

Monitoring dan Penyiraman Otomatis Tanaman Vanili Berbasis IoT Menggunakan Fuzzy Mamdani pada Arsitektur Multi-Node

I Wayan Putra Divka Astrada*, I Ketut Purnamawan, I Ketut Resika Arthana

Fakultas Teknik dan Kejuruan, Program Studi S1 Ilmu Komputer, Universitas Pendidikan Ganesha, Buleleng, Indonesia

Email: ^{1,*}divkaastrada29@gmail.com, ²purna@undiksha.ac.id, ³resika@undiksha.ac.id

Email Penulis Korespondensi: divkaastrada29@gmail.com

Abstrak—Keberhasilan budidaya tanaman vanili sangat bergantung pada pengelolaan air karena perubahan kelembapan tanah dan kondisi iklim mikro dapat memengaruhi pertumbuhan tanaman. Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan dan penyiraman otomatis tanaman vanili berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan metode Fuzzy Mamdani pada arsitektur multi-node. Sistem dikembangkan menggunakan pendekatan Prototype dan terdiri atas tiga node ESP32 yang berkomunikasi melalui protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Fuzzy Mamdani menggunakan kelembapan tanah, suhu udara, dan kelembapan udara sebagai input untuk menentukan durasi penyiraman, sedangkan sensor hujan dan informasi prakiraan cuaca digunakan sebagai mekanisme pendukung dalam penyesuaian keputusan penyiraman. Sistem juga mengintegrasikan Firebase Realtime Database dan Telegram Bot untuk mendukung pemantauan dan pengendalian jarak jauh. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat menjalankan fungsi akuisisi data, komunikasi, pemrosesan fuzzy, dan pengendalian aktuator sesuai rancangan. Pada stress test komunikasi MQTT, packet loss meningkat dari 0% hingga 6%, dengan rata-rata latency mencapai 398 ms pada kondisi gangguan jaringan tinggi. Simulasi perbandingan penggunaan air menunjukkan pengurangan penggunaan air sistem otomatis sebesar 19,71%–100% dibandingkan penyiraman manual pada empat skenario pengujian. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu menyesuaikan durasi penyiraman berdasarkan kondisi lingkungan dan memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air serta mengurangi ketergantungan terhadap penyiraman manual.

Kata Kunci: Internet Of Things; Fuzzy Mamdani; Tanaman Vanili; Penyiraman Otomatis; Pengendalian Irigasi; ESP32

Abstract—Successful vanilla cultivation depends strongly on proper water management because changes in soil moisture and microclimatic conditions can affect plant growth. This study develops an Internet of Things (IoT)-based monitoring and automatic irrigation system for vanilla plants using the Mamdani Fuzzy method on a multi-node architecture. The system was developed using the Prototype approach and consists of three ESP32 nodes communicating through the Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol. The Mamdani Fuzzy method uses soil moisture, air temperature, and air humidity as inputs to determine irrigation duration, while the rain sensor and weather forecast information are used as supporting mechanisms for adjusting the irrigation decision. The system also integrates Firebase Realtime Database and Telegram Bot to support remote monitoring and control. The test results show that the system successfully performed data acquisition, communication, fuzzy processing, and actuator control according to the designed functions. In the MQTT communication stress test, packet loss increased from 0% to 6%, with an average latency of up to 398 ms under high network disturbance. Simulation-based comparison of water usage showed a reduction of 19.71%–100% in the automatic system compared with manual irrigation across four test scenarios. These results indicate that the system can adjust irrigation duration according to environmental conditions and has the potential to improve water-use efficiency and reduce dependence on manual irrigation.

Keywords: Internet Of Things; Fuzzy Mamdani; Vanilla Plant; Automatic Irrigation; Irrigation Control; ESP32

1. PENDAHULUAN

Tanaman vanili (*Vanilla planifolia*) merupakan komoditas pertanian bernilai ekonomi tinggi yang memiliki peluang pengembangan di Indonesia. Pengelolaan air menjadi aspek penting dalam budidaya vanili karena perubahan ketersediaan air dapat memengaruhi respons fisiologis dan morfologis tanaman. Penelitian menunjukkan bahwa kekeringan berat pada *V. planifolia* dapat menurunkan kandungan air relatif, klorofil, asimilasi CO₂, dan kualitas vanilin, sementara *water stress* juga menyebabkan perubahan morfologis dan fisiokimia tanaman [1], [2]. Oleh karena itu, penyiraman perlu mempertimbangkan kondisi aktual tanaman dan lingkungan, bukan hanya berdasarkan jadwal tetap.

Sistem irigasi berbasis Internet of Things (IoT) dapat mendukung pengelolaan tersebut melalui pemantauan kondisi lingkungan dan pengambilan keputusan berdasarkan data sensor [3], [4], [5]. Integrasi berbagai sensor memungkinkan kondisi lingkungan dipantau secara *real-time* sehingga dapat digunakan sebagai dasar pengendalian penyiraman [6], [7]. Fuzzy Logic juga banyak diterapkan pada sistem irigasi cerdas karena mampu mengolah beberapa parameter lingkungan secara bersamaan. Berbeda dengan pendekatan berbasis nilai ambang (*threshold*), fuzzy merepresentasikan kondisi melalui fungsi keanggotaan dan aturan linguistik. Pendekatan ini telah digunakan pada sistem irigasi berbasis IoT untuk menentukan kebutuhan atau durasi penyiraman [8], [9], [10], termasuk penerapan Fuzzy Mamdani menggunakan ESP32 dan sensor lingkungan [11]. Integrasi ESP32 dengan MQTT dan Telegram juga telah diterapkan untuk mendukung komunikasi dan monitoring IoT secara *real-time* [12].

Penelitian sebelumnya menunjukkan beragam penerapan sistem penyiraman otomatis berbasis IoT. Jaikarna et al. menerapkan Fuzzy Mamdani pada sistem penyiraman tanaman hias dengan pemantauan berbasis web [13], sedangkan N. S. P. dan Hebbar mengintegrasikan ESP32, sensor lingkungan, dan prakiraan cuaca dengan pendekatan *rule-based* [14]. Penelitian lain menerapkan ESP32 untuk monitoring kelembapan tanah [15], Firebase Realtime Database untuk penyimpanan dan sinkronisasi data [16], serta Fuzzy Mamdani dengan suhu udara dan kelembapan

tanah pada sistem *smart drip irrigation* [17]. Penerapan ESP32 pada sistem irigasi berbasis IoT juga telah dilaporkan pada penelitian lainnya [18].

Meskipun demikian, penelitian yang secara khusus mengintegrasikan karakteristik kebutuhan air *V. planifolia* dengan penyiraman otomatis berbasis Fuzzy Mamdani masih terbatas. Penelitian *water stress* pada vanili menunjukkan pentingnya kondisi ketersediaan air terhadap respons tanaman [1], [2], sementara sistem irigasi berbasis IoT dan Fuzzy Mamdani sebelumnya umumnya diterapkan pada tanaman atau konteks budidaya lain [8], [9], [10], [11], [13], [17], [18]. Selain itu, integrasi arsitektur tiga node, MQTT, Firebase Realtime Database, Telegram Bot, *Scheduled Watering*, dan *Emergency Watering* dalam satu sistem khusus untuk tanaman vanili masih belum banyak dilaporkan. *Research gap* tersebut menjadi dasar pengembangan sistem penyiraman yang mempertimbangkan kondisi lingkungan dan kebutuhan monitoring tanaman vanili. Komunikasi antarperangkat berbasis IoT juga dapat digunakan untuk mendukung pertukaran data secara nirkabel dalam sistem terdistribusi [19]

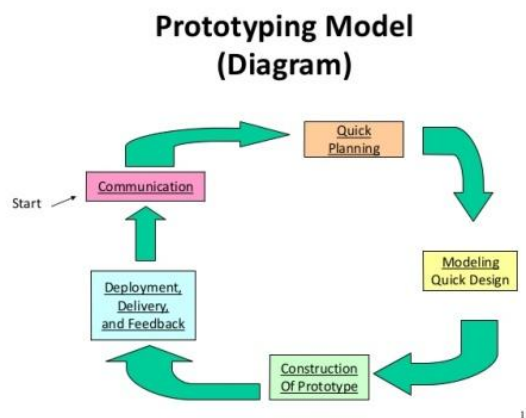
Berdasarkan *research gap* tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem monitoring dan penyiraman otomatis tanaman vanili berbasis IoT menggunakan Fuzzy Mamdani. Sistem terdiri atas tiga node ESP32 yang berkomunikasi melalui MQTT. Fuzzy Mamdani menggunakan kelembapan tanah, suhu udara, dan kelembapan udara sebagai input untuk menentukan durasi penyiraman, sedangkan sensor hujan dan informasi prakiraan cuaca digunakan sebagai parameter pendukung pelaksanaan penyiraman. Firebase Realtime Database dan Telegram Bot digunakan untuk penyimpanan, monitoring, serta pengendalian jarak jauh. ESP32 mendukung konektivitas dan integrasi perangkat IoT [19], sedangkan komunikasi antarperangkat berbasis IoT mendukung pertukaran data dalam sistem [20]. Sistem ini bertujuan menghasilkan penyiraman yang adaptif terhadap kondisi lingkungan serta mendukung monitoring dan pengendalian secara *real-time*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode Prototype sebagai pendekatan dalam pengembangan sistem pemantauan dan penyiraman otomatis tanaman vanili berbasis Internet of Things (IoT). Metode ini dipilih karena memungkinkan sistem berkembang secara bertahap melalui pembuatan prototipe awal, evaluasi proses, dan penyempurnaan berdasarkan hasil pengujian hingga tercapai sistem yang memenuhi kebutuhan penelitian. Pengembangan perangkat lunak pada penelitian ini mengacu pada prinsip-prinsip rekayasa perangkat lunak sebagai landasan dalam proses perancangan dan implementasi sistem.

