

Implementasi Metode Forward Chaining Pada Sistem Irigasi dan Pemupukan Otomatis Untuk Tanaman Cabai

Muhammad Faqih Habiburrohman^{1*}, Rudi Susanto², Afu Ichsan Pradana³

¹Fakultas Ilmu Komputer
Universitas Duta Bangsa Surakarta
¹*220103181@mhs.udb.ac.id

²Fakultas Ilmu Komputer
Universitas Duta Bangsa Surakarta
²rudi_susanto@udb.ac.id

³Fakultas Ilmu Komputer
Universitas Duta Bangsa Surakarta
³afu_ichsan@udb.ac.id

Abstrak— Fluktuasi cuaca ekstrem sering kali menjadi kendala utama dalam budidaya tanaman cabai, di mana pemberian irigasi dan pupuk yang tidak sesuai dengan kondisi lingkungan dapat memicu pembusukan akar dan *plasmolisis* nutrisi. Penelitian ini mengusulkan solusi berupa perancangan sistem irigasi dan pemupukan otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32. Kecerdasan sistem dibangun menggunakan metode *Forward Chaining* yang mengevaluasi pembacaan *Capacitive Soil Moisture Sensor* dan sensor DHT22. Fuzifikasi parameter lingkungan dipetakan ke dalam 12 basis aturan utama untuk menentukan ketepatan waktu aktuasi pompa air dan pompa pupuk NPK cair secara dinamis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mesin inferensi berhasil mengeksekusi penarikan kesimpulan secara majemuk dengan presisi. Selain itu, sistem terbukti handal dalam menjaga stabilitas operasional terhadap *noise* tegangan analog serta berhasil menjalankan protokol keamanan (*failsafe*) saat terjadi kegagalan transmisi data ke *server*.

Kata kunci— *Internet of Things*, Irigasi Otomatis, *Forward Chaining*, ESP32, Sistem Pakar.

Abstract— Extreme weather fluctuations frequently pose a major challenge in chili cultivation, where improper irrigation and fertilization unsuited to environmental conditions can trigger root rot and nutrient plasmolysis. This study proposes a solution by designing an automatic irrigation and fertilization system based on the Internet of Things (IoT) using an ESP32 microcontroller. The system's intelligence is built upon the Forward Chaining method, which evaluates readings from a Capacitive Soil Moisture Sensor and a DHT22 sensor. The fuzzification of environmental parameters is mapped into 12 main rule bases to dynamically determine the precise actuation timing for the water pump and liquid NPK fertilizer pump. Testing results indicate that the inference engine successfully executes multiple concurrent deductions with high precision. Furthermore, the system has proven reliable in maintaining operational stability against analog voltage noise and successfully executing a local safety protocol (*failsafe*) during data transmission failures to the server.

Keywords— Internet of Things, Automatic Irrigation, Forward Chaining, ESP32, Expert System.

I. PENDAHULUAN

Sektor pertanian saat ini dihadapkan pada tantangan besar berupa fluktuasi cuaca ekstrem yang sulit diprediksi, yang berdampak langsung pada produktivitas bernilai ekonomi tinggi seperti tanaman cabai[1]. Pada budidaya tanaman cabai yang memiliki tingkat sensitivitas tinggi terhadap perubahan kondisi lingkungan, khususnya pada parameter kelembaban media tanam dan suhu udara. Adaptasi antara tanaman yang kurang baik pada iklim disekitarnya, dapat memicu stres fisiologis pada fase vegetatif maupun generatif. Sehingga dengan adanya teknologi yang melibatkan bisa menjaga stabilitas lingkungan, agar pertumbuhan tanaman dapat konsisten.

Tantangan utama dalam perawatan tanaman cabai adalah menghindari *overwatering* yang berisiko menyebabkan pembusukan akar, serta menentukan waktu yang tepat untuk pemberian nutrisi buatan[2]. Pemberian pupuk cair pada saat suhu lingkungan

terlalu tinggi dapat berakibat fatal, karena laju penguapan yang cepat akan meninggalkan residu pekat yang memicu terjadinya *plasmolisis*, yaitu terlepasnya membran sel tanaman akibat hilangnya air secara drastis[3][4]. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem yang mampu mengevaluasi kondisi real time pada lingkungan secara otomatis.

