

SMART FARMING IoT BERBASIS FUZZY SUGENO UNTUK PEMANTAUAN TANAH PESISIR

Subardin¹, La Ode. Muh. Fid Aksara², Nur Hafizah³

^{1,2,3}Jurusan Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo

Jln. H.E.A Mokodompit No. 8 Kampus Baru UHO Bumi Tridharma Anduonohu

¹subardin@uho.ac.id, ²fidaksara@uho.ac.id, ³nurhafizahhhh@gmail.com

Abstract

This study proposes and implements a smart farming system based on the Internet of Things (IoT) to improve the efficiency of celery cultivation through real-time monitoring and control of soil and environmental conditions. The novelty of this research lies in the integration of multi-parameter sensors (NPK 7-in-1, DHT22, and ultrasonic) with the Sugeno fuzzy logic method to generate adaptive and automated decisions under dynamic field conditions. The system is developed using an ESP32 microcontroller with HTTPS-based communication connected to Firebase, enabling secure and continuous remote monitoring via a mobile application. Experimental results show that the system measures environmental parameters with an average accuracy of over 90% compared to reference instruments and achieves a data transmission success rate of 98% under normal network conditions. The application of the Sugeno fuzzy method produces more stable irrigation and fertilization decisions, indicated by a 25% reduction in soil moisture fluctuations compared to conventional methods. In addition, the system reduces water consumption by up to 30% and improves fertilizer efficiency based on the actual needs of the plants. These findings demonstrate that an IoT-based and computational intelligence approach can support more efficient, sustainable, and data-driven precision agriculture.

Keywords : *Smart Farming IoT, Fuzzy Sugeno, ESP32, NPK Sensor, Automated Irrigation*

Abstrak

Penelitian ini mengusulkan dan mengimplementasikan sistem smart farming berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk meningkatkan efisiensi budidaya tanaman seledri melalui pemantauan dan pengendalian kondisi tanah serta lingkungan secara *real time*. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi sensor multi-parameter (NPK 7-in-1, DHT22, dan ultrasonik) dengan metode logika fuzzy Sugeno untuk menghasilkan keputusan otomatis yang adaptif terhadap kondisi lahan yang dinamis. Sistem dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan komunikasi data berbasis HTTPS yang terhubung ke Firebase, sehingga memungkinkan pemantauan jarak jauh secara aman dan kontinu melalui aplikasi mobile. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu membaca parameter lingkungan dengan tingkat akurasi rata-rata di atas 90% dibandingkan alat ukur referensi, serta memiliki tingkat keberhasilan transmisi data sebesar 98% pada kondisi jaringan normal. Penerapan metode fuzzy Sugeno menghasilkan keputusan irigasi dan pemupukan yang lebih stabil, ditunjukkan oleh penurunan fluktuasi kelembaban tanah hingga 25% dibandingkan metode konvensional. Selain itu, sistem ini mampu menghemat konsumsi air hingga 30% serta meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk berdasarkan kebutuhan aktual tanaman. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis IoT dan kecerdasan komputasional dapat mendukung pertanian presisi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan berbasis data.

Kata kunci : *Smart Farming IoT, Fuzzy Sugeno, ESP32, Sensor NPK, Irigasi Otomatis*

1. PENDAHULUAN

Pertanian modern saat ini menghadapi berbagai tantangan besar seperti meningkatnya kebutuhan pangan global, keterbatasan lahan pertanian, dan perubahan iklim yang menyebabkan variabilitas kondisi lingkungan. Untuk menjawab tantangan tersebut, dibutuhkan sistem pertanian yang efisien, adaptif, dan cerdas dalam memantau serta mengendalikan faktor-faktor yang memengaruhi pertumbuhan tanaman. Salah satu solusi inovatif yang berkembang pesat adalah penerapan Smart Farming berbasis *Internet of Things* (IoT). Teknologi ini memungkinkan pengumpulan data secara *real-time* dari berbagai sensor yang ditempatkan di lahan pertanian, seperti sensor kelembapan, suhu, pH, dan nutrisi tanah. Data tersebut kemudian digunakan untuk membantu pengambilan keputusan yang lebih akurat dalam pengelolaan lahan pertanian.

Kawasan pesisir memiliki potensi sebagai lahan pertanian alternatif dalam mendukung ketahanan pangan nasional. Namun, pemanfaatan tanah pesisir masih menghadapi kendala seperti degradasi kualitas tanah, salinitas tinggi, ketidakseimbangan unsur hara, serta keterbatasan sistem pemantauan kondisi tanah secara berkelanjutan. Oleh karena itu, diperlukan solusi berbasis teknologi yang mampu memantau dan mengevaluasi kualitas tanah pesisir secara *real time* dan akurat sebagai dasar pengambilan keputusan pengelolaan lahan yang adaptif dan berkelanjutan

Dalam *Smart Agricultural Technologies*, penerapan IoT telah menjadi fondasi utama dalam mewujudkan pertanian presisi (*precision agriculture*), yang berfokus pada pemanfaatan data untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air, pupuk, dan tenaga kerja, sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan. Dengan sistem pemantauan dan pengendalian otomatis, petani dapat mengetahui kondisi lahan secara akurat dan mengambil tindakan tepat waktu, sehingga produktivitas tanaman dapat dioptimalkan [1].

Salah satu tanaman hortikultura yang banyak dibudidayakan di Indonesia adalah seledri (*Apium graveolens* L.), yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan kebutuhan lingkungan tumbuh yang cukup spesifik. Tanaman ini memerlukan media tanam dengan tekstur gembur, pH netral hingga sedikit basa, serta kelembapan tanah yang terjaga secara stabil. Pada Jurnal Universitas Labuhanbatu menunjukkan bahwa kombinasi jenis media tanam dan nutrisi berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan seledri, baik dari segi tinggi tanaman maupun jumlah daun [2]. Temuan ini menegaskan

pentingnya pemantauan kualitas media tanam secara kontinu untuk memastikan kondisi pertumbuhan yang optimal.

Dalam penerapan keputusan otomatis pada sistem pertanian cerdas, salah satu metode yang banyak digunakan adalah logika fuzzy, khususnya tipe Sugeno. Metode Fuzzy Mamdani dikenal sebagai salah satu metode logika fuzzy yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan dalam situasi yang tidak pasti [3]. metode Sugeno menghasilkan keluaran numerik yang kontinu sehingga cocok digunakan untuk sistem pengendalian otomatis seperti pengaturan penyiraman atau pemberian nutrisi tanaman. Dalam sebuah penelitian menjelaskan bahwa integrasi sistem IoT dengan metode fuzzy mampu mengoptimalkan jadwal irigasi tanaman melalui analisis data sensor secara dinamis [4]. Penelitian lain juga menunjukkan keberhasilan penerapan metode fuzzy Sugeno dalam sistem irigasi berbasis IoT untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 20% dibandingkan sistem manual [5].

