yang membutuhkan kelembaban tanah ideal pada rentang 60-70% dan suhu udara 21-27°C untuk optimalisasi metabolisme dan pencegahan stres tanaman [15].

Keseluruhan aturan inferensi yang diimplementasikan pada mikrokontroler dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Basis Aturan Fuzzy (Rule Base)

IF	Kelembaban Tanah	Suhu Udara	Durasi Penyiraman
R1	Kering	Panas	Lama
R2	Kering	Sejuk	Lama
R3	Kering	Dingin	Sedang
R4	Lembap	Panas	Mati
R5	Lembap	Sejuk	Mati
R6	Lembap	Dingin	Mati
R7	Basah	Panas	Mati
R8	Basah	Sejuk	Mati
R9	Basah	Dingin	Mati

Berdasarkan Tabel 4, logika inferensi bertujuan menjaga kelembaban tanah pada rentang ideal 60-70% serta suhu 21-27°C [15], [16]. Saat tanah terdeteksi kering, sistem mengaktifkan penyiraman dengan durasi “Lama”. Suhu panas memicu durasi lama untuk mengimbangi penguapan, sedangkan suhu dingin membatasi durasi menjadi “Sedang” demi efisiensi air. Sebaliknya, pada kondisi tanah lembab atau basah, sistem secara otomatis menonaktifkan pompa atau “Mati” guna

mencegah kelebihan air yang dapat mengganggu proses penyerapan hara dan perkembangan tanaman [5].

3.4.3 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan tahapan akhir dalam sistem kendali logika fuzzy yang bertujuan untuk mengonversi himpunan fuzzy hasil agregasi dari mesin inferensi menjadi nilai tegas (*crisp output*) yang dapat dieksekusi oleh aktuator (relay). Penelitian ini menerapkan metode Center of Gravity (CoG) atau Centroid, yang dipilih karena mampu menghasilkan transisi nilai keluaran yang halus dan presisi.

Secara teoritis, metode Centroid menggunakan operasi integral ($\int$) untuk menghitung titik berat pada domain himpunan fuzzy yang bersifat kontinyu. Namun, karena sistem ini diimplementasikan pada mikrokontroler yang bekerja dalam domain waktu diskrit, perhitungan integral tersebut didekati (*approximated*) menggunakan metode penjumlahan numerik atau Sigma (Σ). Pendekatan diskrit ini dilakukan dengan membagi kurva himpunan fuzzy gabungan menjadi segmen-segmen kecil dengan interval cuplikan (*sampling step*) sebesar 0.5 detik.

Berdasarkan pendekatan tersebut, rumus matematis *Center of Gravity* yang diterapkan dalam kode program adalah sebagai berikut:

$$Z^* = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i \cdot \mu(z_i))}{\sum_{i=1}^n \mu(z_i)} \quad (15)$$

Keterangan:

- Z^* = Nilai output tegas (*crisp output*), yaitu durasi penyiraman dalam satuan detik.
- z_i = Titik sampel waktu pada semesta pembicaraan variabel output (0 s.d. 10 detik).
- $\mu(z)$ = Derajat keanggotaan gabungan (*aggregated membership degree*) pada titik waktu z_i .
- n = Jumlah iterasi pengambilan sampel yang dilakukan oleh mikrokontroler.

3.5 Perancangan Sistem Dashboard Web

Perancangan antarmuka pengguna (*User Interface*) dilakukan berbasis web untuk memudahkan pemantauan kondisi lahan secara *real-time* tanpa batasan perangkat (*cross-platform*). Sistem *dashboard* ini dibangun menggunakan arsitektur *Single Page Application* sederhana dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Backend Server:** Menggunakan Node.js dengan *framework* Express.js. Server ini bertugas sebagai jembatan (*bridge*) yang menghubungkan perangkat keras (ESP32) dengan antarmuka web. Server akan melakukan *subscribe* ke topik MQTT Hivemq untuk menerima data sensor.
- Komunikasi Real-Time:** Agar data pada dashboard berubah secara otomatis tanpa perlu melakukan *refresh* halaman, sistem menggunakan pustaka Socket.io. Ketika server menerima pesan baru dari MQTT Hivemq, server akan memancarkan (*emit*) data tersebut ke *browser* klien secara instan (*latensi rendah*).
- Frontend (Tampilan Dashboard):** Antarmuka dirancang menggunakan HTML5 dan Tailwind CSS. Penggunaan Tailwind CSS bertujuan untuk mempercepat proses *styling* dan memastikan tampilan tetap responsif dan rapi saat diakses melalui *smartphone* maupun laptop.
- Visualisasi Data:** Data kelembaban tanah dan suhu udara ditampilkan dalam bentuk kartu informasi (*cards*) dan elemen visual (seperti perubahan warna indikator) untuk memudahkan petani memahami kondisi lahan dengan cepat.