Meskipun sistem *Internet of Things* (IoT) telah banyak diimplementasikan untuk otomatisasi pertanian, sebagian besar rancangan sistem pengairan cerdas terdahulu masih mengandalkan logika yang pada nilai ambang batas (*threshold*) tunggal atau sekadar menggunakan pengaturan jadwal (*timer*)[5][6]. Sistem semacam ini memiliki keterbatasan dalam hal kecerdasan buatan, karena tidak mampu mengevaluasi dan membuat kesimpulan antara data yang diperoleh sensor dengan kondisi lingkungan. Sehingga dapat mengakibatkan tanaman cabai mengalami pembusukan akar karena penyiraman air yang berlebihan[7].

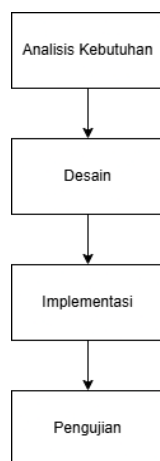
Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem irigasi dan pemupukan otomatis dengan mengimplementasikan algoritma *Forward Chaining* pada mikrokontroler. Metode ini di mampu memberikan keputusan yang bertumpu pada sekumpulan data faktual dari lapangan[8]. Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang dan menguji kelayakan sistem IoT yang tidak hanya mampu mengeksekusi aktuator secara otomatis, tetapi juga memiliki kecerdasan untuk menunda pemupukan saat suhu tidak ideal dan mengenali kondisi penyiraman kombinasi (*fertigasi*), sehingga risiko *overwatering* dan *plasmolisis* dapat dicegah.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan secara rinci tentang tahapan penelitian yang dilakukan.

A. Tahapan Penelitian

Penelitian ini melewati beberapa tahapan penelitian, Alur tahapan penelitian dapat dilihat pada gambar berikut,



Gambar 1. Alur Tahapan Penelitian

1. Analisis Kebutuhan

Pada tahap ini dilakukan analisis kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak untuk mendukung penelitian. Perangkat keras yang digunakan meliputi, ESP32, Sensor Soil Moisture, Sensor DHT22, Modul RTC DS3231, LM2596, Relay 2 Channel, Adaptor 5V dan Mini Pump DC. Sedangkan perangkat lunak

yang digunakan meliputi, Arduino IDE dan MySQL.

2. Desain

Pada tahap ini dilakukan skema desain perancangan perangkat keras agar nantinya komponen dapat dirakit sesuai dengan desain yang telah dibuat. Pembuatan *web dashboard* juga dilakukan untuk menampilkan data dari semua sensor.

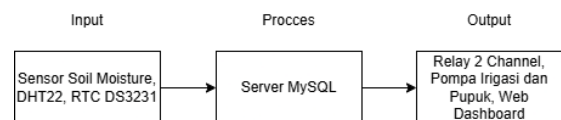
3. Implementasi

Perakitan perangkat keras akan dilakukan berdasarkan skema desain yang telah dibuat, dan diimplementasikan langsung pada lapangan.