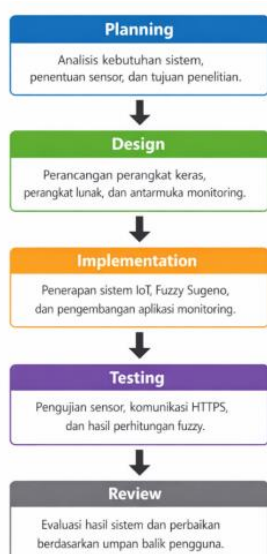
Berbagai penelitian telah mengkaji penerapan IoT dalam pertanian serta penggunaan logika fuzzy, baik Mamdani maupun Sugeno, untuk pengambilan keputusan otomatis. Integrasi IoT dan metode fuzzy terbukti mampu meningkatkan efisiensi irigasi dan penggunaan sumber daya. Namun demikian, masih terdapat keterbatasan penelitian yang secara khusus mengintegrasikan pemantauan kualitas tanah pesisir dan lingkungan media tanam untuk tanaman seledri menggunakan metode fuzzy Sugeno, serta memanfaatkan protokol komunikasi HTTPS untuk menjamin keamanan data. Celah penelitian (*research gap*) ini menunjukkan perlunya pengembangan sistem yang tidak hanya cerdas dan adaptif, tetapi juga aman dan kontekstual terhadap karakteristik lahan pesisir.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem Smart Farming berbasis IoT yang mampu memantau kondisi tanah dan lingkungan secara *real-time*, mengolah data menggunakan metode fuzzy Sugeno untuk menentukan tindakan otomatis seperti irigasi dan pemupukan, serta mengirimkan data secara aman melalui protokol HTTPS. Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan sistem terintegrasi yang menggabungkan pemantauan multi-parameter, pengambilan keputusan cerdas, dan komunikasi data yang aman dalam konteks lahan pesisir. Sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, mendukung pertanian presisi, dan berkontribusi

pada pengembangan pertanian berkelanjutan di Indonesia.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Agile dalam pengembangan sistem pemantauan kualitas tanah dan lingkungan berbasis *Internet of Things* (IoT) karena sifatnya yang iteratif dan adaptif terhadap perubahan kebutuhan dan kondisi lapangan, khususnya pada lingkungan pesisir. Proses pengembangan dilakukan secara bertahap melalui beberapa siklus, meliputi analisis kebutuhan berdasarkan karakteristik tanaman seledri dan tanah pesisir, perancangan sistem yang mencakup perangkat keras (sensor NPK 7-in-1, DHT22, ultrasonik) dan perangkat lunak (ESP32, Firebase, aplikasi mobile), implementasi dan integrasi sistem, serta pengujian dan evaluasi untuk menilai akurasi sensor, kestabilan komunikasi, dan kinerja metode fuzzy Sugeno, yang kemudian disempurnakan melalui iterasi. Pemilihan parameter seperti kelembapan, suhu, dan kandungan NPK didasarkan pada kebutuhan fisiologis tanaman, sementara metode fuzzy Sugeno digunakan karena kemampuannya menghasilkan output numerik yang stabil untuk kontrol otomatis, dan protokol HTTPS diterapkan untuk menjamin keamanan data. Validitas sistem diuji melalui perbandingan dengan alat ukur referensi dan konsistensi hasil keputusan, meskipun penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada skala pengujian, ketergantungan jaringan internet, serta belum mengakomodasi faktor lingkungan lain secara menyeluruh.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.1. Planning (Perencanaan)

Pada tahap *Planning*, dilakukan penggalan kebutuhan dan identifikasi masalah untuk merancang sistem yang tepat sasaran. Kegiatan inti di sini meliputi analisis kebutuhan fungsional dan non-fungsional dari sistem yang akan dikembangkan, seperti pemilihan sensor (misalnya sensor NPK 7-in-1 untuk parameter tanah dan sensor ultrasonik untuk level cairan), serta penentuan tujuan utama sistem untuk memantau kondisi lingkungan dan tanah secara otomatis.

Selain itu, perencanaan juga mencakup pemahaman terhadap konteks aplikasi *Smart Farming* dan metodologi yang akan digunakan, termasuk penerapan metode Fuzzy Sugeno sebagai basis pengambilan keputusan otomatis. Pemahaman literatur dan teknologi pendukung seperti *Internet of Things* (IoT) sangat krusial pada tahap ini untuk memastikan arah penelitian valid secara teoritis dan praktis. Beberapa penelitian telah menerapkan pendekatan IoT dengan fuzzy logic dalam pertanian untuk otomatisasi dan monitoring yang adaptif, menunjukkan bahwa kombinasi teknologi ini efektif dalam optimasi sistem pertanian cerdas.

2.2. Design (Perancangan)

Tahap *Design* fokus pada perancangan sistem baik dari sisi perangkat keras maupun perangkat lunak. Pada aspek perangkat keras, dilakukan perancangan instalasi sensor sesuai dengan kebutuhan data yang diukur, seperti susunan sensor DHT22 untuk suhu dan kelembapan udara, sensor NPK 7-in-1 untuk analisis kondisi tanah, serta sensor ultrasonik untuk mengukur ketinggian level cairan. Semua perangkat ini direncanakan agar terintegrasi dengan mikrokontroler dan sistem komunikasi IoT.

Perancangan perangkat lunak mencakup struktur pemrosesan data mulai dari pembacaan sensor, transmisi data melalui protokol aman seperti HTTPS, hingga alur penyimpanan dan pemrosesan di server *cloud* atau aplikasi monitoring. Selain itu, desain antarmuka pengguna dibuat agar data yang diterima mudah dipahami, misalnya *dashboard real-time* pada aplikasi web/Android. Desain ini juga mempertimbangkan struktur *rule base* fuzzy Sugeno yang akan digunakan dalam sistem keputusan otomatis, sehingga hasil perhitungan *logic fuzzy* dapat mengontrol sistem secara efektif.

2.2.1. ESP 32

ESP32 adalah sebuah mikrokontroler berbasis *Sistem-on-Chip* (SoC) yang menggunakan

inti *Tensilica Xtensa* dan mengintegrasikan modul Wi-Fi (802.11 b/g/n) dan *Bluetooth Classic* / BLE pada satu paket kecil, sehingga memudahkan pembuatan perangkat *Internet of Things* (IoT) yang memerlukan konektivitas nirkabel. Integrasi radio ganda ini membuat ESP32 sangat cocok untuk aplikasi IoT edge yang perlu komunikasi lokal (*Bluetooth/ESP-NOW*) sekaligus koneksi ke awan lewat Wi-Fi [6].

