

**SISTEM KENDALI SUHU DAN KELEMBAPAN DINAMIS PADA
GREENHOUSE MENGGUNAKAN *FUZZY MAMDANI* BERDASARKAN
PROFIL TANAMAN**

SKRIPSI

**Oleh:
M. SINGGI ADITYA RAMADHAN
NIM. 220605110068**



**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

**SISTEM KENDALI SUHU DAN KELEMBAPAN DINAMIS PADA
GREENHOUSE MENGGUNAKAN *FUZZY MAMDANI*
BERDASARKAN PROFIL TANAMAN**

SKRIPSI

Diajukan Kepada:
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Komputer (S.Kom)

Oleh :
M. SINGGI ADITYA RAMADHAN
NIM. 220605110068

**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

HALAMAN PERSETUJUAN

**SISTEM KENDALI SUHU DAN KELEMBAPAN DINAMIS PADA
GREENHOUSE MENGGUNAKAN FUZZY MAMDANI
BERDASARKAN PROFIL TANAMAN**

SKRIPSI

Oleh:

M. SINGGLADITYA RAMADHAN
NIM. 220605110068

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji:
Tanggal: 10 Juni 2026

Pembimbing I,

Shoffin Nahwa Utama, M.T
NIP. 19860703 202012 1 003

Pembimbing II,

Ahmad Fahmi Karami, M.Kom
NIP. 19870909 202012 1 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Informatika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang



Supriyono, M.Kom
NIP. 19841010 201903 1 012

HALAMAN PENGESAHAN

SISTEM KENDALI SUHU DAN KELEMBAPAN DINAMIS PADA GREENHOUSE MENGGUNAKAN FUZZY MAMDANI BERDASARKAN PROFIL TANAMAN

SKRIPSI

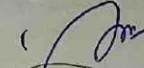
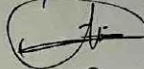
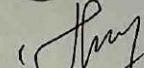
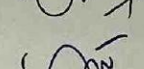
Oleh:

M. SINGGI ADITYA RAMADHAN

NIM. 220605110068

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi
dan Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Komputer (S.Kom)
Tanggal: 23 Juni 2026

Susunan Dewan Penguji

Ketua Penguji	: <u>Johan Ericka Wahyu Prakasa, M.Kom</u> NIP. 19831213 201903 1 004	()
Anggota Penguji I	: <u>Ajib Hanani, M.T</u> NIP. 19840731 202321 1 013	()
Anggota Penguji II	: <u>Shoffin Nahwa Utama, M.T</u> NIP. 19860703 202012 1 003	()
Anggota Penguji III	: <u>Ahmad Fahmi Karami, M.Kom</u> NIP. 19870909 202012 1 001	()

Mengetahui dan Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Informatika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang


Supriyomo, M.Kom
NIP. 19841010 201903 1 012

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : M. Singgi Aditya Ramdhan
NIM : 220605110068
Fakultas / Program Studi : Sains dan Teknologi / Teknik Informatika
Judul Skripsi : Sistem Kendali Suhu dan Kelembapan Dinamis
Pada *Greenhouse* Menggunakan *Fuzzy Mamdani*
Berdasarkan Profil Tanaman

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa Skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan data, tulisan, atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada daftar pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan skripsi ini merupakan hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 22 Juni 2026

Yang membuat pernyataan,



M. Singgi Aditya Ramadhan
NIM. 2206051100638

MOTTO

“All Things Come To Be Loved and Lost”

-Neckdeep-

HALAMAN PERSEMBAHAN

Puji syukur ke hadirat Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* atas segala rahmat, kemudahan, dan hidayah-Nya, Skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Untuk itu, penulis mempersembahkan skripsi ini sebagai:

1. Tanda bakti dan rasa terima kasih yang sedalam-dalamnya penulis persembahkan kepada Ibunda tercinta Susi Sulistyowati, yang senantiasa menjadi sumber kekuatan, doa, kasih sayang, dan dukungan dalam setiap langkah penulis. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada almarhum Ayahanda Suharsono, yang semasa hidupnya telah memberikan kasih sayang, nasihat, teladan, serta motivasi yang menjadi bekal berharga bagi penulis hingga dapat menyelesaikan karya ini. Semoga segala doa, kasih sayang, dan pengorbanan keduanya menjadi keberkahan bagi penulis.
2. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada Shoffin Nahwa Utama, M.T dan Ahmad Fahmi Karami, M.Kom, selaku dosen pembimbing yang dengan penuh dedikasi, kesabaran, dan keikhlasan telah membimbing, mengarahkan, serta memberikan masukan yang sangat berarti dalam proses penyusunan karya ini.
3. Tanda rasa syukur memiliki teman seperjuangan, terkhusus rekan-rekan yang selalu bersama setiap langkah semester semasa perkuliahan penulis, yang selalu hadir dengan semangat canda dan tawa di saat paling dibutuhkan. Terimakasih telah menjadi alasan untuk terus melangkah, semoga setiap doa baik yang kalian titipkan kembali kepada kalian berlipat ganda.

4. Tanda terima kasih kepada seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu, yang telah memberikan doa, dukungan, bantuan, dan semangat dalam bentuk apapun selama proses penyelesaian skripsi ini. Semoga Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* membalas segala kebaikan kalian dengan balasan yang jauh lebih indah

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Alhamdulillah rabbilalamin, Segala puji dan rasa syukur senantiasa penulis panjatkan atas ke hadirat Allah *Subhanahu wa Ta'ala* atas segala nikmat dan kasih sayang-Nya yang telah memudahkan penulis untuk menyelesaikan skripsi berjudul "Sistem Kendali Suhu dan Kelembapan Dinamis Pada *Greenhouse* Menggunakan *Fuzzy Mamdani* Berdasarkan Profil Tanaman" dengan baik. Shalawat serta salam penulis haturkan kepada junjungan kita Nabi besar Muhammad SAW, yang telah membawa kita dari jalan jahiliyah menuju jalan yang terang yaitu *Ahdinul islam wal iman*. Dan semoga kita semua mendapat syafaat-nya di hari akhir kelak, Amin.

Penulis mengucapkan rasa syukur dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang selalu memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini. Ucapan terima kasih ini penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nur Diana, M.Si, selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. H. Agus Mulyono, M.Si, selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Supriyono, M.Kom, selaku Ketua Program Studi Teknik Informatika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Shoffin Nahwa Utama, M.T, selaku dosen pembimbing I dan Ahmad Fahmi Karami, M.Kom, selaku dosen pembimbing II, yang selalu memberikan bimbingan, saran, dan dukungan yang sangat berarti bagi penulis selama proses penelitian

5. Johan Ericka Wahyu Prakasa, M.Kom, selaku dosen Penguji I dan Ajib Hanani, M.T, selaku dosen Penguji II yang telah memberikan kritik dan saran dalam proses penyelesaian penelitian ini.
6. Seluruh dosen dan staf Fakultas Sains dan Teknologi, terkhusus Program Studi Teknik Informatika yang telah memberikan ilmu, dukungan, dan bantuan administratif selama masa studi penulis.
7. Almarhum Ayahanda Suharsono, dan Ibunda Susi Sulistyowati yang memiliki peran besar dan motivator dalam perjalanan penulis selama menempuh hidup dan pendidikan perkuliahan.
8. Achmad Fairuz, Muhammad Hafidul Qolbi, Ahmad Ghiffari Fadhil Saputra, Yasril Adim Al-Amin, dan Husnul Khatimah yang senantiasa menjadi rekan berdiskusi dan bertukar pemikiran baik dalam bidang akademik maupun kehidupan sehari-hari selama masa perkuliahan hingga proses penyelesaian skripsi ini.
9. Teman-teman yang selalu hadir dan menemani penulis selama masa perkuliahan, yaitu Salman, Hilmi, Tiara, Agam, Epen, Zaka, Lefa, serta teman-teman lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu.
10. Teman-teman "Project Smart Greenhouse Melon", yang senantiasa membantu bertukar wawasan terkhusus dalam bidang penelitian penulis.
11. Serta seluruh pihak yang terlibat baik secara langsung maupun secara tidak langsung dari awal perkuliahan hingga penulisan skripsi ini