4. Pengujian

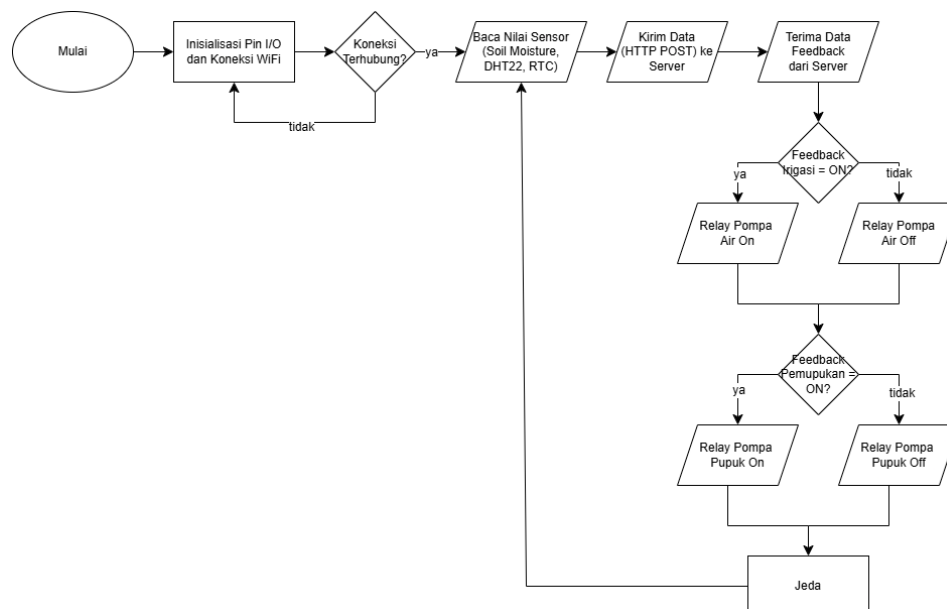
Pengujian bertujuan untuk memastikan bahwa sistem mampu berjalan sesuai dengan aturan (*rule base*) yang telah dirancang.

B. Arsitektur dan Alur Sistem



Gambar 2. Diagram Arsitektur Sistem

Terdapat 3 diagram utama pada arsitektur sistem, yaitu *input* (sensor *Capacitive Soil Moisture*, DHT22, dan modul RTC DS3231), *proses* (Mikrokontroler ESP32 dan *Server Backend* Flask/Python), serta *output* (*relay 2 channel* untuk pompa air serta pupuk, dan *web dashboard*).



Gambar 3. Flowchart Alur Sistem

Berdasarkan topologi dan diagram alur sistem, ESP32 bertindak sebagai *gateway* yang mengumpulkan nilai faktual dari lingkungan secara terus-menerus (*looping*). Data tersebut ditransmisikan melalui protokol HTTP POST menuju *server backend*. *Server* yang terhubung dengan basis data MySQL bertugas menyimpan log riwayat (*history*) sekaligus mengeksekusi mesin inferensi untuk mengevaluasi parameter sebelum mengirimkan sinyal balasan (*feedback*) aktuasi ke ESP32.

C. Forward Chaining

Pusat kecerdasan buatan pada sistem ini terletak pada penerapan metode *Forward Chaining*. Algoritma tidak menggunakan percabangan kondisi statis, melainkan menelusuri rentetan fakta dari titik awal hingga mencapai kesimpulan akhir. Proses fuzifikasi diterapkan untuk mengonversi data sensor mentah ke dalam fakta kategorikal, seperti status kelembaban tanah (kering/normal/basah), kondisi suhu lingkungan (rendah/normal/tinggi), dan pemenuhan jadwal (*True/False*)[9].

Kumpulan fakta tersebut dievaluasi secara dinamis menggunakan 12 aturan dasar (*Rule Base*) yang ditanamkan pada *working memory* sistem, sebagaimana dirinci pada Tabel 1.

Tabel 1. Rule Base Forward Chaining

Kode	Struktur Logika (IF -THEN)	Kesimpulan/Aksi
R1	IF Kelembaban Tanah Kering	Irigasi = ON
R2	IF Kelembaban Tanah Normal	Irigasi = OFF
R3	IF Kelembaban Tanah Basah	Irigasi = OFF
R4	IF Jadwal <i>False</i>	Pemupukan = OFF
R5	IF Jadwal <i>True</i> AND Suhu Tinggi	Pemupukan = Tunda
R6	IF Jadwal <i>True</i> AND Kelembaban Udara Rendah	Pemupukan = Tunda
R7	IF Jadwal <i>True</i> AND Suhu Normal AND Kelembaban Udara Normal	Pemupukan = ON
R8	IF Jadwal <i>True</i> AND Suhu Rendah AND Kelembaban Udara Normal	Pemupukan = ON
R9	IF Jadwal <i>True</i> AND Suhu Normal AND Kelembaban Udara Tinggi	Pemupukan = ON
R10	IF Jadwal <i>True</i> AND Suhu Rendah AND Kelembaban Udara Tinggi	Pemupukan = ON
R11	IF Kelembaban Tanah Kering AND Suhu Tinggi	Prioritas Irigasi = Tinggi (Tanaman Stres)
R12	IF Irigasi ON AND Pemupukan ON	Metode = Fertigasi (Pupuk cair ikut air)