3.6 Pengujian Sistem

Pengujian sistem merupakan tahapan krusial untuk memastikan alat bekerja sesuai rancangan dan bebas dari kesalahan (*error*). Pada penelitian ini, metode pengujian dibagi menjadi dua tahap utama:

1. Pengujian Fungsional (*Black Box Testing*)

Pengujian ini berfokus pada fungsi luar sistem tanpa melihat kode program secara mendalam. Tujuannya adalah memastikan setiap fitur berjalan dengan benar. Skenario pengujian meliputi:

- Konektivitas MQTT: Memastikan data yang dikirim oleh ESP32 berhasil diterima oleh broker HiveMQ dan diteruskan ke server Node.js.
- Responsivitas Dashboard: Memastikan angka suhu dan kelembaban pada web berubah secara otomatis saat sensor mendeteksi perubahan kondisi lingkungan.
- Akurasi Kontrol: Memastikan notifikasi atau status pompa pada dashboard berubah (ON/OFF) sesuai dengan keputusan logika Fuzzy.

2. Pengujian Validasi Logika Fuzzy

Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi akurasi algoritma Fuzzy Mamdani yang telah diimplementasikan dengan kode program pada mikrokontroler ESP32. Mengingat keterbatasan sumber daya komputasi pada mikrokontroler, perhitungan matematis (mulai dari fuzzifikasi hingga defuzzifikasi) dilakukan secara manual tanpa menggunakan library bawaan yang berat. Oleh karena itu, validasi komputasi menjadi sangat penting untuk memastikan tidak terjadi kesalahan logika atau overflow data.

Metode validasi dilakukan melalui pendekatan analisis komparatif (*comparative analysis*). Nilai keluaran (*output*) durasi penyiraman yang dihasilkan oleh sistem dibandingkan dengan hasil perhitungan simulasi matematis standar yang berfungsi sebagai acuan kebenaran (*ground truth*).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan perancangan perangkat hingga perancangan sistem dashboard monitoring, perlu adanya pengujian perangkat tersebut dengan menggunakan data yang diperoleh dari hasil pengujian sehingga hasil data yang didapatkan dapat dianalisis lebih lanjut. Perlu diketahui kembali, penelitian ini menggunakan Logika Fuzzy Mamdani dengan

9 aturan (rule base). Berikut merupakan kumpulan data dari pengujian yang telah dilakukan pada Tabel 5.

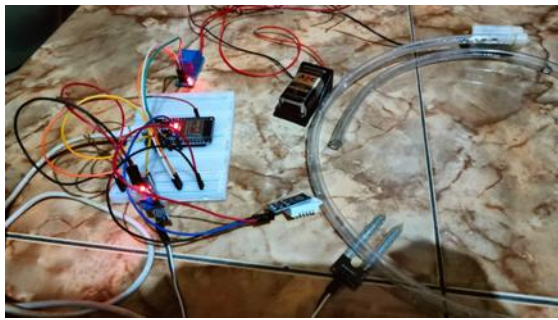
Tabel 5. Hasil Pengujian Perangkat

Percobaan	Kelembaban Tanah	Suhu Udara	Kondisi	Output
T1	73%	28.9°C	Lembab	Mati
T2	38%	29.0°C	Sangat Kering	Lama (9.17s)
T3	56%	28.6°C	Sedikit Kering	Sedang (3.45s)
T4	57%	24.0°C	Sedikit Kering	Sedang (3.45s)
T5	44%	23.7°C	Sangat Kering	Lama (9.17s)
T6	77%	23.2°C	Lembab	Mati
T7	39%	18.0°C	Sedikit Kering	Sedang (3.75s)
T8	58%	17.6°C	Sedikit Kering	Sedang (3.75s)

Tabel di atas merupakan data yang diperoleh dari hasil pengujian yang telah dilakukan pot tanaman yang berisi benih cabai rawit. Penggunaan pot dengan tanah yang ada di dalam nya ini bertujuan untuk mendapatkan hasil yang maksimal ketika sensor kelembaban tanah bersentuhan dengan tanah dalam kondisi kering, lembab, maupun basah.