Akhir Kata, penulis menyadari bahwa penulisan pada skripsi ini masih banyak kekurangan. Penulis berharap semoga penulisan skripsi ini dapat menjadi bagian dari kontribusi dalam rangka memperkuat dan mengembangkan ilmu pengetahuan lebih lanjut.

Wassalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Malang, 16 April 2026

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xv
ABSTRAK	xvi
ABSTRACT.....	xvii
مستخلص البحث	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	5
1.3 Batasan Penelitian.....	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II STUDI PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Terkait	7
2.2 Konsep Profil Tanaman.....	11
2.2.1 Parameter Iklim Mikro Tanaman	12
2.3 <i>Internet of Things</i> pada <i>Greenhouse</i>	13
2.4 Logika <i>Fuzzy Mamdani</i>	14
2.4.1 Fungsi Keanggotaan <i>Fuzzy</i>	15
2.4.2 Sistem Inferensi <i>Fuzzy Mamdani</i>	16
BAB III DESAIN DAN IMPLEMENTASI.....	18
3.1 Prosedur Penelitian	18
3.2 Desain Sistem.....	20
3.2.1 Gambaran Umum Sistem.....	21
3.2.2 Arsitektur Sistem.....	21
3.2.3 Desain <i>Greenhouse</i>	24
3.2.4 Strategi Akuisisi Data, Penempatan, dan Agregasi Sensor	27
3.2.5 Desain <i>Web Application</i>	28
3.3 Perancangan <i>Fuzzy Mamdani</i>	29
3.3.1 Variabel <i>Input</i> dan <i>Output</i>	30
3.3.2 Himpunan <i>Fuzzy</i> dan Fungsi Keanggotaan.....	32
3.3.3 Basis Aturan <i>Fuzzy</i>	36
3.3.4 Defuzzifikasi	38
3.3.5 Mekanisme Eksekusi <i>Fuzzy</i> Periodik.....	39
3.4 Mekanisme Sistem Kendali	40
3.5 Skenario Pengujian Sistem.....	43
3.5.1 Pengujian Kalibrasi Sensor	43
3.5.2 Pengujian <i>Black Box</i>	44
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	46
4.1 Implementasi Sistem.....	46

4.1.1 Implementasi Perangkat Keras.....	46
4.1.2 Implementasi Sistem dan <i>Web Application</i>	49
4.1.3 Implementasi Sistem <i>Fuzzy</i>	54
4.2 Hasil <i>Testing</i> Setiap Skenario.....	60
4.2.1 Pengujian Kalibrasi Sensor	61
4.2.2 Pengujian Black Box.....	63
4.3 Hasil Analisis	70
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	75
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	75
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Prosedur Penelitian.....	18
Gambar 3. 2 Arsitektur Sistem.....	22
Gambar 3. 3 Desain greenhouse tampak depan	25
Gambar 3. 4 Posisi Kipas Exhaust dan Sensor SHT35 Atas.....	26
Gambar 3. 5 Posisi Kipas Intake dan Sensor SHT35 Bawah.....	26
Gambar 3. 6 Rancangan Dashboard Monitoring pada Web Application	28
Gambar 3. 7 Rancangan Pengaturan Profil Tanaman pada Web Application	29
Gambar 3. 8 Fungsi Keanggotaan Error Suhu Internal.....	33
Gambar 3. 9 Fungsi Keanggotaan Error Kelembapan Internal.....	34
Gambar 3. 10 Fungsi Keanggotaan Error Suhu Eksternal	35
Gambar 3. 11 Fungsi Keanggotaan Error Kelembapan Eksternal.....	35
Gambar 3. 12 Fungsi Keanggotaan Intensitas Heater, Intensitas Humidifier, Intensitas Kipas Exhaust, Intensitas Kipas Intake.....	36
Gambar 3. 13 Diagram Blok Mekanisme Pengendalian Suhu dan Kelembapan.....	41
Gambar 4. 1 Implementasi Sensor SHT35 Bawah dan Atas.....	47
Gambar 4. 2 Implementasi Aktuator Heater	48
Gambar 4. 3 Implementasi Aktuator Intake Fan dan Humidifier.....	49
Gambar 4. 4 Implementasi Aktuator Exhaust Fan	49
Gambar 4. 5 Halaman Dashboard Monitoring	51
Gambar 4. 6 Halaman Pengaturan Profil Tanaman.....	52
Gambar 4. 7 Halaman Kontrol Manual Aktuator.....	52
Gambar 4. 8 Halaman Riwayat Monitoring.....	53
Gambar 4. 9 Halaman CCTV.....	54