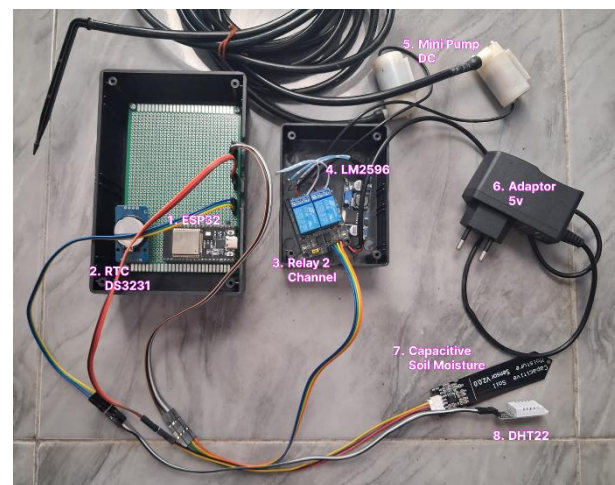
Gambar 4. Decision Tree

Decision Tree digunakan untuk memetakan jalur inferensi dari aturan-aturan di atas. Keunggulan utama dari perancangan mesin inferensi ini terletak pada kemampuannya menembak aturan secara majemuk dan menghasilkan fakta turunan. Sebagai contoh, apabila aktuator irigasi dan pemupukan bernilai aktif secara bersamaan akibat kombinasi pemenuhan fakta lingkungan dan jadwal, *working memory* akan secara otomatis memicu aturan turunan R12 untuk menyimpulkan bahwa metode *Fertigasi* (pendistribusian pupuk cair yang terintegrasi dengan air irigasi) sedang berlangsung. Hal ini memastikan setiap keputusan sistem berjalan secara selaras dan adaptif terhadap kondisi lapangan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menguraikan hasil pengujian dari sistem irigasi dan pemupukan cerdas yang telah dirancang. Pengujian difokuskan pada tiga parameter utama: akurasi pembacaan instrumen perangkat keras, ketepatan penarikan kesimpulan oleh algoritma *Forward Chaining*, serta stabilitas sistem dalam menangani anomali operasional.

A. Implementasi Sistem



Gambar 5. Rangkaian Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras dilakukan dengan merakit mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali komputasi. Mikrokontroler ini dihubungkan dengan instrumen pembaca lingkungan, yaitu sensor *Capacitive Soil Moisture* dan sensor DHT22. Sistem kelistrikan juga dilengkapi dengan modul *relay 2 channel* yang difungsikan sebagai sakelar otomatis

untuk memutus atau mengalirkan tegangan menuju aktuator berupa pompa air dan pompa pupuk cair.



Gambar 6. Implementasi Sistem

Setelah perakitan komponen internal selesai, sistem diuji cobakan secara langsung pada objek penelitian. Gambar 6 memperlihatkan tata letak fisik implementasi alat pada tanaman cabai yang ditanam pada media *polybag*. Sensor kelembaban tanah ditancapkan tepat pada area perakaran media tanam untuk mendapatkan pembacaan yang presisi. Sementara itu, aktuator pompa air irigasi ditempatkan pada wadah penampungan air bersih, dan pompa pemupukan dicelupkan pada wadah nutrisi cair. Tata letak fisik ini disiapkan untuk membuktikan apakah sistem dapat mengeksekusi logika *Forward Chaining* secara *real-time* di lapangan.