2.2.2. Sensor NPK 7 in 1

Sensor NPK 7-in-1 adalah sensor multifungsi yang mampu mengukur tujuh parameter penting dalam tanah sekaligus, yaitu: Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), pH tanah, kelembapan tanah, suhu tanah, dan cahaya. Sensor ini sering digunakan dalam sistem *Smart Farming* berbasis IoT untuk memberikan data lengkap tentang kondisi media tanam. [7]

Sensor NPK 7-in-1 bekerja dengan prinsip elektrokimia untuk N, P, K, dan pH, serta elektronik digital untuk kelembapan, suhu, dan cahaya. Data yang diperoleh sensor ini kemudian dikirim ke mikrokontroler (misalnya ESP32) untuk diproses, dianalisis menggunakan Fuzzy Sugeno, dan ditampilkan di aplikasi atau dashboard monitoring.

2.2.3. Sensor DHT 22

Sensor DHT22 adalah sensor digital yang dirancang untuk mengukur suhu udara dan kelembapan relatif (*relative humidity*) secara simultan. Sensor ini banyak digunakan dalam sistem *Internet of Things* (IoT) karena memiliki antarmuka digital sederhana, konsumsi daya rendah, dan kemampuan pengukuran cukup baik untuk aplikasi pemantauan lingkungan. DHT22 bekerja dengan mengubah sinyal dari elemen pengukur suhu dan kelembapan menjadi data digital yang kemudian dapat dibaca oleh mikrokontroler seperti ESP32 atau Arduino untuk pemantauan secara *real-time* [8].

Spesifikasi umum sensor DHT22:

1. Rentang suhu: -40 °C hingga 80 °C
2. Rentang kelembapan: 0 - 100 % RH
3. Akurasi: ± 0,5 °C untuk suhu dan ± 2 - 5 % RH untuk kelembapan

2.2.4. Sensor Ultrasonic

Sensor ultrasonik adalah perangkat pengukuran non-kontak yang menentukan jarak atau kedalaman dengan memancarkan pulsa gelombang suara berfrekuensi di atas ambang pendengaran manusia (ultrasonik) lalu mengukur waktu tempuh pantulan *Time-of-Flight* (ToF) dari

objek kembali ke sensor, jarak dihitung dari waktu tempuh dan laju rambat suara di medium [9].

Rumus dasar perhitungannya:

$$s = \frac{(t \times v)}{2} \quad (1)$$

Keterangan:

S: Jarak

t: Waktu Pantul

v: Kecepatan suara

2.2.5. Arduino IDE

Arduino *Integrated Development Environment* (IDE) adalah perangkat lunak terpadu yang digunakan untuk menulis, mengompilasi, dan mengunggah program ke papan mikrokontroler seperti keluarga Arduino dan juga modul populer seperti ESP32. IDE ini menyediakan editor kode, kompiler berbasis *toolchain* GCC untuk AVR/ESP dan antarmuka untuk memilih papan serta *port* serial sehingga proses pemrograman dan pengujian perangkat keras menjadi lebih langsung [6].

2.2.6. Flutter

Flutter adalah *framework open-source* yang dikembangkan oleh Google untuk membuat aplikasi *cross-platform* (*mobile*, *web*, *desktop*) dari satu basis kode (*single codebase*). *Framework* ini menggunakan bahasa pemrograman Dart dan arsitektur berbasis *widget* setiap elemen antarmuka adalah widget yang dapat disusun ulang untuk membangun UI yang deklaratif dan konsisten di berbagai *platform* [10].

2.2.7. Firebase

Firebase adalah *platform Backend-as-a-Service* (BaaS) yang dimiliki Google yang menyediakan serangkaian layanan siap pakai untuk pengembangan aplikasi web dan mobile. Layanan inti Firebase meliputi autentikasi pengguna (*Authentication*), penyimpanan data *real-time* melalui *Realtime Database* dan *Cloud Firestore*, fungsi *serverless* melalui *Cloud Functions*, notifikasi melalui *Cloud Messaging*, *hosting statis*, serta fitur analitik dan manajemen akses (*security rules*). Dengan menyediakan komponen-komponen ini sebagai layanan terkelola, Firebase memungkinkan pengembang melakukan *rapid prototyping* dan mempercepat pengembangan aplikasi lintas *platform* (*android*, *iOS*, *web*) tanpa harus membangun dan mengelola infrastruktur *backend* sendiri [11].

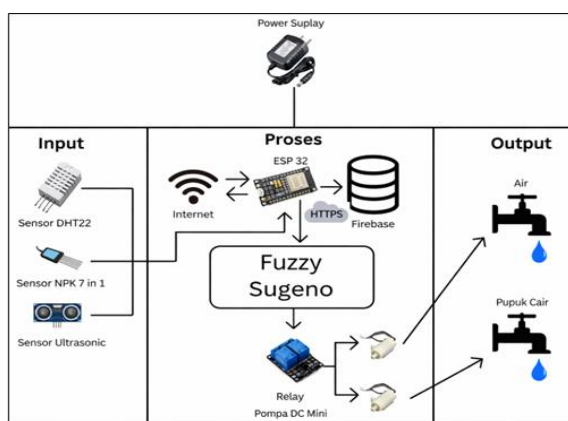
2.3. Implementation (Implementasi)

Pada tahap *Implementation*, hasil desain direalisasikan dalam bentuk prototipe sistem

yang berfungsi nyata. Hal ini melibatkan pemrograman mikrokontroler seperti ESP32 untuk membaca data dari berbagai sensor, serta implementasi metode Fuzzy Sugeno pada sistem untuk memproses data sensor menjadi keputusan atau rekomendasi. Protokol komunikasi juga diimplementasikan menggunakan HTTPS untuk memastikan keamanan transfer data dari perangkat ke server.

Selain perangkat keras, implementasi juga mencakup pengembangan sisi perangkat lunak seperti dashboard monitoring berbasis web atau aplikasi Android untuk menampilkan data secara *real-time*. Sistem ini kemudian diuji fungsional dengan *server backend* dan antarmuka pengguna yang terhubung melalui jaringan IoT. Penerapan fuzzy Sugeno dalam implementasi memungkinkan sistem untuk menghasilkan output kontinu dari input parameter lingkungan, misalnya untuk menentukan kebutuhan penyiraman atau pemupukan otomatis.

2.3.1. Skema Rangkaian Sistem



Gambar 2. Diagram Blok Sistem

Skema rangkaian sistem smart farming terdiri dari tiga bagian utama, yaitu input, proses, dan output yang terintegrasi dalam satu sistem berbasis IoT dan disuplai oleh power supply sebagai sumber tegangan. Pada bagian input, sensor DHT22, sensor NPK 7-in-1, dan sensor ultrasonik digunakan untuk membaca parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan udara dan tanah, kandungan unsur hara (N, P, K), pH, EC, serta ketinggian cairan dalam tangki, kemudian data dikirim ke ESP32 sebagai pusat pemrosesan. Pada bagian proses, ESP32 mengolah data menggunakan metode Fuzzy Sugeno dan mengirimkannya ke Firebase melalui koneksi Wi-Fi untuk monitoring *real-time* yang aman. Selanjutnya, pada bagian output, keputusan sistem dieksekusi melalui modul relay yang mengendalikan pompa air dan pupuk secara

otomatis, sehingga sistem mampu bekerja secara adaptif dan terintegrasi dalam menjaga kondisi optimal pertumbuhan tanaman.