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian Terkait.....	10
Tabel 2. 2 Profil Tanaman	13
Tabel 3. 1 Komponen Lapisan Akuisisi Data.....	22
Tabel 3. 2 Komponen Lapisan Pemrosesan	23
Tabel 3. 3 Komponen Lapisan Aktuasi	24
Tabel 3. 4 Variabel Input	31
Tabel 3. 5 Variabel Output	32
Tabel 3. 6 Himpunan Fuzzy Suhu Internal.....	32
Tabel 3. 7 Himpunan Fuzzy Kelembapan Internal.....	33
Tabel 3. 8 Himpunan Fuzzy Heater, Humidifier, Exhaust Fan, Intake Fan	36
Tabel 3. 9 Tabel Payload Data.....	40
Tabel 3. 10 Tabel Parameter Pengujian Black Box	45
Tabel 4. 1 Skenario Pengujian Basis Aturan Fuzzy	56
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Basis Aturan Fuzzy Tanaman Bawang Daun	56
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Basis Aturan Fuzzy Tanaman Bayam	58
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Basis Aturan Fuzzy Tanaman Melon	59
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Kalibrasi Sensor Suhu SHT35 Bawah	62
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Kalibrasi Sensor Suhu SHT35 Atas	62
Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Sensor Kelembapan SHT35 Bawah.....	62
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Sensor Kelembapan SHT35 Bawah.....	62
Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Black Box Profil Tanaman Bayam Dengan Skenario Suhu Panas	63
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Black Box Profil Tanaman Bayam Dengan Skenario Nyaman	64
Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Black Box Profil Tanaman Melon dengan Skenario Suhu Panas	65
Tabel 4. 12 Hasil Pengujian Black Box Profil Tanaman Melon Dengan Kondisi Nyaman	66
Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Profil Bawang Daun Dengan Skenario Suhu Panas	67
Tabel 4. 14 Hasil Pengujian Profil Bawang Daun Dengan Skenario Suhu Nyaman	68

ABSTRAK

Ramadhan, M. Singgi Aditya. 2026. **Sistem Kendali Suhu dan Kelembapan Dinamis pada Greenhouse Menggunakan Fuzzy Mamdani Berdasarkan Profil Tanaman**. Skripsi. Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Pembimbing: (I) Shoffin Nahwa Utama, M.T.; (II) Ahmad Fahmi Karami, M.Kom.

Kata Kunci: Fuzzy Mamdani, Greenhouse, Internet of Things, profil tanaman, suhu dan kelembapan.