B. Pengujian Sistem

1. Pengujian Kalibrasi dan Respon Sensor

Pengujian pertama dilakukan untuk mengkalibrasi pembacaan *Capacitive Soil Moisture Sensor* agar merepresentasikan kondisi aktual media tanam cabai secara presisi[10]. Nilai analog mentah (*raw data*) dikalibrasi ke dalam persentase, di mana titik kering maksimal berada pada nilai tegangan analog 3150 dan titik jenuh air (basah) berada pada nilai 940. Setelah proses kalibrasi, pengujian nilai sensor dilakukan untuk memvalidasi akurasi pembacaan pada tiga kondisi fisik media tanam yang berbeda. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengujian Sensor Kelembaban Tanah

Kondisi Media Tanam	Nilai Analog (Raw Data)	Konversi Persentase (%)	Status Sistem
Tanah Kering (Belum disiram)	2377	34%	Kering
Tanah Normal (Lembab)	1776	62%	Normal
Tanah Basah (Jenuh Air)	976	98%	Basah

Selain kelembaban tanah, dilakukan juga pengujian nilai untuk sensor DHT22 yang berfungsi membaca suhu dan kelembaban udara. Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai pada sensor DHT22 terhadap data cuaca dari BMKG pada titik koordinat lokasi yang sama untuk tiga waktu yang berbeda (pagi, siang, dan sore).

Tabel 3. Pengujian Suhu Sensor DHT22

Waktu	Suhu DHT22 (°C)	Suhu BMKG (°C)	Selisih Suhu
Pagi (08.00)	24	26	2
Siang (14.00)	32	34	2
Sore (17.00)	26	28	2

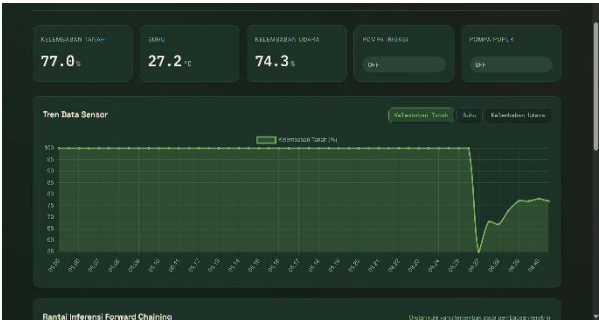
Tabel 4. Pengujian Kelembaban Udara Sensor DHT22

Waktu	Kelembaban DHT22 (%)	Kelembaban BMKG (%)	Selisih
Pagi (08.00)	58	55	3
Siang (14.00)	53	44	9
Sore (17.00)	61	57	4

Berdasarkan pengujian pada Tabel 3, sensor suhu menunjukkan selisih yang sangat stabil (konstan 2°C) terhadap data BMKG. Sedangkan pada Tabel 4, terdapat selisih kelembaban tertinggi sebesar 9% pada siang hari. Terdapatnya margin selisih ini sangat wajar karena adanya perbedaan iklim mikro. Kelembaban udara lokal di sekitar pot tanaman pada siang hari lebih cepat menguap dan turun secara drastis akibat panas lingkungan sekitar, sedangkan stasiun BMKG mengukur kelembaban rata-rata regional di dalam wilayah yang teduh. Secara keseluruhan, sensor terbukti memberikan angka pembacaan yang presisi dan stabil, sehingga data masukan (*input*) yang dikirimkan menuju mesin inferensi *Forward Chaining* dijamin validitasnya.

Selain validasi angka, respon *real-time* sensor juga dipantau melalui antarmuka *web dashboard*. Pada saat pengujian ulang penancapan sensor ke dalam media tanam, sistem mencatat adanya fluktuasi transien (*dip*) pada grafik rekam jejak, di mana

tingkat kelembaban turun drastis menyentuh 55% sebelum akhirnya merangkak naik dan stabil di angka 77%. Fenomena ini membuktikan tingginya tingkat kepekaan sensor terhadap rongga udara yang terbentuk antara pelat kapasitif dan partikel tanah sesaat setelah ditancapkan. Setelah tanah kembali memadat, sensor berhasil memberikan pembacaan yang stabil yang dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Kalibrasi Sensor Kelembaban Tanah

2. Evaluasi Forward Chaining

Pengujian algoritma kecerdasan buatan dilakukan dengan memonitor rekam jejak (*log history*) pada basis data MySQL untuk melihat aturan (*rules*) mana saja yang dieksekusi oleh *server backend* berdasarkan masukan kondisi lingkungan.