Proses penelitian dimulai dengan mengenali masalah melalui pengamatan langsung di lapangan serta tinjauan pustaka yang relevan dengan sistem irigasi otomatis, teknologi Internet of Things, dan penggunaan metode Fuzzy Mamdani dalam sektor pertanian. Selanjutnya, analisis kebutuhan sistem dilakukan yang mencakup perancangan hardware, software, mekanisme komunikasi data, serta proses pengambilan keputusan dengan menggunakan metode Fuzzy Mamdani. Proses implementasi dilakukan dengan menggabungkan mikrokontroler ESP32, berbagai sensor lingkungan, aktuator, komunikasi MQTT, Firebase Realtime Database, dan Telegram Bot ke dalam sebuah sistem yang saling terhubung. Setelah semua komponen berhasil diterapkan, dilakukan uji coba untuk memastikan setiap fungsi sistem beroperasi sesuai dengan desain. Urutan langkah-langkah penelitian yang digunakan ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Prototyping Model

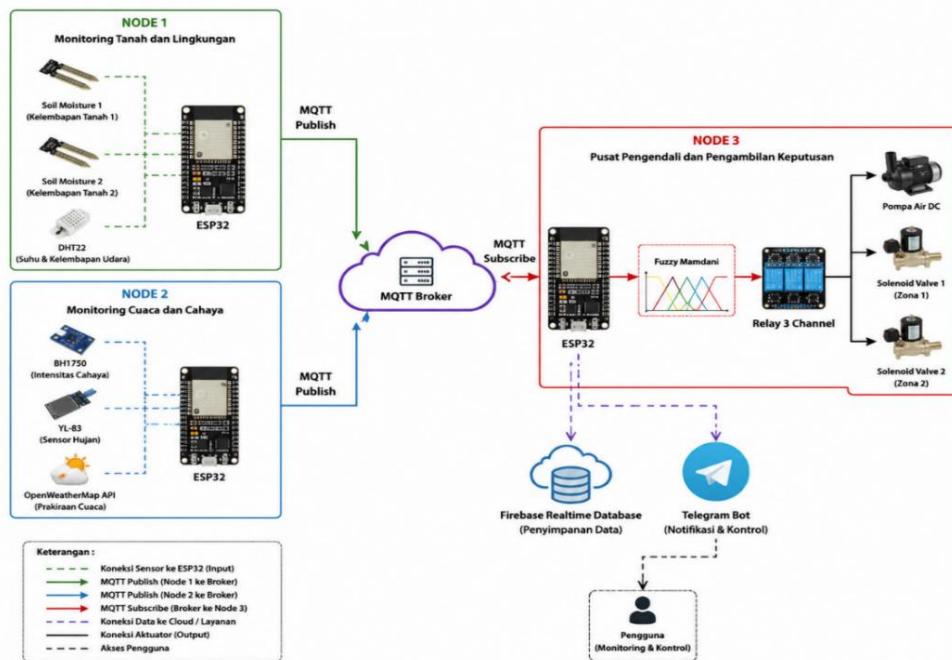
2.2 Arsitektur Sistem IoT

Sistem arsitektur yang dibangun menerapkan konsep Internet of Things (IoT) dengan menggunakan tiga node berbasis ESP32 yang berkomunikasi satu sama lain melalui protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). ESP32

dipilih sebagai mikrokontroler utama karena memiliki kemampuan pemrosesan data yang handal, dilengkapi dengan konektivitas Wi-Fi, serta mendukung pelaksanaan sistem monitoring dan pengendalian berbasis IoT [11], [21].

Pada sistem yang dirancang, Node 1 bertugas memperoleh data kelembapan tanah, suhu udara, dan kelembapan udara. Pada sistem yang dikembangkan, Node 1 berfungsi untuk mengumpulkan data tentang kelembapan tanah, suhu udara, dan kelembapan udara. Sementara itu, Node 2 mengumpulkan data dari sensor intensitas cahaya, sensor curah hujan, serta informasi tambahan yang berasal dari OpenWeatherMap API. Semua data itu kemudian dikirim ke Node 3 melalui protokol MQTT untuk diolah menggunakan metode Fuzzy Mamdani. Output dari proses inferensi dijadikan acuan untuk menentukan durasi penyiraman sesuai dengan kondisi lingkungan yang terukur. Berdasarkan keputusan tersebut, Node 3 mengatur relay, pompa air DC, dan katup solenoid sehingga proses penyiraman berjalan secara otomatis.

Selain bertugas mengendalikan aktuatur, Node 3 juga mengirimkan hasil pemantauan beserta status perangkat ke Firebase Realtime Database agar informasi sistem dapat dipantau secara langsung. Selain itu, Telegram Bot digunakan sebagai alat untuk mengirim notifikasi sekaligus sebagai sarana pengendalian sistem secara remote. Arsitektur sistem yang dirancang ditampilkan pada Gambar 2, sementara konsep perancangannya merujuk pada penerapan sistem pemantauan dan komunikasi IoT yang berbasis ESP32, cloud, dan jaringan nirkabel seperti yang dijelaskan dalam penelitian sebelumnya [11], [21].



Gambar 2. Arsitektur Sistem

2.3 Implementasi Metode Fuzzy Mamdani

Metode Fuzzy Mamdani digunakan sebagai mekanisme utama untuk menentukan durasi penyiraman berdasarkan kondisi lingkungan tanaman. Metode ini dipilih karena dapat mengolah beberapa parameter lingkungan secara bersamaan melalui himpunan linguistik dan *rule base*. Pada penelitian ini, inferensi menggunakan tiga variabel input, yaitu kelembapan tanah, suhu udara, dan kelembapan udara, sedangkan keluarannya berupa nilai *crisp* untuk menentukan durasi penyiraman. Pendekatan Fuzzy Logic pada sistem irigasi berbasis IoT dengan beberapa parameter lingkungan juga telah diterapkan pada penelitian sebelumnya [8], [17], [22].

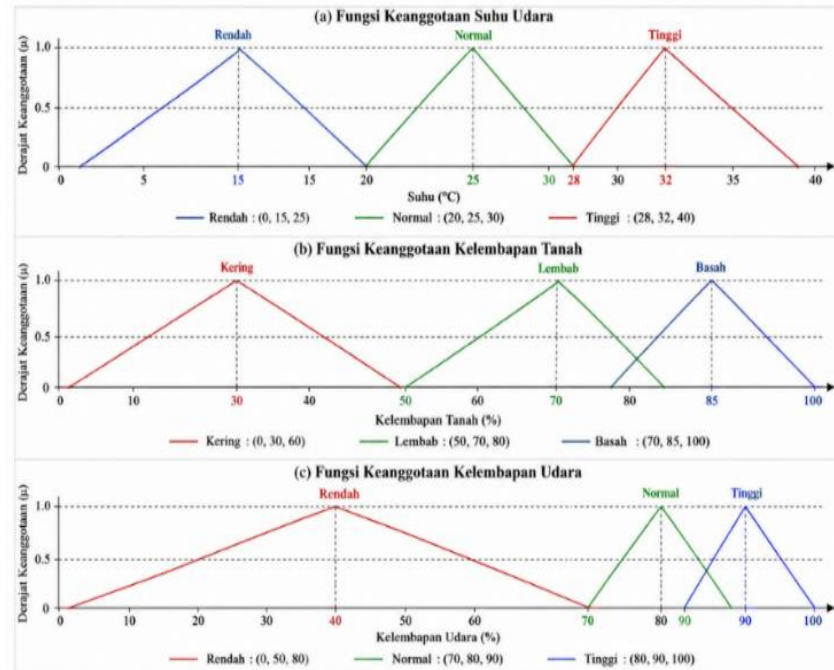
Setiap variabel input menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga (*triangular membership function*) dengan tiga himpunan fuzzy. Kelembapan tanah terdiri atas kering, lembap, dan basah; suhu udara terdiri atas rendah, normal, dan tinggi; sedangkan kelembapan udara terdiri atas rendah, normal, dan tinggi. Fungsi segitiga dipilih karena bentuk matematisnya sederhana, parameternya mudah ditentukan, dan sesuai untuk implementasi pada ESP32 dengan kebutuhan komputasi yang ringan. Fungsi Gaussian sebenarnya dapat memberikan perubahan derajat keanggotaan yang lebih halus, tetapi fungsi segitiga dipilih karena lebih mudah diinterpretasikan dan ditelusuri pada *rule base*. Pemilihan ini merupakan keputusan desain sesuai kebutuhan sistem, bukan klaim bahwa fungsi segitiga lebih unggul secara umum.