Kondisi suhu dan kelembapan udara merupakan faktor penting yang memengaruhi pertumbuhan tanaman di dalam greenhouse. Perbedaan kebutuhan lingkungan pada setiap jenis tanaman menyebabkan sistem kendali berbasis setpoint statis kurang fleksibel untuk diterapkan pada berbagai komoditas. Penelitian ini bertujuan merancang sistem kendali suhu dan kelembapan greenhouse menggunakan metode Fuzzy Mamdani yang mampu beradaptasi terhadap berbagai profil tanaman. Sistem dikembangkan berbasis Internet of Things (IoT) dengan memanfaatkan dua sensor SHT35 sebagai sumber data suhu dan kelembapan internal yang diintegrasikan menggunakan nilai rata-rata, serta data kondisi lingkungan luar dari Open-Meteo. Variabel masukan fuzzy terdiri atas error suhu dan kelembapan internal maupun eksternal yang dinormalisasi pada rentang $[-2,2]$, sedangkan keluaran berupa intensitas aktuator heater, exhaust fan, intake fan, dan humidifier pada rentang 0–100. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan keputusan kendali yang berbeda sesuai karakteristik profil tanaman bayam, bawang daun, dan melon tanpa mengubah struktur dasar algoritma fuzzy. Pengujian kalibrasi sensor menunjukkan tingkat akurasi yang baik dengan penyimpangan pengukuran yang rendah, sedangkan pengujian fungsional menunjukkan seluruh fitur sistem berjalan sesuai kebutuhan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penerapan Fuzzy Mamdani berbasis profil tanaman mampu meningkatkan fleksibilitas sistem kendali greenhouse serta mendukung pengelolaan iklim mikro yang lebih adaptif.

ABSTRACT

Ramadhan, M. Singgi Aditya. 2026. **Dynamic Temperature and Humidity Control System in a Greenhouse Using Mamdani Fuzzy Based on Plant Profiles.** Thesis. Department of Informatics Engineering, Faculty of Science and Technology, State Islamic University of Maulana Malik Ibrahim Malang.

Advisor: (I) Shoffin Nahwa Utama, M.T (II) Ahmad Fahmi Karami, M.Kom.

Keywords: Mamdani Fuzzy, greenhouse, Internet of Things, plant profile, temperature, humidity.

Temperature and air humidity are important factors that affect plant growth in a greenhouse. The differences in environmental requirements for each type of plant make static setpoint-based control systems less flexible for application to various commodities. This study aims to design a greenhouse temperature and humidity control system using the Mamdani Fuzzy method that is able to adapt to various plant profiles. The system was developed based on the Internet of Things (IoT) by utilizing two SHT35 sensors as sources of internal temperature and humidity data, which were aggregated using average values, as well as external environmental condition data from Open-Meteo. The fuzzy input variables consist of internal and external temperature and humidity errors normalized within the range of $[-2,2]$, while the outputs are the intensity of the heater, exhaust fan, intake fan, and humidifier actuators within the range of 0–100. The test results show that the system is able to produce different control decisions according to the characteristics of each plant profile without changing the basic structure of the fuzzy algorithm. Sensor calibration testing showed that the deviation of sensor readings was relatively low, with the highest standard error value of only 1.45. Functional testing also showed that all system features operated according to the requirements, with a mismatch error value between the output generated by the fuzzy system and the actual actuator condition of 0 in each test. In black-box testing, the system successfully reached stable conditions in all plant profiles with different numbers of stabilization cycles. The fastest stable condition was achieved in the melon plant profile with 4 control cycles, while the longest stable condition occurred in the green onion plant profile with 10 control cycles. This study concludes that the implementation of the plant profile-based Mamdani Fuzzy method can improve the flexibility of the greenhouse control system and support more adaptive microclimate management.

مستخلص البحث

رمضان، م. سينغي أديتيا، 2026. نظام التحكم الدينامي على الحرارة والرطوبة في الدفيئة باستخدام طريقة الاستدلال الضبابي لممداني القائمة على ملف تعريف النبات. البحث الجامعي. قسم الهندسة المعلوماتية، كلية العلوم والتكنولوجيا بجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف

الأول: صفين نحو أوتاما، الماجستير؛ المشرف الثاني: أحمد فهمي كرمي، الماجستير.