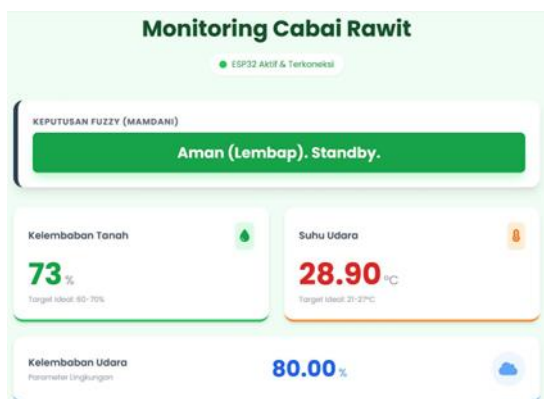


Gambar 8. Dokumentasi Pengujian Proyek



Gambar 9. Dokumentasi Rangkaian Perangkat

Dengan menggunakan dashboard berbasis web yang dirancang menggunakan arsitektur HTML5, Tailwind CSS, Node.js, dan MQTT Hivemq. Ini menampilkan visualisasi data yang dapat dimonitor secara real-time oleh pengguna. Berikut adalah cuplikan dari tampilan dari website monitoring penyiraman tanaman cabai rawit otomatis pada Gambar 9.



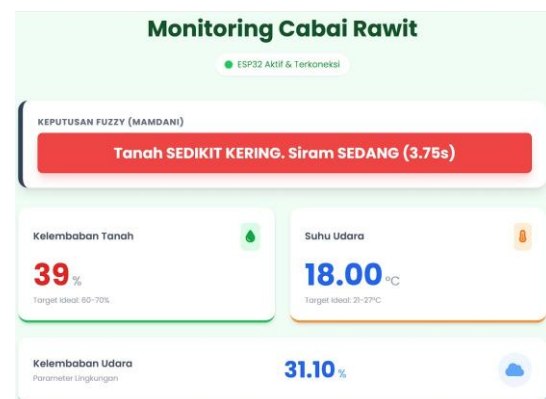
Gambar 10. Dashboard Monitoring Cabai Rawit

Berdasarkan Gambar 10, Logika Fuzzy Mamdani memberikan keputusan atau *output* berupa kondisi tidak menyiram karena sensor kelembaban tanah mendeteksi bahwa tanah pada pot tersebut kondisinya ideal (lembab). Hal tersebut memenuhi aturan dasar (*rule base*) berupa R4, yaitu **IF Kelembaban Tanah = Lembab AND Suhu Udara = Panas THEN Durasi Penyiraman = Mati**. Oleh karena itu, Logika Fuzzy Mamdani memberikan keputusan atau *output* berupa “Standby” atau dengan kata lain adalah “Mati” untuk Durasi Penyiramannya.



Gambar 12. Kondisi Kelembaban Tanah Sangat Kering

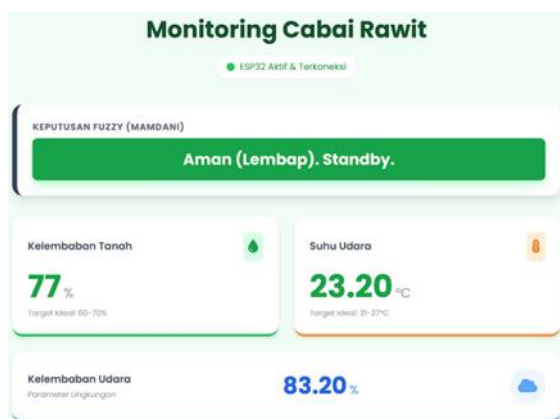
Ketika sensor kelembaban tanah mendeteksi bahwa kondisi tanah berada di ambang kekeringan, maka sistem akan memberikan perintah kepada relay untuk melakukan penyiraman dengan durasi “Lama” selama 9.17s. Pada Gambar 11 tersebut, aturan dasar (*rule base*) yang terpenuhi berupa R1, yaitu **IF Kelembaban Tanah = Kering AND Suhu Udara = Panas THEN Durasi Penyiraman = Lama (9.17s)**. Sensor akan melakukan penyiraman selama 9.17s hingga kondisi kelembaban tanah kembali ke kondisi ideal nya (lembab).