2.3.2. Pemrograman Mikrokontroler

Pemrograman mikrokontroler adalah proses menulis dan mengembangkan instruksi perangkat lunak yang dijalankan pada sebuah mikrokontroler, yakni sebuah sistem mikrokomputer pada chip yang menggabungkan CPU, memori, dan port input/output untuk mengendalikan sensor, aktuator, dan perangkat lain dalam suatu sistem elektronik; melalui bahasa seperti C atau *assembly*, pemrograman ini memungkinkan mikrokontroler membaca data, memproses logika, dan menghasilkan respon otomatis dalam aplikasi seperti sistem IoT, otomasi industri, atau kendali robotik, sehingga menjadikannya komponen penting dalam sistem embedded modern dan pendidikan teknik elektro/komputer [12].

Pemrograman mikrokontroler ESP32 dimulai dengan inialisasi sistem yang mencakup konfigurasi pin input-output, sensor DHT22, sensor NPK 7-in-1, sensor ultrasonik, modul relay, serta koneksi Wi-Fi dan database Firebase untuk memastikan perangkat siap membaca data dan terhubung ke layanan IoT. Setelah koneksi berhasil, ESP32 membaca data suhu, kelembapan, unsur hara tanah, dan ketinggian air, lalu mengirimkannya ke Firebase sebagai media monitoring. Data tersebut dianalisis menggunakan metode Fuzzy Sugeno untuk menentukan keputusan penyiraman dan pemupukan berdasarkan aturan fuzzy, yang kemudian dieksekusi melalui relay untuk mengontrol pompa air dan pupuk. Proses ini berlangsung otomatis dan berulang selama sistem aktif sehingga mendukung *smart farming* yang kontinu, adaptif, dan terintegrasi IoT.

2.3.3. Metode Fuzzy Sugeno

Metode Fuzzy Sugeno digunakan sebagai mekanisme pengambilan keputusan dalam sistem smart farming untuk menentukan tindakan penyiraman dan pemupukan tanaman seledri. Metode ini dipilih karena mampu menghasilkan keluaran berupa nilai tegas (*crisp*) yang sesuai untuk mengendalikan aktuator secara langsung. Sistem fuzzy Sugeno memanfaatkan beberapa variabel input yang berasal dari sensor kondisi lingkungan dan kualitas tanah, yang kemudian diproses melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi aturan, dan defuzzifikasi.

Fuzzifikasi merupakan suatu proses untuk mengubah nilai masukan dari bentuk tegas (*crisp*) menjadi Fuzzy. Nilai yang bersifat tegas (*crisp*)

sebenarnya tidak benar-benar pasti sehingga variabel tersebut dapat dinyatakan dalam fungsi Fuzzy [13]. Pada tahap fuzzifikasi, setiap nilai input dipetakan ke dalam himpunan fuzzy sesuai dengan karakteristik parameter yang telah ditentukan seperti persamaan (2) dan (3) berikut.

$$\mu_{\text{Rendah}}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{\text{Tinggi}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (3)$$

Keterangan:

a: nilai domain yang mempunyai derajat keanggotaan 1.

b: nilai domain yang mempunyai derajat keanggotaan 0.

x: nilai input yang akan diubah ke dalam derajat keanggotaan fuzzy.

Selanjutnya, proses inferensi dilakukan dengan menerapkan aturan-aturan fuzzy berbentuk *IF-THEN* untuk mengevaluasi kondisi tanaman berdasarkan kombinasi variabel input. Setiap aturan menghasilkan keluaran konstan yang merepresentasikan tindakan penyiraman atau pemupukan.

Selanjutnya, proses untuk mengembalikan nilai output Fuzzy menjadi output nilai tegas disebut defuzzifikasi [13]. Tahap akhir berupa defuzzifikasi dilakukan menggunakan metode rata-rata berbobot (*weighted average*) untuk memperoleh nilai keluaran akhir sistem. Nilai tersebut digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan otomatis, apakah sistem melakukan penyiraman air, pemberian pupuk cair, atau tidak melakukan tindakan. Dengan penerapan metode Fuzzy Sugeno, sistem mampu merespons perubahan kondisi lingkungan dan tanah secara adaptif dan konsisten dalam mendukung pertumbuhan tanaman seledri.

2.3.4. Sistem Monitoring

Sistem monitoring merupakan rangkaian perangkat keras dan perangkat lunak yang dirancang untuk mengamati, mencatat, dan melaporkan kondisi atau perilaku suatu objek, proses, atau lingkungan secara *real-time* atau periodik, sehingga pengguna dapat mengetahui status, mendeteksi masalah, dan mengambil keputusan cepat berdasarkan data yang diperoleh; dalam konteks penelitian teknologi informasi, misalnya, sistem monitoring dapat

berupa aplikasi web atau berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mengumpulkan data dari sensor atau sumber lain kemudian menampilkan informasi tersebut secara terpadu untuk memudahkan pemantauan dan kontrol aktivitas tertentu. Pengembangan sistem semacam ini telah banyak dibahas dalam jurnal Indonesia seperti pada studi Implementasi Sistem Monitoring Multi Sensor pada Ruang Server Berbasis IoT yang menjelaskan penggunaan sensor dan microcontroller untuk memantau kondisi ruang server secara otomatis dan memberikan peringatan ketika terjadi kondisi abnormal [14].

Sebuah sistem monitoring tidak hanya digunakan dalam satu bidang saja, tetapi juga diterapkan dalam berbagai sektor untuk memperoleh data secara *real-time*, menyimpan hasil pengukuran, dan memberikan notifikasi atau rekomendasi bagi penggunaannya, sehingga proses pengambilan keputusan menjadi lebih cepat, efisien, dan akurat; misalnya pada penelitian tentang Sistem Monitoring Kondisi Kelembapan dan pH Tanah Berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dirancang untuk tanaman hias, sistem ini menggunakan sensor dan mikrokontroler untuk mengukur kondisi lahan secara otomatis kemudian mengirim data ke aplikasi Blynk untuk tampilan *real-time* serta notifikasi, sehingga perawatan tanaman lebih terarah dan berbasis data [15].

2.4. Testing (Pengujian)

2.4.1 Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh sensor yang digunakan dalam sistem smart farming mampu membaca parameter lingkungan dan kualitas tanah secara akurat dan konsisten. Sensor yang diuji meliputi sensor DHT22 untuk pengukuran suhu dan kelembapan udara, sensor NPK 7 in 1 untuk parameter nutrisi dan kondisi tanah, serta sensor ultrasonik untuk pengukuran ketinggian cairan pada tangki air dan pupuk. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap nilai referensi atau alat ukur standar pada kondisi yang sama.