الكلمات الرئيسية: ضبابي ممداني، دفيئة، إنترنت الأشياء، ملف تعريف نبات، حرارة، رطوبة.

تُعدُّ درجة الحرارة ورطوبة الهواء من العوامل المهمة التي تؤثر في نمو النباتات داخل الدفيئة. ويؤدي اختلاف الاحتياجات البيئية لكل نوع من النباتات إلى جعل نظام التحكم القائم على نقاط ضبط ثابتة أقل مرونة للتطبيق على محاصيل مختلفة. يهدف هذا البحث إلى تصميم نظام للتحكم في درجة الحرارة والرطوبة داخل الدفيئة باستخدام طريقة فازي ممداني القادرة على التكيف مع مختلف ملفات تعريف النباتات. تم تطوير النظام بالاعتماد على إنترنت الأشياء (IoT) باستخدام مستشعرين من نوع SHT35 كمصدر لبيانات درجة الحرارة والرطوبة الداخلية التي تم تجميعها باستخدام قيمة المتوسط، بالإضافة إلى بيانات البيئة الخارجية من Open-Meteo. تتكون متغيرات الإدخال الضبابية من خطأ درجة الحرارة والرطوبة الداخلية والخارجية التي تم تطبيقها ضمن النطاق [2,2]، بينما تكون المخرجات على شكل شدة تشغيل المشغل الحراري، ومروحة الشفط، ومروحة السحب، والمرطب ضمن النطاق 0-100. أظهرت نتائج الاختبار أن النظام قادر على إنتاج قرارات تحكم مختلفة وفقاً لخصائص ملفات تعريف النباتات دون تغيير البنية الأساسية لخوارزمية فازي. كما أظهر اختبار معايرة المستشعر أن انحراف قراءات المستشعر منخفض نسبياً، حيث بلغت أكبر قيمة للخطأ المعياري 1.45 فقط. وأظهر الاختبار الوظيفي أن جميع ميزات النظام تعمل حسب الحاجة، مع قيمة خطأ عدم المطابقة بين مخرجات نظام فازي والحالة الفعلية للمشغلات بلغت 0 في كل اختبار. وفي اختبار الصندوق الأسود، نجح النظام في الوصول إلى الحالة المستقرة في جميع ملفات تعريف النباتات بعدد دورات استقرار مختلف. وقد تحققت الحالة المستقرة بأسرع وقت في ملف تعريف نبات الشمام بعد 4 دورات تحكم، بينما كانت أطول مدة في ملف تعريف نبات البصل الأخضر بعد 10 دورات تحكم. ويخلص هذا البحث إلى أن تطبيق فازي ممداني القائم على ملفات تعريف النباتات يمكن أن يزيد من مرونة نظام التحكم في الدفيئة ويدعم إدارة المناخ المصغر بشكل أكثر تكيفاً.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sektor pertanian modern saat ini tengah bertransisi menuju era *Smart Farming* 4.0, di mana integrasi *Internet of Things* (IoT) menjadi kunci utama untuk mengontrol dan mengelola lahan pertanian secara efisien (Rahmanul et al., 2023). Salah satu implementasi dari teknologi ini adalah penggunaan *smart greenhouse* yang memungkinkan manipulasi iklim mikro agar tanaman dapat tumbuh optimal terlepas dari kondisi cuaca eksternal yang tidak menentu. Dalam sistem *greenhouse*, suhu dan kelembapan merupakan faktor utama yang memengaruhi berbagai proses *fisiologis* tanaman, seperti *fotosintesis*, *respirasi*, dan *transpirasi*. Ketidakstabilan pada parameter ini dapat menimbulkan stres tanaman, menurunkan kualitas hasil panen, serta meningkatkan kerentanan tanaman terhadap penyakit (Tjahyanti et al., 2025). Oleh karena itu, menjaga stabilitas suhu dan kelembapan di dalam *greenhouse* menjadi penting agar kualitas pertumbuhan tanaman tetap terjaga.