Gambar 11. Kondisi Kelembaban Tanah Sedikit Kering

Berdasarkan Gambar 12, ketika sensor suhu udara mendeteksi bahwa suhu di sekitar pot tanaman cabai tersebut berada di bawah ambang batas normal (sejuk), ini berarti menandakan suhu berada di kondisi “Dingin”. Namun, Kelembaban Tanah berada di kondisi “Kering”, maka Logika Fuzzy Mamdani akan memberikan keputusan atau *output* berupa

sedikit menyiram karena suhu udara sekitar dingin, ini menyebabkan penguapan air yang terjadi dari tanah akan berkurang sehingga tanah akan berada di kondisi lembab dalam jangka waktu yang lama. Hal tersebut memenuhi aturan dasar (*rule base*) berupa R3, yaitu **IF Kelembaban Tanah = Kering AND Suhu Udara = Dingin THEN Durasi Penyiraman = Sedang (3.75s)**. Sensor akan memberikan perintah kepada relay agar melakukan penyiraman tidak terlalu lama, sehingga pot tersebut tidak akan terpenyir dengan banyak air (banjir).



Gambar 13. Kondisi Kedua Sensor Berada di Kondisi Ideal

Jika sensor kelembaban tanah dan suhu udara mendeteksi kondisi keduanya berada di ambang batas ideal, yaitu kelembaban tanah 60-70% dan suhu udara 21-27°C, maka Logika Fuzzy Mamdani tidak akan memberikan keputusan untuk melakukan penyiraman. Hal tersebut memenuhi aturan dasar (*rule-base*) berupa R5, yaitu **IF Kelembaban Tanah = Lembab AND Suhu Udara = Sejuk THEN Durasi Penyiraman = Mati**. Oleh karena itu, kondisi kelembaban tanah akan tetap stabil mengikuti suhu udara dan keputusan yang telah dibuat oleh Logik Fuzzy Mamdani.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Roziqin et al. yang menunjukkan bahwa penerapan sistem otomatis berbasis mikrokontroler dan sensor kelembaban terbukti mampu menjaga kondisi tanah tetap optimal bagi tanaman cabai dibandingkan intervensi manual [14]. Ditambah dalam penelitian ini menggunakan arsitektur Node.js dan MQTT Hivemq yang membuat komunikasi data antar sensor dengan dashboard monitoring menjadi

lebih ringan. Ini dibuktikan dengan proses transisi yang dilakukan oleh Logika Fuzzy Mamdani tersebut ketika terjadi perubahan pada kondisi kelembaban tanah maupun suhu udara. Oleh karena itu, ini sangat berguna untuk otomatisasi secara cepat dan efisien karena penggunaan MQTT Hivemq tidak memerlukan sumber daya yang berlebihan.

5. KESIMPULAN

- Telah berhasil dirancang sistem penyiraman otomatis tanaman cabai rawit berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor *Capacitive Soil Moisture*, sensor suhu dan kelembaban udara DHT22, modul relay, pompa air, serta *Web Dashboard* berbasis Node.js dan MQTT. Sistem mampu bekerja secara cerdas menentukan durasi penyiraman berdasarkan ketidakpastian kondisi lingkungan menggunakan metode logika Fuzzy Mamdani.
- Dalam pengujiannya, sistem mampu menjaga kelembaban tanah pada rentang ideal 60-70%. Logika Fuzzy berfungsi adaptif. Sebagai contoh, saat tanah kering (38%) dan suhu panas (29°C), sistem mengaktifkan pompa dengan durasi "Lama" (9.17 detik), sedangkan pada kondisi tanah lembab (>70%), pompa otomatis "Mati" (Standby). Selain itu, hasil validasi komputasi menunjukkan bahwa perhitungan algoritma pada ESP32 akurat dan konsisten dengan simulasi perangkat lunak standar.
- Kelebihan Sistem:
 - Menggunakan logika Fuzzy Mamdani yang mampu memberikan durasi penyiraman variatif (adaptif) sesuai kondisi nyata, bukan sekadar *On/Off* kaku atau manual.
 - Monitoring *real-time* Menggunakan protokol MQTT dan *Web Socket* (Node.js) sehingga data sensor pada dashboard diperbarui secara instan dengan latensi rendah.
- Kekurangan Sistem:
 - Sistem komunikasi MQTT dan Web Dashboard sangat bergantung pada stabilitas koneksi Wi-Fi dan server *broker*, sehingga kurang optimal jika

diterapkan di area tanpa adanya jaringan internet.