2.4.2 Pengujian Metode Fuzzy Sugeno

Pengujian metode fuzzy Sugeno dilakukan untuk memastikan bahwa keputusan yang dihasilkan sistem telah sesuai dengan rule base yang telah dirancang. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan beberapa skenario input yang mewakili berbagai kondisi lingkungan dan kualitas tanah, seperti kombinasi suhu, kelembapan, pH, EC, serta kadar unsur hara N, P,

dan K. Nilai input tersebut kemudian diproses melalui tahap fuzzifikasi, inferensi fuzzy, dan perhitungan keluaran metode Sugeno.

Hasil keputusan sistem berupa “Siram Air”, “Siram Pupuk Cair”, atau “Tidak Ada Tindakan” selanjutnya dibandingkan dengan keputusan yang seharusnya berdasarkan aturan fuzzy yang telah ditentukan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil implementasi dari desain sistem yang telah dirancang sebelumnya, serta memaparkan hasil pengujian yang dilakukan untuk menilai kinerja sistem secara keseluruhan. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem dapat beroperasi sesuai dengan spesifikasi dan rancangan yang telah ditetapkan. Selain itu, pada bab ini juga dilakukan analisis terhadap hasil pengujian untuk mengevaluasi kesesuaian antara sistem yang dihasilkan dengan desain awal. Analisis tersebut digunakan sebagai dasar dalam menilai tingkat keberhasilan sistem *smart farming* yang dikembangkan.

3.1 Perancangan *prototype*

Perancangan *prototype* sistem *smart farming* dilakukan sebagai tahap awal untuk merealisasikan desain sistem ke dalam bentuk fisik yang dapat diuji secara langsung. *Prototype* dirancang dengan mengintegrasikan seluruh komponen utama, yaitu mikrokontroler ESP32, sensor-sensor lingkungan dan tanah, modul relay, serta catu daya ke dalam sebuah box kontrol. Penempatan komponen diatur agar mudah diakses, aman dari gangguan luar, serta mendukung koneksi antarperangkat secara stabil selama proses pengujian.



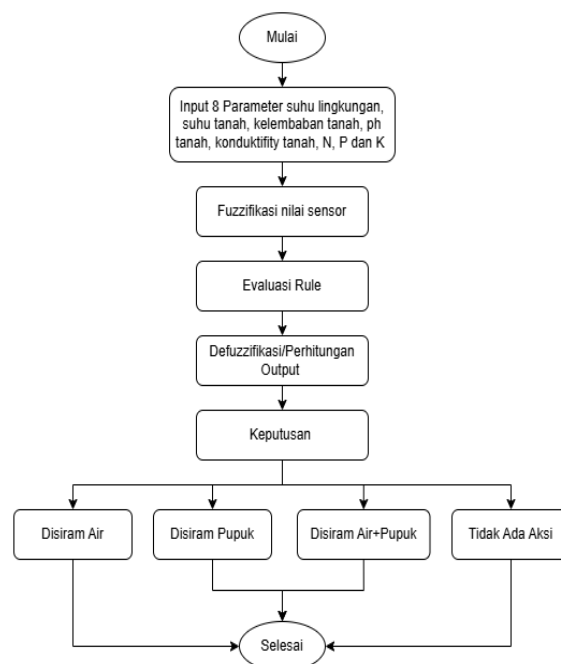
Gambar 3. Perancangan alat

Pada tahap ini, seluruh rangkaian dirakit menggunakan *breadboard* dan kabel jumper untuk memudahkan proses pengembangan dan perbaikan sistem. Sensor-sensor dihubungkan ke

mikrokontroler sesuai dengan skema rangkaian yang telah dirancang, sementara modul relay digunakan sebagai penghubung antara mikrokontroler dan aktuator berupa pompa air dan pompa pupuk cair. *Prototype* ini berfungsi sebagai media uji coba untuk memastikan sistem mampu membaca data sensor, memprosesnya menggunakan metode fuzzy Sugeno, serta mengeksekusi keputusan secara otomatis sebelum sistem diimplementasikan pada skala lapangan.

3.2 Pembuatan Program

Pembuatan program pada sistem *smart farming* ini dilakukan menggunakan Arduino IDE dengan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali. Program dirancang untuk mengintegrasikan pembacaan berbagai sensor, proses pengambilan keputusan menggunakan metode fuzzy Sugeno, komunikasi data IoT, serta pengendalian aktuator secara otomatis.



Gambar 4. Alur Pembuatan Program

Pada tahap awal, program melakukan inisialisasi perangkat keras dan perangkat lunak, meliputi konfigurasi pin, inisialisasi sensor DHT22, komunikasi RS485 untuk sensor NPK 7 in 1, sensor ultrasonik, modul relay, serta koneksi WiFi dan Firebase sebagai media penyimpanan data.

Selanjutnya, program membaca data dari sensor-sensor lingkungan dan tanah secara periodik. Data suhu dan kelembapan udara diperoleh dari sensor DHT22, sedangkan data

kelembapan tanah, suhu tanah, pH, EC, serta kandungan N, P, dan K diperoleh melalui komunikasi Modbus RS485. Selain itu, sensor ultrasonik digunakan untuk mengukur ketinggian air dan pupuk cair pada tangki. Data sensor yang diperoleh kemudian diproses untuk memastikan validitas nilai sebelum digunakan dalam sistem pengambilan keputusan.

Proses pengambilan keputusan dilakukan menggunakan metode fuzzy Sugeno yang diimplementasikan langsung pada mikrokontroler. Nilai sensor difuzzifikasi ke dalam himpunan fuzzy rendah dan tinggi, kemudian diproses menggunakan aturan fuzzy (*rule base*) yang telah ditentukan. Hasil inferensi fuzzy menghasilkan keluaran berupa keputusan penyiraman air, pemberian pupuk cair, kombinasi keduanya, atau tidak ada tindakan. Keputusan tersebut digunakan untuk mengendalikan modul relay yang mengaktifkan pompa air dan pompa pupuk cair dengan memperhatikan waktu kerja minimum agar aktuator tidak sering hidup-mati.

Selain pengendalian aktuator, program juga menangani pengiriman data ke Firebase *Realtime Database* menggunakan protokol HTTPS. Data yang dikirim meliputi nilai sensor, status pompa, hasil keputusan fuzzy, serta informasi waktu (*timestamp*). Data ini digunakan untuk keperluan monitoring melalui aplikasi mobile. Untuk meningkatkan keandalan sistem, program menerapkan mekanisme *loop timing* berbasis interval sehingga pembacaan sensor, proses fuzzy, pengiriman data, dan tampilan OLED dapat berjalan secara teratur tanpa saling mengganggu. Dengan demikian, program yang dibuat mampu mendukung sistem smart farming agar bekerja secara otomatis, *real-time*, dan terintegrasi.

3.3 Implementasi Sistem

Implementasi sistem pada penelitian ini dilakukan dengan mengintegrasikan perangkat keras dan perangkat lunak berbasis ESP32 untuk mewujudkan sistem *Smart Farming* yang mampu melakukan pemantauan kondisi lingkungan dan tanah secara real-time serta pengendalian penyiraman dan pemupukan secara otomatis menggunakan metode logika fuzzy Sugeno.