Riwayat Pembacaan & Keputusan							13 Data Terakhir
WAKTU	KT (%)	SUHU (°C)	KU (%)	RULE TERAPAN	IRIGASI	PEMUPUKAN	
05/07, 15:57	84.0	26.0	76.5	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:56	79.0	27.1	70.9	R2, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:55	81.0	29.0	70.2	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:55	82.0	29.0	77.4	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:55	83.0	29.0	70.0	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:54	81.0	29.0	70.4	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:54	80.0	29.0	74.5	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:53	83.0	29.5	74.9	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:53	85.0	26.2	75.1	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:53	83.0	26.2	76.3	R3, R4	OFF	OFF	

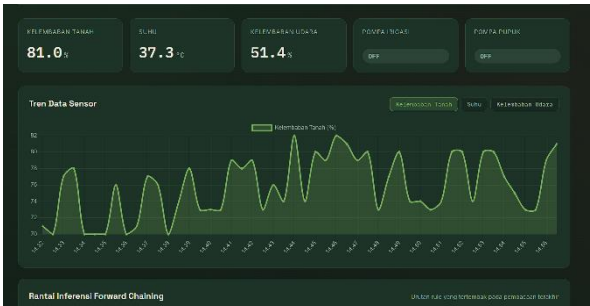
Gambar 8. Riwayat Rules yang dieksekusi

Berdasarkan pengujian secara *real-time*, algoritma *Forward Chaining* terbukti mampu mengeksekusi penarikan kesimpulan secara majemuk. Pada kondisi di mana tanah berstatus basah (kelembaban > 80%) dan waktu aktual belum memasuki jadwal pemupukan, *working memory* pada mesin inferensi secara otomatis memicu aturan R3 dan R4. Hasilnya, *server* mengirimkan sinyal perintah untuk mematikan (*OFF*) baik pompa irigasi maupun pompa pemupukan secara bersamaan. Hal ini memastikan tanaman cabai terhindar dari risiko

pembusukan akar (*over-watering*) serta *over-dosing* nutrisi.

3. Analisis Failsafe dan Stabilitas Sistem

Pengujian sistem operasional dilakukan untuk mengukur ketahanan alat terhadap gangguan kelistrikan serta gangguan eksternal berupa pemutusan koneksi *server* (*server downtime*).



Gambar 9. Fluktuasi Grafik Kelembaban Tanah Karena Noise Tegangan

Pada pengujian lapangan, pada grafik kelembaban tanah terekam adanya *noise* tegangan pada ESP32 yang memicu fluktuasi pembacaan persentase kelembaban secara cepat. Meskipun terjadi lonjakan pembacaan sesaat, algoritma sistem pakar tetap stabil dan tidak memicu aktiasi pompa yang keliru (*false alarm*), karena fluktuasi tersebut masih berada jauh di atas batas kritis aturan kekeringan (< 50%).

Riwayat Pembacaan & Keputusan							13 Data Terakhir
WAKTU	KT (%)	SUHU (°C)	KU (%)	RULE TERAPAN	IRIGASI	PEMUPUKAN	
05/07, 15:42	82.0	27.0	79.0	R2, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:42	81.0	27.0	79.0	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:41	79.0	27.0	78.0	R2, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:41	84.0	26.0	78.0	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:37	81.0	29.0	75.5	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:36	78.0	26.1	75.8	R2, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:36	81.0	26.0	76.2	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:35	82.0	26.0	77.4	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:35	83.0	29.8	75.0	R3, R4	OFF	OFF	
05/07, 15:34	84.0	26.0	75.4	R3, R4	OFF	OFF	