Penentuan parameter fungsi keanggotaan mempertimbangkan studi literatur, wawancara dengan petani vanili, rentang pembacaan sensor, serta hasil pengujian prototipe. Karakteristik iklim mikro *Vanilla planifolia* digunakan sebagai salah satu acuan dalam menentukan wilayah kondisi normal. Suryanti et al. melaporkan kondisi pertumbuhan optimal vanili pada suhu sekitar 20–30 °C dan kelembapan udara 60–75%, sedangkan pengamatan iklim mikro

menunjukkan suhu 25–29 °C dan kelembapan udara 65–75% [23]. Nilai tersebut digunakan sebagai acuan, sedangkan parameter fuzzy ditetapkan sebagai batas operasional sistem dan bukan sebagai batas fisiologis absolut tanaman.

Variabel kelembapan tanah menggunakan parameter (0,30,60) untuk kondisi kering, (50,70,80) untuk kondisi lembap, dan (70,85,100) untuk kondisi basah. Suhu udara menggunakan parameter (0,15,25), (20,25,30), dan (28,32,40) masing-masing untuk kondisi rendah, normal, dan tinggi. Kelembapan udara menggunakan parameter (0,50,80), (70,80,90), dan (80,90,100) masing-masing untuk kondisi rendah, normal, dan tinggi. Parameter tersebut diterapkan secara konsisten pada proses fuzzifikasi dan implementasi Node 3.

Rentang antarkategori dibuat saling beririsan sehingga nilai sensor di sekitar batas kategori tidak langsung menghasilkan perubahan keputusan secara tegas. Dengan demikian, satu nilai input dapat memiliki derajat keanggotaan pada lebih dari satu himpunan fuzzy sehingga keputusan penyiraman dapat berubah secara bertahap. Bentuk fungsi keanggotaan ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Fungsi Keanggotaan

Basis aturan (*rule base*) disusun berdasarkan kombinasi tiga variabel input. Karena setiap variabel memiliki tiga himpunan fuzzy, diperoleh $3 \times 3 \times 3 = 27$ kombinasi aturan. Kelembapan tanah menjadi faktor utama dalam menentukan kebutuhan penyiraman, sedangkan suhu udara dan kelembapan udara digunakan untuk menyesuaikan tingkat kebutuhan tersebut. Kondisi tanah kering menghasilkan keluaran penyiraman yang lebih tinggi, kondisi lembap menghasilkan keluaran yang lebih rendah, sedangkan kondisi tanah basah menghasilkan keluaran 0 karena penyiraman tidak diperlukan. Suhu yang lebih tinggi dan kelembapan udara yang lebih rendah dapat meningkatkan kebutuhan penyiraman ketika kondisi tanah menunjukkan kekeringan.

Tabel 1. Rule Base Fuzzy Mamdani

No	Kelembapan Tanah	Suhu	Kelembapan Udara	Output
1	Kering	Tinggi	Rendah	90
2	Kering	Tinggi	Normal	90
3	Kering	Tinggi	Tinggi	60
4	Kering	Normal	Rendah	90
5	Kering	Normal	Normal	60
6	Kering	Normal	Tinggi	60
7	Kering	Rendah	Rendah	60
8	Kering	Rendah	Normal	60
9	Kering	Rendah	Tinggi	30
10	Lembab	Tinggi	Rendah	60
11	Lembab	Tinggi	Normal	60
12	Lembab	Tinggi	Tinggi	30
13	Lembab	Normal	Rendah	60
14	Lembab	Normal	Normal	30
15	Lembab	Normal	Tinggi	30

16	Lembab	Rendah	Rendah	30
17	Lembab	Rendah	Normal	30
18	Lembab	Rendah	Tinggi	30
19	Basah	Tinggi	Rendah	0
20	Basah	Tinggi	Normal	0
21	Basah	Tinggi	Tinggi	0
22	Basah	Normal	Rendah	0
23	Basah	Normal	Normal	0
24	Basah	Normal	Tinggi	0
25	Basah	Rendah	Rendah	0
26	Basah	Rendah	Normal	0
27	Basah	Rendah	Tinggi	0

Pada proses inferensi, setiap aturan dievaluasi menggunakan operator MIN untuk memperoleh *firing strength* atau nilai α . Nilai tersebut kemudian dikombinasikan dengan nilai konsekuen masing-masing aturan menggunakan metode *Weighted Average* untuk memperoleh nilai *crisp*. Nilai konsekuen yang digunakan dalam *rule base* adalah 0, 30, 60, dan 90 sebagai representasi tingkat kebutuhan penyiraman. Nilai tersebut bukan durasi dalam satuan detik, tetapi nilai keluaran aturan yang digunakan dalam proses defuzzifikasi ditunjukkan pada Persamaan (1) dan Persamaan (2).

Persamaan Inferensi

$$\alpha_i = \min(\mu_{tanah}, \mu_{suhu}, \mu_{kelembapan}) \quad (1)$$

Persamaan Defuzzifikasi

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (2)$$

Nilai *crisp* yang diperoleh kemudian dipetakan menjadi empat kategori durasi penyiraman. Nilai ≤ 25 menghasilkan durasi 0 detik, nilai $>25-50$ menghasilkan durasi 2 detik, nilai $>50-75$ menghasilkan durasi 5 detik, sedangkan nilai >75 menghasilkan durasi 8 detik. Pemetaan tersebut digunakan untuk menerjemahkan hasil keputusan Fuzzy Mamdani menjadi pengendalian pompa dan *solenoid valve*. Sensor hujan YL-83 dan informasi prakiraan cuaca dari OpenWeatherMap tidak digunakan sebagai input pada proses inferensi Fuzzy Mamdani. Keduanya digunakan setelah proses inferensi sebagai mekanisme penyesuaian terhadap kondisi cuaca. Apabila sensor mendeteksi hujan, proses penyiraman otomatis dibatalkan. Sementara itu, apabila prakiraan menunjukkan potensi hujan dalam waktu dekat (*RAIN_SOON*), durasi hasil Fuzzy dikurangi satu tingkat sebelum aktuator diaktifkan. Dengan pemisahan tersebut, Fuzzy Mamdani tetap menjadi mekanisme utama dalam menentukan kebutuhan dan durasi dasar penyiraman, sedangkan informasi cuaca berfungsi sebagai mekanisme koreksi terhadap keputusan akhir.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menjelaskan hasil penerapan sistem, proses pengujian, evaluasi metode Fuzzy Mamdani, serta diskusi tentang kinerja sistem pemantauan dan penyiraman otomatis tanaman vanili yang berbasis Internet of Things (IoT). Pelaksanaan sistem meliputi penggabungan perangkat keras dan perangkat lunak, sistem komunikasi data, kontrol aktuator, serta penggunaan pendekatan Fuzzy Mamdani untuk menetapkan waktu penyiraman berdasarkan keadaan lingkungan. Kemudian, hasil tes dianalisis dan dibandingkan dengan studi sebelumnya untuk menilai kinerja sistem serta mengidentifikasi sumbangan penelitian terhadap pengembangan sistem irigasi pintar berbasis IoT.

3.1 Implementasi Sistem

Internet Of Things (IoT) agar semua elemen dapat berfungsi sebagai satu kesatuan. Sistem yang dibangun memanfaatkan arsitektur tiga node berbasis ESP32 yang saling berbagi data melalui protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Arsitektur itu mendukung proses pengambilan data sensor, pengolahan informasi dengan metode Fuzzy Mamdani, dan kontrol penyiraman secara otomatis. Selain itu, Firebase Realtime Database digunakan sebagai sarana penyimpanan data pemantauan secara langsung, sedangkan Telegram Bot berfungsi untuk mendukung pengiriman pemberitahuan dan kontrol sistem dari jarak jauh. Penggabungan semua elemen tersebut menggambarkan implementasi konsep IoT yang dapat mendukung proses pemantauan dan pengaturan penyiraman secara berkelanjutan [24].