3.3.1 Implementasi Perangkat Keras

Perangkat keras sistem terdiri dari beberapa sensor dan aktuator yang saling terhubung dengan mikrokontroler ESP32. Sensor DHT22 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara, sedangkan sensor tanah berbasis RS485 (Modbus) digunakan untuk membaca parameter kelembapan tanah, suhu tanah, pH, Electrical Conductivity (EC), serta

kandungan nutrisi Nitrogen (N), Phosphorus (P), dan Potassium (K). Selain itu, dua sensor ultrasonik dipasang pada tangki air dan pupuk untuk memantau ketersediaan cairan.



Gambar 5. Prototype Sistem Smart Farming

yang mengendalikan pompa air dan pompa pupuk. Relay diaktifkan berdasarkan hasil keputusan sistem fuzzy. Untuk menampilkan informasi lokal, digunakan OLED display 128x64 yang menampilkan data sensor dan status aktuator secara bergantian.

3.3.2 Implementasi Perangkat Lunak

Perangkat lunak sistem dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman C++ pada Arduino IDE. Program utama terdiri dari beberapa modul utama, yaitu pembacaan sensor, pengolahan data menggunakan logika fuzzy, pengendalian aktuator, tampilan OLED, dan pengiriman data ke Firebase.



Gambar 6. Aplikasi Monitoring Smart Farming

Aplikasi Android terhubung langsung dengan Firebase *Realtime Database* sebagai pusat penyimpanan data. Data sensor yang dikirim oleh ESP32, seperti suhu udara, kelembaban udara, kelembaban tanah, suhu tanah, pH, EC, kandungan nutrisi NPK, ketinggian air dan pupuk, serta hasil keputusan fuzzy, disinkronkan secara otomatis ke aplikasi melalui mekanisme *real-time listener* yang disediakan oleh Firebase. Dengan mekanisme ini, setiap perubahan data pada database dapat langsung ditampilkan pada aplikasi tanpa perlu melakukan penyegaran manual.

3.4 Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen pada sistem *smart farming* berbasis IoT dapat bekerja sesuai dengan fungsi dan desain yang telah direncanakan. Pengujian difokuskan pada tiga aspek utama, yaitu keandalan pembacaan sensor, kualitas komunikasi data menggunakan protokol HTTPS, serta ketepatan metode logika fuzzy Sugeno dalam menghasilkan keputusan penyiraman dan pemupukan. Hasil pengujian ini digunakan sebagai dasar evaluasi kinerja sistem secara menyeluruh.

3.4.1 Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi dan kestabilan data dari sensor yang digunakan, meliputi DHT22 untuk suhu dan kelembaban udara, sensor tanah berbasis RS485 untuk parameter kelembaban, suhu tanah, pH, EC, serta kandungan N, P, dan K, serta sensor ultrasonik untuk mengukur ketinggian air dan pupuk.

TABEL 1. PENGUJIAN SENSOR DHT22

No	Waktu	DHT 22 (°C)	Termometer (°C)	Selisi h (°C)	Err (%)
1	09:00	27.1	27.5	0.4	1.45
2	10:00	27.8	28.0	0.2	0.71
3	11:00	28.4	28.6	0.2	0.70
4	12:00	29.0	29.3	0.3	1.02
5	13:00	29.5	29.8	0.3	1.01

TABEL 2. PENGUJIAN SENSOR ULTRASONIC

No	Waktu	Ultrasonic (cm)	Mistar (cm)	Selisi h (cm)	Err (%)
1	09:00	3.2	3.0	0.2	6.67
2	10:00	6.1	6.0	0.1	1.67

3	11:00	9.3	9.0	0.3	3.33
4	12:00	13.2	13.0	0.2	1.54
5	13:00	17.5	17.0	0.5	2.94

TABEL 3. PENGUJIAN SENSOR NPK 7 IN 1 UNTUK SUHU TANAH

No	Waktu	Suhu (°C)	Termometer Tanah (°C)	Selisi h (°C)	Err (%)
1	09:00	26.4	26.8	0.4	1.49
2	10:00	26.9	27.2	0.3	1.10
3	11:00	27.3	27.5	0.2	0.73
4	12:00	27.8	28.0	0.2	0.71
5	13:00	28.2	28.5	0.3	1.05

TABEL 4. PENGUJIAN SENSOR NPK 7 IN 1 UNTUK KELEMBABAN TANAH

No	Waktu	Kelembaban (%)	Soil Meter (%)	Selisi h (%)	Err (%)
1	09:00	42	45	3	6.67
2	10:00	48	50	2	4.00
3	11:00	53	55	2	3.64
4	12:00	58	60	2	3.33
5	13:00	62	65	3	4.62

TABEL 5. PENGUJIAN SENSOR NPK 7 IN 1 UNTUK pH TANAH

No	Waktu	pH	pH Meter	Selisi h	Err (%)
1	09:00	6.1	6.3	0.2	3.17
2	10:00	6.3	6.5	0.2	3.08
3	11:00	6.5	6.6	0.1	1.52
4	12:00	6.6	6.8	0.2	2.94
5	13:00	6.8	7.0	0.2	2.86

TABEL 6. PENGUJIAN SENSOR NPK 7 IN 1 UNTUK EC TANAH

No	Waktu	EC (dS/m)	EC Meter (dS/m)	Selisi h	Err (%)
1	09:00	1.9	2.0	0.1	5.00
2	10:00	2.4	2.5	0.1	4.00
3	11:00	2.9	3.0	0.1	3.33
4	12:00	3.4	3.5	0.1	2.86
5	13:00	3.9	4.0	0.1	2.50

TABEL 7. PENGUJIAN SENSOR NPK 7 IN 1 UNTUK N TANAH

N o	Waktu	N (mg/kg)	Uji N (mg/kg)	Selisi h	Err (%)
1	09:00	135	140	5	3.57
2	10:00	148	150	2	1.33
3	11:00	158	160	2	1.25
4	12:00	168	170	2	1.18
5	13:00	178	180	2	1.11

TABEL 8. PENGUJIAN SENSOR NPK 7 IN 1 UNTUK P TANAH

N o	Waktu	P (mg/kg)	Uji P (mg/kg)	Selisi h	Err (%)
1	09:00	22	23	1	4.35
2	10:00	27	28	1	3.57
3	11:00	32	33	1	3.03
4	12:00	36	38	2	5.26
5	13:00	41	42	1	2.38

TABEL 9. PENGUJIAN SENSOR NPK 7 IN 1 UNTUK K TANAH

N o	Waktu	K (mg/kg)	Uji K (mg/kg)	Selisi h	Err (%)
1	09:00	155	160	5	3.13
2	10:00	168	170	2	1.18
3	11:00	178	180	2	1.11
4	12:00	188	190	2	1.05
5	13:00	198	200	2	1.00

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor DHT22 memiliki tingkat error rendah antara 0,70% hingga 1,45% yang menandakan akurasi dan kestabilan yang baik, sedangkan sensor ultrasonik memiliki error antara 1,54% hingga 6,67% dengan nilai lebih tinggi pada jarak dekat akibat keterbatasan pantulan gelombang,

namun masih dalam batas toleransi yang dapat diterima. Sensor NPK 7-in-1 menunjukkan tingkat error berkisar antara 1% hingga 6%, dengan suhu tanah di bawah 1,5% dan parameter lain seperti kelembaban, pH, EC, serta unsur hara N, P, dan K masih dalam rentang akurasi yang layak dibandingkan alat referensi dan uji laboratorium. Variasi error dipengaruhi oleh kondisi tanah yang heterogen dan sensitivitas sensor terhadap lingkungan. Secara keseluruhan, seluruh sensor memiliki tingkat akurasi di atas 90% sehingga dinilai cukup andal untuk mendukung sistem smart farming berbasis IoT, meskipun tetap diperlukan kalibrasi berkala untuk meningkatkan presisi pada kondisi lingkungan yang lebih beragam.