Gambar 10. Log Histori Server Down

Selain itu, sistem berhasil menunjukkan kehandalan mode keamanan lokal (*failsafe*). Berdasarkan *log database*, terjadi kegagalan transmisi data (jaringan terputus) selama kurang lebih dua jam. Selama *server downtime* tersebut, mikrokontroler ESP32 secara otomatis mengambil alih kendali lokal. Sensor mendeteksi tanah masih dalam kondisi jenuh basah, sehingga sistem

memblokir aktuasi *relay* irigasi. Hal ini membuktikan sistem aman dari risiko penyiraman tanpa henti saat kehilangan instruksi dari *server backend*.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan, implementasi metode *Forward Chaining* pada sistem irigasi dan pemupukan otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk tanaman cabai telah berhasil beroperasi sesuai dengan parameter agronomi yang ditetapkan. Mesin inferensi terbukti mampu mengevaluasi kondisi multivariabel secara simultan melalui 12 basis aturan (*Rule Base*), sehingga aktuasi penyiraman dan pemberian nutrisi berjalan presisi tanpa memicu *over-watering* maupun *plasmolisis*. Sistem juga menunjukkan tingkat kehandalan yang tinggi dalam menangani anomali di lapangan, terbukti dari stabilitas algoritma dalam mengabaikan *noise* kelistrikan sensor serta keberhasilan fitur *failsafe* lokal dalam memblokir aktuasi irigasi saat terjadi pemutusan koneksi *server*.

REFERENSI

- [1] A. W. Nurcahyo, N. Hadiyanti, and A. H. Prastiwi, "Hubungan Unsur Iklim terhadap Produksi Tanaman Cabai Rawit (*Capsicum frutescens* L .) di Kabupaten Nganjuk," vol. 5431, pp. 1–11, 2024.
- [2] A. Hasna, K. Aswha, F. Yovandi, and A. N. Rosyadi, "Implementasi Internet of Things (IoT) pada Sistem Irigasi Otomatis untuk Tanaman Cabai Menggunakan Aplikasi Blynk," pp. 546–553, 2025.
- [3] N. W. Yuwono, *Ensiklopedia Pupuk: Pengetahuan Singkat tentang Pupuk*, 1st ed. Makassar: Penerbit Nasmedia (PT. Nas Media Indonesia), 2025.
- [4] R. Adawiyah, "Pengamatan Plasmolisis pada Kentang," vol. 02, no. 2021, pp. 1564–1569, 2025.
- [5] F. Akbar *et al.*, "Sistem Irigasi Otomatis IoT Off-Grid untuk Optimalisasi Budidaya Cabai di Wilayah Pedesaan Tanpa Listrik Universitas Wijaya Kusuma Surabaya , Indonesia (kelembaban tanah , suhu) secara real-time dan pengaktifan pompa air secara otomatis," pp. 13–23, 2026.
- [6] A. Hernita, A. Yulandari, and A. Jalil, "SMART IRRIGATION SYSTEM WITH SENSING METHOD AND," pp. 141–152, 2022.
- [7] M. Kurniawan, Ridho Amrul, Hanifah Mutia Zaida Ningrum Hafiz, *Penerapan Standar Operasional Prosedur pada Budidaya Tanaman Cabai untuk Mendapatkan Produksi Optimum*. Jambi: PT. Sonpedia Publishing Indonesia, 2024.
- [8] U. U. Indonesia *et al.*, "SAYURAN BERBASIS WEB MENGGUNAKAN METODE FORWARD CHAINING DETERMINATION OF SUITABILITY PLANTING LAND FOR TYPES OF VEGETABLE PLANTS WEB-BASED USING THE FORWARD CHAINING," vol. 10, no. 2, pp. 58–62, 2024.
- [9] A. Prasetya and B. H. Hayadi, "Konsep dan Implementasi Sistem Cerdas Menggunakan Algoritma Logika Fuzzy".
- [10] M. Sufi, N. Alif, K. Monika, D. Pertiwi, and U. Telkom, "Design and Implementation of an IoT-Based Smart Drip Irrigation System Using Takagi-Sugeno Fuzzy Logic for Melon Cultivation," vol. 9, no. 6, 2025.