3.1.1 Implementasi Perangkat Keras

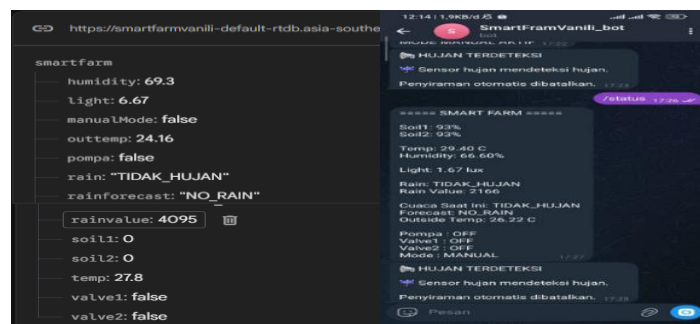
Pelaksanaan perangkat keras dilakukan dengan menggabungkan tiga node yang berbasis ESP32 dengan fungsi yang berbeda, namun terhubung satu sama lain melalui protokol MQTT. Pemanfaatan ESP32 bergantung pada kemampuannya untuk mendukung komunikasi tanpa kabel, pengolahan data sensor, dan pengontrolan perangkat dalam sistem IoT secara langsung [22]. Node 1 memiliki tugas untuk mengumpulkan data kelembapan tanah dengan

dua Capacitive Soil Moisture Sensor, dan juga untuk mengukur suhu dan kelembapan udara menggunakan sensor DHT22. Sementara itu, Node 2 berperan dalam mengumpulkan data intensitas cahaya melalui sensor BH1750, mendeteksi keadaan hujan melalui sensor YL-83, serta mengambil informasi ramalan cuaca dari OpenWeatherMap API. Semua data yang diperoleh dari pembacaan sensor selanjutnya dikirim ke Node 3 melalui protokol MQTT sebagai input untuk proses pengambilan keputusan penyiraman.

Node 3 berperan sebagai pengendali (controller) yang mengolah semua data sensor dengan metode Fuzzy Mamdani. Hasil inferensi berikutnya dimanfaatkan untuk mengontrol relay, pompa air DC 12 V, dan dua solenoid valve sesuai kebutuhan irigasi di setiap zona tanaman. Di samping menjalankan fungsi tersebut, Node 3 juga menerapkan fitur Penyiraman Terjadwal, Penyiraman Darurat, dan penyesuaian waktu penyiraman yang bergantung pada informasi ramalan cuaca. Melalui mekanisme itu, sistem dapat menyesuaikan diri dengan perubahan situasi lingkungan. Integrasi ESP32, sejumlah sensor lingkungan, aktuator, dan komunikasi IoT menunjukkan bahwa semua komponen dapat berfungsi secara kooperatif untuk membentuk sistem penyiraman otomatis [22], [25], [26].

3.1.2 Implementasi Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak dibuat untuk mendukung proses komunikasi data, penyimpanan hasil monitoring, dan interaksi antara pengguna dan sistem. Komunikasi antar-node menggunakan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) melalui mekanisme publish dan subscribe, sehingga data sensor yang dikirim dari Node 1 dan Node 2 bisa diterima oleh Node 3 secara real-time untuk diproses lebih lanjut. Mekanisme itu memungkinkan pertukaran data terjadi dengan efisien sehingga mendukung penerapan sistem monitoring yang berbasis Internet of Things (IoT) [22], [24]. Data hasil pemantauan dan status aktuator kemudian disimpan dalam Firebase Realtime Database agar informasi mengenai kondisi lingkungan dan status penyiraman dapat diperbarui secara langsung dan diakses sebagai sarana pemantauan sistem. Penggunaan Firebase Realtime Database juga memungkinkan penyimpanan data secara terpusat melalui layanan cloud, sehingga proses pemantauan dapat dilakukan secara terus-menerus [21], [24]. Selain berfungsi sebagai media monitoring, sistem ini juga terhubung dengan Telegram Bot untuk menyederhanakan proses pengendalian serta penyampaian informasi kepada pengguna. Dengan menggunakan Telegram Bot, pengguna bisa melihat data hasil sensor, mendapatkan notifikasi otomatis saat penyiraman dilakukan, serta mengirim perintah untuk mengubah mode operasi atau mengendalikan aktuator secara manual. Sebaliknya, OpenWeatherMap API digunakan sebagai sumber data ramalan cuaca yang berperan sebagai faktor pendukung dalam penyesuaian lama penyiraman agar keputusan yang diambil lebih responsif terhadap perubahan keadaan lingkungan. Penerapan antarmuka perangkat lunak diperlihatkan pada Gambar 4. Pemanfaatan Firebase sebagai sarana penyimpanan data secara real-time telah banyak diterapkan dalam sistem IoT [17], [19]. Sementara itu, penerapan Telegram Bot, MQTT, dan OpenWeatherMap API dalam penelitian ini mendukung kemampuan pemantauan, pengiriman data, pengendalian dari jauh, serta penyediaan informasi yang relevan dalam proses penyiraman.



Gambar 4. *Firebase Realtime Database dan Telegram Bot*

3.2 Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilaksanakan untuk menilai kinerja berbagai komponen dalam sistem pemantauan dan penyiraman otomatis tanaman vanili yang berbasis Internet of Things (IoT). Evaluasi bertujuan untuk memastikan bahwa semua perangkat keras dan perangkat lunak bekerja sesuai rencana, dari proses pengambilan data sensor, komunikasi dengan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), penyimpanan data di Firebase Realtime Database, komunikasi lewat Telegram Bot, hingga pengendalian aktuator berupa relay, pompa air DC, dan solenoid valve. Selain memeriksa fungsi setiap komponen, pengujian juga dilaksanakan untuk memastikan semua subsistem dapat beroperasi secara terintegrasi sehingga mendukung proses penyiraman otomatis secara real-time. Metode ini sering diterapkan dalam penilaian sistem irigasi berbasis IoT yang melibatkan berbagai komponen yang saling terhubung.

3.2.1 Pengujian Node 1

Pengujian Node 1 bertujuan untuk menilai kemampuan sensor kelembapan tanah dan DHT22 dalam mengumpulkan data tentang kondisi lingkungan sebelum data tersebut dikirimkan ke Node 3 menggunakan protokol MQTT. Parameter yang diukur mencakup tingkat kelembapan tanah di dua zona, suhu udara, kelembapan udara, dan status publikasi data. Menurut hasil uji yang ditampilkan pada Tabel 2, semua sensor dapat membaca kondisi lingkungan

yang terukur dengan menghasilkan nilai yang bervariasi. Selain itu, semua data berhasil dipindahkan ke Node 3 tanpa ada kegagalan dalam proses publikasi. Hasil ini menunjukkan bahwa Node 1 dapat menjalankan fungsi akuisisi data dengan stabil sehingga dapat memberikan input yang diperlukan dalam proses pengambilan keputusan dengan menggunakan metode Fuzzy Mamdani. Hasil ini konsisten dengan penerapan sistem irigasi berbasis ESP32 yang memanfaatkan sensor lingkungan sebagai sumber data utama dalam sistem IoT [22].

Tabel 2. Hasil Pengujian Node 1

No	Soil 1 (%)	Soil 2 (%)	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Status MQTT
1	79	100	27.60	69.00	Publish
2	81	32	27.60	69.00	Publish
3	81	99	27.60	69.10	Publish
4	75	100	27.60	69.20	Publish
5	77	87	27.60	69.20	Publish

3.2.2 Pengujian Node 2

Pengujian di Node 2 bertujuan untuk menilai kemampuan sistem dalam mengumpulkan data pendukung penyiraman, yang mencakup intensitas cahaya, status hujan, dan ramalan cuaca. Semua data itu kemudian dikirim ke Node 3 melalui mekanisme publikasi menggunakan protokol MQTT. Berdasarkan pengujian yang tertera di Tabel 3, sensor BH1750 dan YL-83 dapat dengan baik mendeteksi perubahan lingkungan, sementara informasi cuaca diperoleh dengan sukses melalui API OpenWeatherMap. Semua data yang dihasilkan juga sukses diteruskan ke Node 3 tanpa kehilangan informasi, sehingga dapat digunakan sebagai parameter pendukung dalam proses pengambilan keputusan penyiraman. Hasil ini menunjukkan bahwa penggabungan berbagai sumber informasi lingkungan dapat meningkatkan kemampuan sistem dalam menyesuaikan proses penyiraman dengan perubahan kondisi yang terjadi [26].