3.4.2 Pengujian Metode Fuzzy Sugeno

Pengujian metode fuzzy Sugeno dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian keputusan sistem dengan aturan (*rule base*) yang telah dirancang melalui berbagai kombinasi nilai input sensor yang merepresentasikan kondisi tanah dan lingkungan. Berdasarkan data sensor, dilakukan proses fuzzifikasi terhadap variabel suhu lingkungan, suhu tanah, kelembaban tanah, pH, EC, serta kandungan N, P, dan K, yang menunjukkan sebagian besar parameter berada pada kategori tidak optimal, seperti kelembaban tanah, pH, EC, serta unsur N dan K yang rendah. Proses inferensi menggunakan operator minimum menghasilkan nilai derajat pemenuhan (α) sebesar 0,30, dengan keluaran rule aktif berupa konstanta $z = 2$ yang merepresentasikan tindakan penyiraman dan pemberian pupuk cair. Hasil defuzzifikasi dengan metode *weighted average* menghasilkan nilai output $y = 2$, yang menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan keputusan yang konsisten dan sesuai dengan aturan yang telah ditentukan. Secara analitis, metode fuzzy Sugeno memiliki keunggulan dalam menghasilkan output numerik yang stabil dan kontinu sehingga lebih sesuai untuk sistem kendali otomatis berbasis real-time dibandingkan metode Mamdani yang cenderung menghasilkan output linguistik. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa penerapan fuzzy Sugeno pada sistem irigasi berbasis IoT mampu meningkatkan efisiensi dan stabilitas pengambilan keputusan. Namun demikian, sistem ini masih memiliki keterbatasan, yaitu aturan fuzzy yang digunakan bersifat statis dan belum mampu beradaptasi secara otomatis terhadap perubahan pola lingkungan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan dengan mengintegrasikan metode pembelajaran

adaptif atau kecerdasan buatan untuk meningkatkan optimalitas dan fleksibilitas sistem dalam kondisi yang lebih kompleks.



Gambar 7. Pembacaan Sensor

Berdasarkan data sensor yang diperoleh, dilakukan proses fuzzifikasi terhadap seluruh variabel input, yaitu suhu lingkungan, suhu tanah, kelembaban tanah, pH, EC, serta kandungan N, P, dan K. Hasil fuzzifikasi menunjukkan bahwa kondisi suhu lingkungan dan suhu tanah cenderung berada pada kategori tinggi, kelembaban tanah berada pada kategori rendah, pH dan EC berada pada kategori rendah, serta unsur hara Nitrogen dan Kalium tergolong rendah, sedangkan Fosfor berada pada kategori tinggi.

Selanjutnya, derajat pemenuhan (α) dihitung menggunakan operator minimum sesuai metode fuzzy Sugeno. Berdasarkan aturan fuzzy yang diuji, nilai α diperoleh sebesar 0,30, yang merupakan nilai minimum dari seluruh derajat keanggotaan pada rule tersebut. Rule yang aktif menghasilkan keluaran Sugeno dengan nilai konstanta $z = 2$, yang merepresentasikan tindakan penyiraman air dan pemberian pupuk cair.

Proses defuzzifikasi dilakukan menggunakan metode *weighted average*, sehingga diperoleh nilai keluaran sistem sebesar $y = 2$. Hasil ini menunjukkan bahwa keputusan yang dihasilkan sistem sesuai dengan aturan fuzzy yang telah dirancang, yaitu sistem secara otomatis melakukan air dan pupuk pada kondisi lingkungan dan tanah tersebut.

3.5 Evaluasi Sistem

Setelah 8 minggu pengamatan yang dilakukan setiap 2 minggu sekali, di peroleh hasil pengamatan sebagai berikut.



Gambar 8 Hasil Seledri Menggunakan Alat Selama 8 Minggu

TABEL 10 RATA-RATA PERTUMBUHAN SELEDRI SELAMA 8 MINGGU

Sampel Tanah	Rata-rata Tinggi (cm)	Rata-rata Jumlah Daun	Kondisi Warna Daun
Pesisir (Smart Farming)	14.6	9.8	Dominan hijau segar
Pesisir (Manual)	10.4	6.5	Cenderung pucat-kekuningan
Non-Pesisir	16.1	11	Hijau tua dan segar

Berdasarkan hasil pengamatan, tanaman seledri pada tanah pesisir dengan sistem smart farming menunjukkan pertumbuhan yang lebih baik dibandingkan metode manual, ditinjau dari rata-rata tinggi tanaman, jumlah daun, serta kondisi warna daun yang lebih hijau segar. Peningkatan ini disebabkan oleh kemampuan sistem dalam menjaga kestabilan kelembaban tanah dan memberikan suplai nutrisi secara tepat waktu melalui irigasi dan pemupukan otomatis berbasis fuzzy Sugeno. Kontrol yang bersifat real-time memungkinkan sistem merespons perubahan kondisi lingkungan secara cepat, sehingga tanaman memperoleh kondisi tumbuh yang lebih optimal.

Sebaliknya, pada metode manual, pertumbuhan tanaman cenderung lebih lambat dengan jumlah daun yang lebih sedikit serta warna daun yang pucat. Hal ini mengindikasikan bahwa pengelolaan air dan nutrisi yang tidak konsisten menyebabkan kondisi tanah menjadi kurang stabil, sehingga tidak mampu memenuhi kebutuhan fisiologis tanaman secara optimal. Temuan ini sejalan dengan konsep pertanian presisi (*precision agriculture*), yang menekankan pentingnya pengelolaan berbasis data untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dan pupuk.

Meskipun tanaman pada tanah non-pesisir masih menunjukkan hasil terbaik, sistem smart farming yang diterapkan pada tanah pesisir mampu mendekati performa tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi IoT dan fuzzy Sugeno tidak hanya meningkatkan pertumbuhan tanaman, tetapi juga mampu mengurangi kesenjangan produktivitas antara lahan pesisir dan non-pesisir. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah dalam bentuk solusi terintegrasi yang mampu mengoptimalkan pemanfaatan lahan marginal seperti tanah pesisir melalui pendekatan berbasis data dan otomatisasi.