- Mikrokontroler ESP32 memiliki batasan memori dalam memproses aturan Fuzzy jika jumlah *rule base* atau aturan dasarnya ditambah menjadi banyak atau lebih kompleks.
 - Pengujian saat ini masih terbatas pada media tanam *polybag*/pot, sehingga memerlukan penyesuaian kalibrasi jika diterapkan langsung pada lahan pertanian terbuka yang luas.
 - Penggunaan sensor kelembaban tipe resistif (*resistive*) yang rentan terhadap korosi dibandingkan tipe kapasitif, sehingga perawatan dan penggantian nya lebih diperhatikan apabila penggunaannya digunakan dalam jangka panjang.
- e. Pengembangan selanjutnya dapat dilakukan dengan:
- Mengembangkan integrasi dengan panel surya (solar cell) agar alat dapat beroperasi di lahan pertanian yang jauh dari sumber listrik PLN.
 - Menambahkan sensor nutrisi (NPK) atau pH tanah ke dalam variabel Fuzzy untuk meningkatkan kualitas pertumbuhan cabai, tidak hanya dari aspek air di dalam tanah.
 - Menerapkan metode Machine Learning atau Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) agar sistem dapat "belajar" pola cuaca dan memprediksi kebutuhan air di masa depan.
 - Menguji dan mengkalibrasi sistem pada skala lahan perkebunan cabai yang lebih luas untuk memvalidasi efektivitas efisiensi air secara masif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas penyertaan-Nya sehingga penelitian ini dapat terselesaikan. Penghargaan yang tulus juga diberikan kepada Universitas Singaperbangsa Karawang, khususnya Fakultas Ilmu Komputer, atas lingkungan akademik yang mendukung proses penelitian ini. Penulis turut berterima kasih kepada dosen pembimbing atas arahan serta umpan balik yang konstruktif, dan kepada

rekan-rekan yang terlibat dalam diskusi maupun kerja kolaboratif yang memperkaya penyusunan artikel ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Yusuf, S. N. Wulida, N. E. Khosyati, and S. H. Andrian, "Felerchine Inovasi Mesin Sayur Portabel Bertenaga Surya Sebagai Teknologi Ketahanan Pangan Pasca Panen,"
- [2] U. Yuminarti, R. Isaskar, A. W. Widati, and Fahriyah, "Shifting cultivation management to increase economic efficiency in potato farms," *Econ. Ann.*, vol. 194, no. 11–12, pp. 73–80, 2021.
- [3] C. P. Suhita, D. A. Nurafian, and D. Setyaningrum, "Budidaya Tanaman Cabai Rawit (*Capsicum frutescens* L.) melalui Pemanfaatan Hormon GSA (Giberelin Sitokinin Auksin) Organik," *J. Kridatama Sains Dan Teknologi.*, vol. 6, no. 02, pp. 852–868, 2024, doi: 10.53863/kst.v6i02.1464.
- [4] R. R. Addini, "Warga RI Mulai Kurangi Makan Cabai, Ini Buktinya!," *CNBC Indonesia*. Accessed: Jul. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.cnbcindonesia.com/research/20250710110512-128-647895/warga-ri-mulai-kurangi-makan-cabai-ini-buktinya>.
- [5] Muhammad Ilman Nurhadi, "Sistem Monitoring Dan Kontrol Penyiraman Tanaman Otomatis Menggunakan Internet of Things Dan Metode Fuzzy Mamdani," *Etheses UIN Malang*, pp. 1–88, 2024.
- [6] B. Muttaqi, N. Nurchim, and P. W. Ningsih, "Penerapan Logika Fuzzy Mamdani dalam Sistem Penyiraman Cerdas untuk Pertanian," *Gener. J.*, vol. 8, no. 2, pp. 111–120, 2024, doi: 10.29407/gj.v8i2.23175.
- [7] W. A. N. Zai, P. K. T. Mendrofa, A. B. S. Waruwu, P. H. Telaumbanua, and A. B. Ndraha, "Hama dan Penyakit pada Tanaman Cabai Rawit yang Dibudidayakan di dalam Polybag," *Flora: Jurnal Kajian Ilmu Pertanian Dan Perkebunan*, vol. 2, no. 1, pp. 139–151, 2025.
- [8] F. Febriansyah, A. Haris, and M. S. Gani, "Pola Tanam Tanaman Cabai Rawit (*Capsicum frutescens*) Dengan Kacang Panjang (*Vigna sinensis* L.) Terhadap Populasi Dan Intensitas Serangan Hama," *AGrotekMAS Jurnal Indonesia: Jurnal Ilmu Pertanian*, vol. 5, no. 1, pp. 91–99, 2024.
- [9] M. A. Karim and Z. Basri, "Pertumbuhan Dan Hasil Cabai Rawit (*Capsicum frutescens* L.) Pada Berbagai Komposisi Media Tanam Dan