Tabel 3. Hasil Pengujian Node 2

No	Intensitas Cahaya (lux)	Status Hujan (YL-83)	Prakiraan Cuaca	Status MQTT
1	6.67	TIDAK_HUJAN	NO_RAIN	Berhasil
2	251.67	TIDAK_HUJAN	NO_RAIN	Berhasil
3	25.44	HUJAN	RAIN_SOON	Berhasil
4	12.40	HUJAN	RAIN_SOON	Berhasil
5	233.00	TIDAK_HUJAN	RAIN_SOON	Berhasil

3.2.3 Pengujian Komunikasi MQTT

Pengujian komunikasi MQTT dilakukan untuk mengevaluasi proses publish dari Node 1 dan Node 2 serta subscribe pada Node 3. Pengujian dilakukan terhadap data yang dikirim oleh kedua node pada beberapa kondisi lingkungan. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh data yang dipublikasikan oleh Node 1 dan Node 2 berhasil diterima oleh Node 3. Pada pengujian yang dilakukan tidak ditemukan kehilangan data, sehingga tingkat keberhasilan penerimaan pesan mencapai 100% pada skenario pengujian tersebut. Hasil ini menunjukkan bahwa komunikasi MQTT dapat menjalankan fungsi pertukaran data antar-node pada kondisi jaringan normal.

Hasil pengujian pada tabel 4 menunjukkan bahwa peningkatan gangguan jaringan menyebabkan peningkatan *latency* dan *packet loss*. Pada kondisi normal, seluruh pesan berhasil diterima dengan *packet loss* 0%. Ketika jaringan mengalami gangguan ringan, sedang, dan tinggi, *packet loss* meningkat masing-masing menjadi 1%, 3%, dan 6%, sedangkan rata-rata *latency* meningkat dari 36 ms menjadi 398 ms. Hal tersebut menunjukkan bahwa kinerja komunikasi MQTT mengalami penurunan seiring meningkatnya gangguan jaringan, meskipun komunikasi masih dapat berlangsung pada seluruh skenario pengujian.

Tabel 4. Hasil Stress Test Komunikasi MQTT

No	Kondisi Pengujian	Pesan Dikirim	Pesan Diterima	Packet Loss	Rata-rata Latency	Latency Maks.	Status
1	Jaringan normal	100	100	0%	36 ms	64 ms	Berhasil
2	Gangguan ringan	100	99	1%	87 ms	126 ms	Berhasil
3	Latensi sedang	100	97	3%	176 ms	291 ms	Berhasil
4	Latensi tinggi	100	94	6%	398 ms	642 ms	Menurun

3.2.4 Pengujian Firebase Realtime Database

Pengujian Firebase Realtime Database dilakukan untuk memastikan proses penyimpanan dan pembaruan data dari pemantauan serta status aktuator secara langsung. Parameter yang diuji mencakup keseluruhan data sensor serta kondisi pompa dan solenoid valve. Berdasarkan hasil evaluasi pada Tabel 5, seluruh data dapat disimpan dan diperbarui tanpa ada kegagalan sinkronisasi yang terdeteksi. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa Firebase Realtime Database dapat mendukung penyimpanan data berbasis cloud, sehingga informasi dari monitoring dapat diakses secara langsung. Penggunaan layanan tersebut juga membantu proses pemantauan keadaan lingkungan secara berkelanjutan [21], [24].

Tabel 5. Hasil Pengujian Firebase Realtime Database

No	Data Yang Dikirim	Nilai	Status
1	Kelembapan Tanah Zona 1 dan Zona 2	82%	Berhasil
2	Suhu Udara	27.4°C	Berhasil
3	Kelembapan Udara	67.3%	Berhasil
4	Intensitas Cahaya	5.83 lux	Berhasil
5	Status Hujan	TIDAK_HUJAN	Berhasil
6	Prakiraan Cuaca	NO_RAIN	Berhasil
7	Status Pompa	True (Pompa ON)	Berhasil
8	Status Valve 1 dan Valve 2	False (ValveOFF)	Berhasil

3.2.5 Pengujian Telegram Bot

Pengujian Telegram Bot dilaksanakan untuk menilai fungsi pemantauan, pengiriman pesan, serta pengontrolan sistem berdasarkan desain. Uji coba mencakup pelaksanaan berbagai perintah, seperti /status, /manual, dan /auto, serta pengiriman pemberitahuan secara otomatis saat sistem melakukan proses penyiraman atau mengidentifikasi kondisi tertentu. Berdasarkan hasil pengujian yang ada di Tabel 6, semua perintah dapat dijalankan sesuai dengan fungsi yang diharapkan. Selain dapat menampilkan informasi hasil pembacaan sensor, Telegram Bot juga berhasil mengubah mode operasi sistem dan mengirimkan notifikasi otomatis kepada pengguna. Temuan ini menunjukkan bahwa integrasi Telegram Bot mendukung proses pemantauan dan pengendalian dari jarak jauh, sehingga pengguna dapat mengakses informasi mengenai kondisi sistem secara langsung. Dengan cara ini, interaksi antara sistem dan pengguna dapat berlangsung sesuai dengan desain yang telah ditentukan.

Tabel 6. Hasil Pengujian Telegram Bot

No	Fitur/Perintah	Hasil Yang Diharapkan	Status
1	/status	Menampilkan kondisi seluruh sensor dan aktuator	Berhasil
2	/manual	Mengaktifkan mode manual	Berhasil
3	/auto	Mengaktifkan mode otomatis	Berhasil
4	Notifikasi <i>Emergency Watering</i>	Mengirim notifikasi ketika tanah sangat kering	Berhasil
5	Notifikasi <i>Scheduled Watering</i>	Mengirim notifikasi saat penyiraman terjadwal	Berhasil
6	Notifikasi Prakiraan Hujan	Mengirim notifikasi saat prakiraan hujan	Berhasil

3.2.6 Pengujian Relay, Pompa Air, dan Solenoid Valve

Pengujian aktuator dilakukan guna memastikan bahwa relay, pompa air DC, dan solenoid valve dapat berfungsi sesuai dengan keputusan penyiraman yang dihasilkan oleh Node 3. Evaluasi dilaksanakan pada berbagai kondisi, termasuk tanpa penyiraman, penyiraman di setiap zona, penyiraman pada kedua zona secara bersamaan, serta keadaan setelah proses penyiraman selesai. Hasil pengujian yang disajikan di Tabel 7 menunjukkan bahwa relay berhasil mengontrol pompa air DC dan solenoid valve sesuai dengan keputusan yang dihasilkan oleh sistem. Aktuator dapat melaksanakan penyiraman di setiap zona atau kedua zona secara otomatis, lalu kembali ke keadaan non-aktif setelah proses penyiraman selesai. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa sistem irigasi otomatis yang menggunakan ESP32 dapat mengatur proses penyiraman sesuai dengan keadaan yang telah ditetapkan [22].

Tabel 7. Hasil Pengujian Relay, Pompa Air DC, dan Solenoid Valve

No	Kondisi Pengujian	Relay	Pompa Air DC	Solenoid Valve 1	Solenoid Valve 2	Hasil
1	Tidak Ada Penyiraman	OFF	OFF	OFF	OFF	Berhasil
2	Penyiraman Zona 1	ON	ON	ON	OFF	Berhasil
3	Penyiraman Zona 2	ON	ON	OFF	ON	Berhasil
4	Penyiraman Kedua Zona	ON	ON	ON	ON	Berhasil
5	Penyiraman Selesai	OFF	OFF	OFF	OFF	Berhasil

3.3 Pengujian metode Fuzzy Mamdani

Pengujian metode Fuzzy Mamdani dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menetapkan lama penyiraman berdasarkan keadaan lingkungan yang didapat dari sensor. Evaluasi meliputi validasi keluaran inferensi Fuzzy Mamdani, pengujian fitur *Scheduled Watering*, *Emergency Watering*, serta mode kerja manual dan otomatis. Seluruh serangkaian pengujian bertujuan untuk memastikan bahwa keputusan penyiraman yang dihasilkan sesuai dengan kondisi input sehingga sistem dapat mendukung proses penyiraman otomatis secara adaptif. Selain itu, tes ini juga dimanfaatkan untuk menilai efisiensi penerapan metode Fuzzy Mamdani pada sistem yang diciptakan.

3.3.1 Pengujian Output Metode Fuzzy Mamdani

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 8, terdapat hubungan yang menunjukkan bahwa peningkatan kelembapan tanah cenderung menghasilkan keluaran penyiraman yang lebih rendah. Pada kondisi kelembapan tanah sebesar 10%, suhu 32,00 °C, dan kelembapan udara 60,00%, sistem menghasilkan nilai keluaran Fuzzy sebesar 90 dan durasi penyiraman 8 detik. Kondisi tersebut merepresentasikan keadaan tanah yang sangat kering sehingga sistem memberikan tingkat penyiraman tertinggi.