Hasil ini juga sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa integrasi IoT dan metode fuzzy dapat meningkatkan efisiensi irigasi dan pengelolaan nutrisi tanaman. Namun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, antara lain skala pengujian yang terbatas dan belum mempertimbangkan faktor eksternal seperti curah hujan dan intensitas cahaya. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan adaptivitas sistem serta menguji implementasi pada skala lahan yang lebih luas.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem smart farming berbasis Internet of Things (IoT) dengan metode Fuzzy Sugeno untuk pemantauan kualitas tanah pesisir pada budidaya seledri, yang mampu memantau delapan parameter tanah dan lingkungan secara real-time. Sistem yang dikembangkan terbukti mampu menghasilkan keputusan otomatis yang konsisten dan adaptif dalam pengelolaan irigasi dan pemupukan, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi serta menjaga kestabilan kondisi tanah. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa penerapan sistem ini mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman seledri pada lahan pesisir secara signifikan dibandingkan metode manual, bahkan mendekati performa lahan non-pesisir. Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi berupa integrasi pemantauan multi-parameter, metode pengambilan keputusan berbasis fuzzy Sugeno, serta komunikasi data yang aman dalam satu sistem terintegrasi untuk lingkungan lahan marginal. Secara praktis, sistem ini dapat menjadi solusi alternatif bagi petani dalam mengoptimalkan pemanfaatan lahan pesisir melalui pendekatan pertanian presisi berbasis data, sehingga berpotensi meningkatkan produktivitas dan efisiensi biaya produksi.

Berdasarkan hasil penelitian, pengembangan selanjutnya disarankan untuk meningkatkan akurasi sistem melalui kalibrasi sensor secara berkala dan penggunaan sensor dengan presisi lebih tinggi, terutama pada parameter kelembaban tanah dan nutrisi yang menunjukkan variasi error lebih besar. Selain itu, pengembangan metode pengambilan keputusan dapat diarahkan pada pendekatan yang lebih adaptif, seperti integrasi machine learning, untuk mengatasi keterbatasan rule fuzzy yang masih statis. Pengujian sistem juga perlu diperluas pada skala lahan yang lebih besar dan dalam durasi yang lebih panjang, serta mempertimbangkan variabel lingkungan tambahan seperti curah hujan, intensitas cahaya, dan salinitas tanah yang berpengaruh pada lahan pesisir. Integrasi dengan teknologi lain seperti sistem prediksi cuaca atau pemantauan berbasis citra juga dapat meningkatkan akurasi dan cakupan sistem, sehingga mampu mendukung implementasi smart farming yang lebih komprehensif dan berkelanjutan.

Daftar Pustaka:

- [1] V. Kumar, K. V. Sharma, N. Kedam, A. Patel, T. R. Kate, and U. Rathnayake, "A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies," *Smart Agricultural Technology*, vol. 8, Aug. 2024.
- [2] sutinah, B. Syah, D. Sugiono, and P. Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Singaperbangsa Karawang, "Pengaruh Jenis Media Tanam Dan Jenis Nutrisi Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Seledri (*Apium graveolens* L.) Varietas Amigo Pada Hidroponik Sistem Wick," 2023.
- [3] M. Firman Hidayat *et al.*, "Monitoring Dan Kontrol Ruang Obat Dengan Sistem IoT Dan Fuzzy," *Jurnal Informatika & Rekayasa Elektronika*, vol. 7, no. 2, p. 312, 2024.
- [4] M. Benzaouia, B. Hajji, A. Mellit, and A. Rabhi, "Fuzzy-IoT smart irrigation system for precision scheduling and monitoring," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 215, Dec. 2023.
- [5] B. Rahman, T. Mantoro, S. Andryana, and S. B. Wicaksono, "Optimizing Plant Watering Efficiency via IoT: Fuzzy Sugeno Method with ESP8266 Microcontroller," *TEM Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 1849–1857, Aug. 2024.
- [6] D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič, and O. Težak, "Design and Implementation of

- ESP32-Based IoT Devices,” *Sensors*, vol. 23, no. 15, pp. 1–20, Aug. 2023.
- [7] I. Bisnis, M. Bekasi, A. Pratama, I. Ari, and E. Zaeni, “Perancangan Sensor NPK, PH, Suhu, dan Kelembapan Tanah Berbasis IoT Dan Arduino Untuk Pertanian Modern,” *JUPITER Teknologi Informatika & Komputer*, vol. 6, no. 1, 2025.
- [8] W. Adhiwibowo, A. Firman Daru, and A. M. Hirzan, “Temperature and Humidity Monitoring Using DHT22 Sensor and Cayenne API,” *TRANSFORMTIKA*, vol. 17, no. 2, pp. 209–214, 2020.
- [9] Z. Qiu, Y. Lu, and Z. Qiu, “Review of Ultrasonic Ranging Methods and Their Current Challenges,” *Micromachines (Basel)*, vol. 13, no. 4, pp. 1–33, Apr. 2022.
- [10] A. Santhosh *et al.*, “Cross-Platform Innovation: The Rise and Impact of Flutter in Modern App Development,” *International Research Journal on Advanced Engineering and Management*, vol. 2, no. 1, 2024.
- [11] R. G. Guntara, “Firebase Realtime Database Untuk Aplikasi Point of Sales UMKM Berbasis Cloud Computing Pada Smartphone Android,” *Jurnal Teknologi dan Informasi*, vol. 1, no. 2, pp. 50–58, 2022.
- [12] R. Syahmuda Siregar, Rahma, Riki, Afni, and Dicky, “Studi Komparatif Mikrokontroler Avr, Pic, dan Arm Dalam Aplikasi IoT Berdasarkan Literatur 2019–2024,” *Jurnal Komputer dan Teknologi (JUKOMTEK)*, vol. 4, no. 2, pp. 168–175, 2025.
- [13] A. N. Rafi’ah *et al.*, “Implementasi Sistem Kendali Fuzzy pada Arah Gerak Robot Finoid,” *Jurnal Informatika & Rekayasa Elektronika*, vol. 3, no. 2, pp. 150–161, 2020.
- [14] D. Adit Dwi Prasetyo and D. Kusumaningsih, “Implementasi Sistem Monitoring Multi Sensor pada Ruang Server Berbasis Iot Menggunakan Wemos D1 R2,” *Informatik: Jurnal Ilmu Komputer*, vol. 19, no. 1, pp. 90–98, 2023.
- [15] B. A. Cahyono and Y. Akbar, “Sistem Monitoring Kondisi Kelembapan dan pH Tanah Berbasis Internet of Things (IoT) untuk Tanaman Hias,” *Jurnal Indonesia: Manajemen Informatika dan Komunikasi (JIMIK)*, vol. 6, no. 3, pp. 1756–1763, 2025.