- Konsentrasi Pupuk Organik Cair," vol. 13, no. 1, pp. 25–35, 2025.
- [10] J. Waruwu, "Tantangan dan Peluang dalam Budidaya Tanaman Cabai," *PENARIK: Jurnal Ilmu Pertanian dan Perikanan*, vol. 2, no. 2, pp. 170-176, Aug. 2025.
- [11] D. S. Sukmawati, I. Marina, and I. Sundari, "Analisis Resiko Usaha Cabai Rawit (*Capsicum Frutescens*) di Kabupaten Garut," *Jurnal Greenation Pertanian Dan Perkebunan*, vol. 1, no. 4, pp. 174–182, 2025.
- [12] 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, 2025.
- [13] P. Lestari, Tasmu, and F. Antony, "Sistem Penyiraman Budidaya Tanaman Cabai Berdasarkan Pengukuran Suhu Dan Kelembaban Tanah," *J. Intell. Networks IoT Glob.*, vol. 1, no. 1, pp. 20–32, 2023, doi: 10.36982/jinig.v1i1.3080.
- [14] M. Roziqin, A. F. Kabes, and S. Z. N. Haq, "Rancang Bangun Penyiraman Tanaman Cabe Otomatis Menggunakan ESP32 dan Sensor Kelembaban Tanah," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan (JITET)*, vol. 13, no. 3, pp. 1004-1011, 2025.
- [15] S. Nurhalimah, A. M. Yusa, and A. Fahmi, "Rancang Bangun Sistem Monitoring KelembabanTanah dengan Konsep Smart Farming untuk Budidaya Tanaman Cabai Rawit Berbasis Internet of Things (IOT)," *Softw. Dev. Digit. Bus. Intell. Comput. Eng.*, vol. 1, no. 02, pp. 49–54, 2023, doi:10.57203/session.v1i02.2023.40-54.
- [16] Y. B. Prastiyo, A. P. D. Nazari, H. Pranoto, M. Agustia, M. D. Ashan, and S. Indriani, "Produksi Tanaman Cabai Rawit Pada Pola Lanskap Agroforestri Tanaman Karet," *J. Lanskap Indonesia.*, vol. 15, no. 2, pp. 144–149, 2023, doi: 10.29244/jli.v15i2.46641.
- [17] M. Hendri, S. Sucipto, and R. W. S. Insani, "Sistem Penyiraman Otomatis Pada Tanaman Cabai Rawit Menggunakan Metode Fuzzy Sugeno," *JUTECH J. Educ. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 49–60, 2023, doi: 10.31932/jutech.v4i1.2109.
- [18] R. Pamungkas, A. Ullah, A. Faizal, and H. Zarory, "Sistem Penyiraman Pintar dan Monitoring Tanaman Sawi Otomatis Berbasis Esp 32 dan Sensor Kelembaban Tanah Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani," *Jurnal Al-Azhar Indonesia Seri Sains Dan Teknologi*, vol. 10, no. 2, p. 143, 2025.
- [19] M. R. Ariwibowo, L. A. Setiawan, and A. Iman, "Sistem Pemantau Kelembaban Tanah pada Tanaman Cabai Menggunakan ESP32 Berbasis Internet of Things," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan (JITET)*, vol. 13, no. 2, pp. 963-970, 2025.
- [20] Y. Budi Prastiyo et al., "Produksi Tanaman Cabai Rawit Pada Pola Lanskap Agroforestri Tanaman Karet Di Desa Sumber Sari Kecamatan Sebulu, Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur" *Jurnal Lanskap Indonesia*, 2023.
- [21] L. M. Samsu et al., "Penerapan Automatic Drip Irrigation System (ADIS) berbasis Internet Of Things (IoT) untuk Monitoring dan Meningkatkan Produktivitas Cabai" *Jurnal Informatika dan Teknologi*, 2025.
- [22] K. Zaruska et al., "Rancang Bangun Sistem Stabilisasi Suhu Penggorengan dengan Metode Fuzzy Berbasis IoT," *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Terapan (SNITT)*, pp. 65–71, 2022.
- [23] Sufriani, L. M. F. Aksara, dan A. H. Wibowo, "Sistem Pengusir Hama Serangga Otomatis Untuk Pertanian Cerdas Berbasis Fuzzy Logic Mamdani: Studi Kasus Tanaman Sayur Sawi," *Jurnal ANIMATOR*, vol. 2, no. 3, pp. 1–9, 2024.
- [24] W. Wijayanti, K. Santa, dan S. C. Kumajas, "Sistem Kontrol Dan Monitoring Kelembaban Dan pH Tanah Tanaman Cabai Rawit Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani," *Jurnal Minfo Polgan*, vol. 14, no. 2, pp. 2209–2222, Oct. 2025.
- [25] D. Kurniadi, F. Nuraeni, dan D. Jaelani, "Implementasi Logika Fuzzy Mamdani Pada Sistem Prediksi Calon Penerima Program Keluarga Harapan," *Jurnal Algoritma*, vol. 19, no. 1, pp. 160–171, 2022.
- [26] N. I. Syahputri, K. Chiuloto, dan N. N. A. Harahap, "Analisa perbandingan membership function Fuzzy Tsukamoto dalam menentukan dosen berprestasi (studi kasus Universitas Harapan Medan)," *Blend Sains: Jurnal Teknik*, 2022.
- [27] N. Sari, D. Wulandari, dan Sahrul, "Penerapan Algoritma Fuzzy Mamdani pada Monitoring dan Sistem Kontrol Pemakaian Kipas Angin di Ruang Berbasis Internet Of Things," *Processor: Jurnal Ilmiah Sistem Informasi, Teknologi Informasi dan Sistem Komputer*, vol. 19, no. 2, hlm. 255-267, Okt. 2024.
- [28] J. Banjarnahor, "Sistem Pendukung Keputusan Untuk Penentuan Asisten Laboratorium Komputer Dengan Metode TOPSIS Studi Kasus Laboratorium AMIK MBP," *LOFIAN: Jurnal Teknologi Informasi dan Komunikasi*, vol. 1, no. 2, hlm. 29-37, Mar. 2022.
- [29] K. Mashudi, "Desain Pengendali Hybrid Fuzzy-Proportional, Integral, Derivative (PID)