Ketika kelembapan tanah meningkat menjadi 35%, dengan suhu 30,02 °C dan kelembapan udara 75,00%, nilai keluaran Fuzzy menurun menjadi 60 dan durasi penyiraman menjadi 5 detik. Selanjutnya, pada kelembapan tanah sebesar 48%, suhu 28,07 °C, dan kelembapan udara 82,10%, keluaran Fuzzy menjadi 30 dengan durasi penyiraman 2 detik. Hasil tersebut menunjukkan adanya penurunan tingkat penyiraman seiring meningkatnya kelembapan tanah. Data pengujian tersebut secara langsung menunjukkan penerapan nilai konsekuen 90, 60, dan 30 pada *rule base* dan proses pemetaan keluaran menjadi durasi penyiraman.

Pada kondisi kelembapan tanah yang lebih tinggi, sistem menghasilkan keputusan untuk tidak melakukan penyiraman. Ketika kelembapan tanah mencapai 72%, dengan suhu 27,90 °C dan kelembapan udara 86,15%, nilai keluaran Fuzzy menjadi 0 sehingga durasi penyiraman juga 0 detik. Kondisi yang sama terjadi pada kelembapan tanah 88%, suhu 26,80 °C, dan kelembapan udara 90,00%, dengan keluaran Fuzzy 0 dan durasi penyiraman 0 detik. Hal tersebut menunjukkan bahwa ketika tanah berada pada kondisi basah, perubahan suhu dan kelembapan udara pada kondisi pengujian tersebut tidak menyebabkan sistem mengaktifkan penyiraman.

Secara keseluruhan, lima skenario pengujian menghasilkan tiga tingkat durasi penyiraman aktif, yaitu 8, 5, dan 2 detik, serta dua kondisi tanpa penyiraman dengan durasi 0 detik. Pola keluaran tersebut menunjukkan bahwa Fuzzy Mamdani tidak hanya menghasilkan keputusan biner berupa menyiram atau tidak menyiram, tetapi menghasilkan beberapa tingkat durasi berdasarkan kombinasi kondisi lingkungan. Dengan demikian, hasil pengujian mendukung rancangan pada metodologi bahwa kelembapan tanah menjadi faktor penting dalam menentukan tingkat kebutuhan penyiraman, sementara suhu dan kelembapan udara turut dipertimbangkan dalam proses inferensi.

Hasil tersebut juga memperlihatkan bahwa keluaran sistem konsisten dengan prinsip *rule base* yang telah dirancang. Kondisi tanah yang lebih kering menghasilkan nilai keluaran yang lebih tinggi, sedangkan kondisi tanah yang lebih basah menghasilkan keluaran 0. Dengan demikian, pengujian ini memberikan bukti kuantitatif bahwa proses inferensi Fuzzy Mamdani pada sistem telah menghasilkan keluaran yang sesuai dengan perubahan kondisi input yang diuji.

Tabel 8. Hasil Pengujian Output Metode Fuzzy Mamdani

No	Soil (%)	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Output Fuzzy	Durasi (Detik)	Keputusan Sistem
1	10	32,00	60,00	90	8	Menyiram
2	35	30,02	75,00	60	5	Menyiram
3	48	28,07	82,10	30	2	Menyiram
4	72	27,90	86,15	0	0	Tidak Menyiram
5	88	26,80	90,00	0	0	Tidak Menyiram

3.3.2 Pengujian *Scheduled Watering*

Pengujian fitur *Scheduled Watering* dilakukan untuk memverifikasi kemampuan sistem dalam menjalankan penyiraman secara otomatis berdasarkan jadwal yang telah ditetapkan. Evaluasi dilaksanakan pada dua waktu penyiraman, yaitu pukul 05.00 WITA dan 17.00 WITA. Berdasarkan hasil pengujian, sistem berhasil mengaktifkan relay, pompa air, dan *solenoid valve* secara otomatis sesuai jadwal tanpa memerlukan intervensi dari pengguna. Hasil tersebut menunjukkan bahwa fitur *Scheduled Watering* mampu menjaga proses penyiraman tetap berlangsung sesuai waktu yang telah ditentukan sehingga mendukung otomatisasi sistem serta konsistensi pemberian air pada tanaman.

3.3.3 Pengujian *Emergency Watering*

Pengujian fitur *Emergency Watering* bertujuan mengevaluasi respons sistem ketika kelembapan tanah berada di bawah batas minimum yang telah ditetapkan. Pada kondisi tersebut, sistem secara otomatis mengaktifkan pompa air dan *solenoid valve* pada zona yang membutuhkan penyiraman. Berdasarkan hasil pengujian, sistem mampu membedakan kondisi kelembapan pada setiap zona sehingga penyiraman hanya dilakukan pada area yang memerlukan tambahan

air. Apabila kedua zona berada dalam kondisi kering, penyiraman dijalankan secara bersamaan. Sebaliknya, ketika kelembapan tanah masih berada pada kisaran normal, fitur *Emergency Watering* tidak diaktifkan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan kelembapan tanah secara tepat tanpa memengaruhi zona yang masih memiliki kadar air yang mencukupi. Data pada Tabel 8 memperlihatkan bahwa fitur *Emergency Watering* berhasil menjaga ketersediaan air ketika kelembapan tanah berada pada kondisi kritis. Mekanisme tersebut memungkinkan penyiraman dilakukan secara selektif sesuai kebutuhan masing-masing zona, sehingga penggunaan air menjadi lebih efektif tanpa mengganggu area yang masih memiliki kelembapan yang memadai. Pendekatan ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya mampu mendeteksi kondisi darurat, tetapi juga memberikan respons penyiraman yang sesuai dengan kondisi aktual lingkungan.

Tabel 9. Hasil Pengujian Emergency Watering

No	Soil 1 (%)	Soil 2 (%)	Kondisi	Respons Sistem	Hasil
1	10	10	Dua Zona Butuh Penyiraman	Penyiraman Kedua Zona	Berhasil
2	50	10	Zona 1 Butuh Penyiraman	Penyiraman di Zona 1 Saja	Berhasil
3	12	48	Zona 2 Butuh Penyiraman	Penyiraman di Zona 2 Saja	Berhasil
5	45	52	Kondisi Normal	Emergency Watering Tidak Aktif	Berhasil

3.3.4 Perbandingan Penggunaan Air Sistem Manual dan Otomatis

Perbandingan penggunaan air dilakukan untuk mengevaluasi perbedaan volume air yang digunakan pada penyiraman manual dan sistem otomatis seperti pada tabel 10. Pada kondisi tanah kering dengan durasi penyiraman 8 detik, sistem manual menggunakan 487 mL air, sedangkan sistem otomatis menggunakan 391 mL, sehingga terjadi pengurangan penggunaan air sebesar 96 mL atau 19,71%. Pada kondisi lembap dengan durasi penyiraman 5 detik, sistem manual menggunakan 523 mL, sedangkan sistem otomatis menggunakan 264 mL, sehingga terjadi pengurangan sebesar 259 mL atau 49,52%. Pada kondisi cukup lembap, Fuzzy Mamdani menghasilkan durasi penyiraman 2 detik. Volume air yang digunakan sistem otomatis sebesar 108 mL, sedangkan penyiraman manual menggunakan 476 mL, sehingga terjadi pengurangan sebesar 368 mL atau 77,31%. Sementara itu, pada kondisi basah, sistem menghasilkan durasi penyiraman 0 detik sehingga tidak dilakukan penyiraman dan volume air yang digunakan sistem otomatis adalah 0 mL. Dibandingkan dengan 512 mL pada penyiraman manual, terjadi pengurangan penggunaan air sebesar 512 mL atau 100%. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa volume air yang digunakan sistem otomatis berubah sesuai dengan durasi penyiraman yang dihasilkan oleh Fuzzy Mamdani. Pada kondisi tanah yang semakin lembap, durasi penyiraman yang dihasilkan semakin rendah sehingga volume air yang digunakan juga semakin kecil. Hasil tersebut menunjukkan bahwa mekanisme pengaturan durasi penyiraman berdasarkan kondisi lingkungan berpotensi mengurangi penggunaan air dibandingkan penyiraman manual.

Tabel 10. Perbandingan Penggunaan Air dalam Mode Manual dan Otomatis

No	Kondisi Tanah	Durasi Fuzzy	Sistem Manual (mL)	Sistem Otomatis (mL)	Pengurangan Air (mL)	Pengurangan (%)
1	Kering	8 Detik	487	391	96	19,71%
2	Lembap	5 Detik	523	264	259	49,52%
3	Cukup Lembap	2 Detik	476	108	368	77,31%
4	Basah	0 Detik	512	0	512	100,00%

3.4 Analisis Kegagalan Sistem

Analisis kegagalan dilakukan untuk mengetahui respons sistem ketika salah satu komponen komunikasi atau kondisi lingkungan berada di luar keadaan normal yang sudah terdapat pada tabel 11. Pengujian tidak hanya menilai apakah sistem dapat menjalankan fungsi normal, tetapi juga mengevaluasi respons ketika terjadi gangguan pada komunikasi, sumber data, maupun kondisi lingkungan. Pada kondisi koneksi MQTT terputus, data dari node pengirim tidak dapat diterima oleh Node 3 selama koneksi berlangsung. Sistem kemudian melakukan proses koneksi ulang sehingga komunikasi dapat kembali digunakan setelah koneksi tersedia. Kondisi ini menunjukkan bahwa gangguan komunikasi dapat menyebabkan keterlambatan penerimaan data, tetapi tidak menyebabkan sistem berhenti secara permanen.

Ketika data sensor tidak diterima, sistem tidak dapat memperoleh kondisi lingkungan terbaru untuk digunakan sebagai masukan Fuzzy. Dampaknya adalah keputusan penyiraman dapat tertunda sampai data berikutnya tersedia. Kondisi ini menjadi salah satu keterbatasan sistem karena kualitas keputusan Fuzzy bergantung pada ketersediaan data sensor.

Gangguan pada OpenWeatherMap API tidak secara langsung menghentikan proses inferensi Fuzzy karena data prakiraan cuaca bukan merupakan input utama Fuzzy. Apabila data prakiraan tidak tersedia, sistem kehilangan informasi pendukung untuk melakukan penyesuaian berdasarkan kondisi cuaca, sedangkan keputusan dasar penyiraman tetap berasal dari kelembapan tanah, suhu udara, dan kelembapan udara. Pemisahan fungsi tersebut menunjukkan bahwa kegagalan layanan prakiraan cuaca tidak secara langsung menyebabkan kegagalan mekanisme utama Fuzzy.

Pada kondisi sensor hujan mendeteksi hujan, sistem membatalkan penyiraman otomatis untuk mencegah pemberian air ketika kondisi lingkungan telah menunjukkan adanya hujan. Sementara itu, ketika kelembapan tanah berada di bawah batas minimum, fitur *Emergency Watering* digunakan untuk menjalankan penyiraman di luar jadwal. Kedua kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki mekanisme pengendalian untuk menghadapi kondisi lingkungan yang tidak sesuai dengan kondisi operasi normal. Fitur *Emergency Watering* memang merupakan bagian dari rancangan sistem Anda.

Tabel 11. Hasil Failure Analysis Sistem

No	Kondisi Kegagalan	Kondisi yang Diharapkan	Respons Sistem	Dampak	Status
1	Koneksi MQTT terputus	Sistem mendeteksi kehilangan koneksi dan melakukan koneksi ulang	Node melakukan <i>reconnect</i> MQTT	Data sensor tidak diterima selama koneksi terputus	Pulih
2	Data sensor tidak diterima	Sistem tidak menggunakan data yang tidak tersedia sebagai kondisi normal	Proses keputusan menunggu data berikutnya	Keputusan penyiraman tertunda	Pulih
3	OpenWeatherMap API tidak tersedia	Sistem tetap dapat menjalankan fungsi utama berdasarkan sensor dan Fuzzy	Data prakiraan tidak diperbarui	Penyesuaian berdasarkan cuaca tidak dilakukan sementara	Pulih
4	Sensor hujan mendeteksi hujan	Penyiraman otomatis dihentikan/dibatalkan	Sistem tidak mengaktifkan penyiraman	Tidak ada penyiraman selama kondisi hujan	Berhasil
5	Kelembapan tanah <15%	Emergency Watering diaktifkan	Sistem menjalankan penyiraman darurat	Sistem melakukan penyiraman meskipun berada di luar jadwal	Berhasil

3.5 Pembahasan

Hasil implementasi menunjukkan bahwa tiga node ESP32 dapat terintegrasi melalui MQTT untuk melakukan akuisisi, pengiriman, dan pengolahan data serta pengendalian aktuator. Data sensor yang diterima Node 3 diproses menggunakan Fuzzy Mamdani dan disinkronkan ke Firebase Realtime Database, sedangkan Telegram Bot digunakan untuk notifikasi dan pengendalian jarak jauh. Integrasi tersebut mendukung pemantauan dan penyiraman tanaman secara terintegrasi [22], [24], [26].

Penerapan Fuzzy Mamdani menghasilkan durasi penyiraman berdasarkan kombinasi kelembapan tanah, suhu udara, dan kelembapan udara. Hasil pengujian menunjukkan bahwa durasi meningkat pada kondisi tanah kering dan menurun hingga tidak dilakukan penyiraman pada kondisi tanah basah. Hal ini menunjukkan bahwa sistem dapat menyesuaikan durasi penyiraman berdasarkan kondisi lingkungan. Penggunaan beberapa parameter secara bersamaan juga sejalan dengan penerapan logika fuzzy pada sistem irigasi cerdas sebelumnya [27], [28], [29].

Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi Fuzzy Mamdani dengan arsitektur tiga node ESP32, MQTT, Firebase Realtime Database, Telegram Bot, serta informasi prakiraan cuaca. Selain penyiraman berbasis kondisi lingkungan, sistem menyediakan Scheduled Watering dan Emergency Watering untuk menangani penyiraman rutin dan kondisi kelembapan tanah yang kritis. Informasi prakiraan cuaca digunakan sebagai mekanisme pendukung untuk menyesuaikan pelaksanaan penyiraman [26], [28], [29].

Sistem masih memiliki keterbatasan karena pengujian dilakukan pada dua zona penyiraman dan belum menggunakan sensor aliran untuk mengukur volume air secara langsung. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat memperluas jumlah zona, menambahkan sensor aliran untuk memperoleh pengukuran penggunaan air secara aktual, serta mengembangkan model prediksi kebutuhan air berbasis *machine learning* apabila tersedia dataset yang memadai.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan sistem monitoring dan penyiraman otomatis tanaman vanili berbasis Internet of Things (IoT) dengan arsitektur tiga node ESP32 yang terhubung melalui protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Sistem mengintegrasikan akuisisi data lingkungan, pemrosesan Fuzzy Mamdani, pengendalian aktuator, Firebase Realtime Database, dan Telegram Bot. Fuzzy Mamdani menggunakan kelembapan tanah, suhu udara, dan kelembapan udara sebagai input untuk menentukan durasi penyiraman sebesar 0, 2, 5, atau 8 detik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa durasi penyiraman meningkat pada kondisi tanah yang lebih kering dan menurun hingga tidak dilakukan penyiraman pada kondisi tanah basah. Sensor hujan dan informasi prakiraan cuaca digunakan sebagai mekanisme pendukung untuk menyesuaikan pelaksanaan penyiraman, bukan sebagai input inferensi Fuzzy. Secara agronomis, sistem memberikan pendekatan pengelolaan air yang mempertimbangkan kondisi lingkungan aktual

sehingga dapat mengurangi ketergantungan terhadap pengamatan manual. Fitur *Scheduled Watering* dan *Emergency Watering* memungkinkan sistem menangani penyiraman rutin maupun kondisi kelembapan tanah yang kritis. Dengan demikian, sistem berfungsi sebagai alat bantu pengambilan keputusan dan pengendalian penyiraman pada budidaya vanili, bukan sebagai pengganti pertimbangan agronomis. Penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada pengukuran penggunaan air secara langsung dan cakupan pengujian. Penelitian selanjutnya dapat menambahkan sensor aliran untuk mengukur volume air secara aktual dan membandingkan efisiensi dengan penyiraman manual, memperluas pengujian pada area dan kondisi lingkungan yang lebih beragam, serta mengembangkan model *machine learning* apabila tersedia dataset lingkungan dan kebutuhan air yang memadai.