- pada Suspensi Seperempat Kendaraan," Tugas Akhir, Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, Pekanbaru, 2022.
- [30] S. Neonbeni, G. S. Mada, and F. M. A. Blegur, "Analisis Perbandingan Metode Defuzzifikasi Fuzzy Inference System Mamdani dalam Penentuan Produksi Tua Kolo (Sopi Timor) 45% pada Pabrik Sane Up-Ana Kefamenanu," *Jurnal Saintek Lahan Kering*, vol. 5, no. 2, pp. 34-39, 2022.
- [31] A. Furqan, Imilda, dan T. Iqbal, "Perancangan dan pengembangan sistem pengendali kelembaban tanah berbasis Arduino Uno untuk tanaman hias," *Jurnal Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi*, vol. 2, no. 2, Sep. 2025.
- [32] E. M. P. E. Santoso, A. I. Pradana, dan J. Maulindar, "Optimalisasi Teknologi IoT untuk Penyemprotan Tanaman Padi," *INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research*, vol. 5, no. 3, pp. 5372–5389, 2025.
- [33] A. F. Ardianto, E. S. Rahmasari, dan A. P. Pratama, "Smart irrigation system berbasis IoT dengan sensor soil moisture dan DHT22 menggunakan sumber daya terbarukan," dalam *Proceedings of Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Bisnis (SENATIB) 2025*, 2025, ISSN: 2962-1968.
- [34] Rinaldi, Y. Oktarina, dan T. Dewi, "Implementasi Fuzzy Logic dalam mengendalikan Input dan Output pada penyiraman dan pemupukan tanaman otomatis berbasis IoT," *Journal of Applied Smart Electrical Network and Systems (JASENS)*, vol. 3, no. 2, pp. 65–73, 2022.