REFERENCES

- [1] Y. Avianto, "Morphophysiological and Vanillin Quality Evaluation of Vanilla Plants (*Vanilla planifolia* Andr.) under Water Stress," *AGROSAINSTEK: Jurnal Ilmu dan Teknologi Pertanian*, vol. 9, no. 2, hlm. 75–84, Des 2025, doi: <https://doi.org/10.33019/agrosainstek.v9i2.882>.
- [2] J. M. Barreda-Castillo, J. L. Monribot-Villanueva, N. Velázquez-Rosas, P. Bayman, J. A. Guerrero-Analco, dan R. A. Menchaca-García, "Morphological and Physio-Chemical Responses to PEG-Induced Water Stress in *Vanilla planifolia* and *V. pompona* Hybrids," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 24, no. 5, Mar 2023, doi: 10.3390/ijms24054690.
- [3] A. A. Abdelmoneim, H. N. Kimaita, C. M. Al Kalaany, B. Derardja, G. Dragonetti, dan R. Khadra, "IoT Sensing for Advanced Irrigation Management: A Systematic Review of Trends, Challenges, and Future Prospects," *Sensors*, vol. 25, no. 7, Apr 2025, doi: 10.3390/s25072291.
- [4] A. Ali, T. Hussain, dan A. Zahid, "Smart Irrigation Technologies and Prospects for Enhancing Water Use Efficiency for Sustainable Agriculture," *AgriEngineering*, vol. 7, no. 4, Apr 2025, doi: 10.3390/agriengineering7040106.
- [5] D. Vallejo-Gómez, M. Osorio, dan C. A. Hincapié, "Smart Irrigation Systems in Agriculture: A Systematic Review," *Agronomy*, 13(2), Februari 2023. doi: 10.3390/agronomy13020342.
- [6] I. G. P. Sastrawan, I. G. A. Gunadi, dan K. Y. Ernanda, "The use of iot technology based on the forward chaining method to monitor the feasibility of rice field," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1810, no. 1, Mar 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1810/1/012006.
- [7] I. Komang, Y. Muliawan, G. Bendesa, S. #2, I. Bagus, dan N. Pascima, "Simobi: Sistem Monitoring Solar Hydroponic Berbasis Internet Of Things (Iot) Studi Kasus: Pt. Dago Engineering," *Kumpulan Artikel Mahasiswa Pendidikan Teknik Informatika (KARMAPATI)*, vol. 14, no. 1, 2025, doi: 10.23887/karmapati.v14i1.93382.
- [8] M. J. Hoque, M. S. Islam, dan M. Khaliluzzaman, "A Fuzzy Logic- and Internet of Things-Based Smart Irrigation System †," *Engineering Proceedings*, vol. 58, no. 1, 2023, doi: 10.3390/ecsa-10-16243.
- [9] J. Handoyo, E. Febrianto, S. Tinggi, dan T. Ronggolawe, "Fuzzy-Adaptive Smart Irrigation: Sistem Otomatis Penyiraman Tanaman Berbasis IoT dengan Prediksi Kebutuhan Air Real-Time," *Sains Teknik Elektro*, vol. 6, no. 2, hlm. 71–81, Nov 2025, doi: <https://doi.org/10.31294/insantek.v6i2.11145>.
- [10] G. P. Pereira, M. Z. Chaari, dan F. Daroge, "IoT-Enabled Smart Drip Irrigation System Using ESP32," *Internet of Things*, vol. 4, no. 3, hlm. 221–243, Sep 2023, doi: 10.3390/iot4030012.
- [11] K. Setiawan dan R. Fajri Aula, "Penerapan IoT dengan Algoritma Fuzzy dan Mikrokontroler ESP32 dalam Monitoring Penyiraman," *Jurnal Indonesia: Manajemen Informatika dan Komunikasi (JIMIK)*, vol. 5, no. 3, 2024, doi: <https://doi.org/10.35870/jimik.v5i3.977>.
- [12] M. W. Aryadi, I. K. R. Arthana, dan P. H. Suputra, "Smart Lock System Berbasis Iot Menggunakan Esp32 Untuk Keamanan Akses Pusat Data (Studi Kasus: Upa Tik Undiksha)," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 14, no. 1, Jan 2026, doi: 10.23960/jitet.v14i1.8826.
- [13] Jaikarna, Niko Pahala Sihite, Vincent Angelo, Kristian Fredrico Aritonang, dan Jijon Raphita Sagala, "IoT-Based Automatic Ornamental Plant Watering System Using Mamdani Fuzzy Logic With Real-Time Web Monitoring," *Journal of Digital Technology and Computer Science*, hlm. 59–71, Mei 2026, doi: 10.66053/dtcs.v3i2.772.
- [14] N. S P dan N. Hebbbar, "IOT-Based Smart Irrigation System with RealTime Monitoring and Integrated Weather Forecast," *IARJSET*, vol. 13, no. 1, Jan 2026, doi: 10.17148/iarjset.2026.13139.
- [15] W. ode denada mar ella -, F. B. -, A. W. -, dan A. M. -, "Smartsoil: Sistem Monitoring Kelembapan Tanah Berbasis Internet Of Things (Iot) Menggunakan Esp32 Dan Sensor Soil Moisture," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 14, no. 1, Jan 2026, doi: 10.23960/jitet.v14i1.8788.
- [16] I. N. W. R. S. Rizqi Samkayana, "Implementasi Firebase Realtime Database Pada Smart Cat Feeder Berbasis Mikrokontroler Esp32," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3, Jul 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3.7198.
- [17] A. Fadillah, D. S. Nugraha, dan U. Latifa, "Rancang Bangun Smart Drip Irrigation System Berbasis IoT Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy Mamdani dengan Teknik Vertikultur," *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, vol. 6, no. 4, hlm. 703–717, Apr 2026, doi: 10.52436/1.jpti.1668.
- [18] J. P. Bayu, K. A. A. Aryanto, G. Suweken, dan K. Y. E. Aryanto, "IoT-Based portable modules for energy consumption monitoring in smart home system," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1810, no. 1, Mar 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1810/1/012008.
- [19] L. Pada dkk., "Pengembangan Media Pembelajaran Alat Komunikasi Antar-Lab Undiksha Berbasis Iot Informasi Artikel ABSTRAK," *Jurnal Pendidikan Teknik Elektro Undiksha*, vol. 14, no. 1, hlm. 82–95, 2025, doi: 10.23887/jjpte.
- [20] M. S. Gitakarma, T. K. Priyambodo, Y. Suyanto, dan R. Sumiharto, "Architectures, frameworks, and applications in IoT-based smart environment: A review," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1810, no. 1, Mar 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1810/1/012007.
- [21] Aisah Dwi Lestari, Joko Sumarsono, Oki Saputra, dan Asih Priyati, "Development of an Internet of Things (IoT)-Based Horticultural Greenhouse Microclimate Monitoring System Using the Firebase Realtime Database Platform," *Jurnal Agrotek UMMAT*, vol. 13, no. 3, Jul 2026, doi: <https://doi.org/10.31764/jau.v13i03.60>.

- [22] Dwianti Westari dan Syaeful Ilman, “Sistem Penyiraman Tanaman Otomatis Berbasis IoT Menggunakan ESP32, Moisture Sensor, DHT22 Sensor dan Blynk,” *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Informatika*, vol. 3, no. 4, hlm. 314–321, Des 2024, doi: 10.55606/jtmei.v3i4.4941.
- [23] S. Suryanti, H. G. Mawandha, dan H. Oktavianty, “Physiological Characters of Vanilla Plant (*Vanilla planifolia* Andrew) in Various Types of Shade Trees,” *PLANTA TROPIKA*, vol. 12, no. 2, hlm. 159–169, Agu 2024, doi: 10.18196/pt.v12i2.21209.
- [24] P. E. Lim Junior dkk., “Smart Irrigation Berbasis Internet Of Things (Iot) Menggunakan Framework Firebase Pada Tanaman Tomat (Studi Kasus Pada Pertanian Tomat Di Desa Tegalcangkring, Kabupaten Jembrana),” *JUTIK*, vol. 9, Agu 2023, doi: https://doi.org/10.36002/jutik.v9i4.2549.
- [25] A. Morchid dkk., “IoT-enabled smart agriculture for improving water management: A smart irrigation control using embedded systems and Server-Sent Events,” *Sci. Afr.*, vol. 27, Mar 2025, doi: 10.1016/j.sciaf.2024.e02527.
- [26] E. Artetxe, O. Barambones, I. Martín Toral, J. Uralde, I. Calvo, dan A. del Rio, “Smart IoT Irrigation System Based on Fuzzy Logic, LoRa, and Cloud Integration,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 13, no. 10, Mei 2024, doi: 10.3390/electronics13101949.
- [27] F. E. Subagja, A. P. Supriyadi, A. R. Kurniadi, dan Y. Saragih, “Pengujian Sistem Penyiraman Tanaman Otomatis Berbasis IoT,” *Infotronik: Jurnal Teknologi Informasi dan Elektronika*, vol. 8, no. 2, hlm. 91, Des 2023, doi: 10.32897/infotronik.2023.8.2.3015.
- [28] A. Frisky Ardianto, E. Setyaningtyas Rahmasari, dan A. Putra Pratama, “Smart Irrigation System Berbasis IoT dengan Sensor Soil Moisture dan DHT22 Menggunakan Sumber Daya Terbarukan,” *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Bisnis (SENATIB)*, hlm. 2025, Jul 2025, doi: 10.47701/2p6nej88.
- [29] M. Walid, M. Ashar, dan 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, hlm. 52–67, Feb 2024, doi: 10.29407/intensif.v8i1.21351.