Dalam menjaga stabilitas suhu dan kelembapan pada *greenhouse*, sistem kendali otomatis menjadi solusi yang sangat diperlukan untuk menggantikan pengontrolan manual yang tidak efisien (Adek, 2024). Dengan sistem otomatis, parameter lingkungan dapat dipertahankan dalam rentang optimal secara konsisten, serta meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya seperti air dan energi (Gitakarma & Tjahyanti, 2025). Implementasi sistem kendali otomatis ini juga dapat diintegrasikan dengan platform IoT untuk memungkinkan pemantauan jarak

jauh dan pengambilan keputusan berbasis data secara lebih efisien (Mohabuth & Nem, 2023).

Dalam penerapan sistem kendali, pemilihan metode kendali yang tepat menjadi faktor penting untuk mencapai performa optimal. Berbagai metode kendali telah dikembangkan untuk aplikasi greenhouse, mulai dari kendali konvensional seperti *simple rule based*, hingga metode kendali berbasis logika *fuzzy*. Kendali *simple rule based* konvensional bekerja dengan mengaktifkan atau menonaktifkan aktuatur berdasarkan *threshold* tertentu, namun metode ini kurang efektif dan dapat menimbulkan osilasi pada variabel iklim (Vinh & Khanh, 2025). Sebaliknya, metode kendali cerdas berbasis *fuzzy logic* menawarkan pendekatan yang lebih adaptif dengan kemampuan menangani ketidakpastian dan karakteristik non-linear dari sistem greenhouse (Tang & Ahmad, 2024).

Metode logika *Fuzzy Mamdani* telah banyak diadopsi guna mengatasi ketidakpastian dan sifat non-linear dari perubahan suhu dan kelembapan (Velandia et al., 2022). Keunggulan utama *Fuzzy Mamdani* terletak pada interpretabilitas linguistiknya yang merumuskan aturan dalam format yang mudah dipahami manusia sehingga memudahkan proses pemahaman dan validasi, serta sangat efektif dalam melakukan pemetaan non-linear untuk menangkap hubungan kompleks antara *input* dan *output* melalui aturan fuzzy dan fungsi keanggotaan (Tang & Ahmad, 2024). Metode ini terbukti memberikan respon kendali yang lebih halus, stabil, dan presisi dalam menjaga parameter lingkungan dibandingkan metode kendali *On-Off* konvensional (Adek, 2024). Dengan karakteristik tersebut,

Fuzzy Mamdani sangat sesuai digunakan dalam pengendalian suhu dan kelembapan *greenhouse*.

Dalam perspektif Islam, Upaya mewujudkan kendali yang presisi dan stabil melalui logika *Fuzzy Mamdani* selaras dengan prinsip keseimbangan, ketepatan ukuran, dan keteraturan sistem yang merupakan *sunnatullah* dalam penciptaan alam semesta. Landasan teologis mengenai pentingnya menjaga keseimbangan dan kadar dalam setiap elemen lingkungan telah ditegaskan oleh Allah SWT dalam Al-Qur'an Surah Al-Hijr ayat 19:

وَالْأَرْضَ مَدَدْنَاهَا وَأَلْقَيْنَا فِيهَا رَوَاسِيَ وَأَنْبَتْنَا فِيهَا مِنْ كُلِّ شَيْءٍ مَّوْزُونٍ ﴿١٩﴾

“Kami telah menghamparkan bumi, memancangkan padanya gunung-gunung, dan menumbuhkan di sana segala sesuatu menurut ukuran(-nya).” (QS. Al-Hijr [15]: 19).

Tafsir Ringkas Kemenag RI menjelaskan bahwa ayat ini merupakan penegasan kekuasaan Allah dalam menciptakan bumi sebagai pijakan stabil bagi manusia dengan gunung sebagai pasaknya, serta menumbuhkan segala sesuatu dengan ukuran yang tepat demi kemaslahatan makhluk-Nya (KEMENAG, 2026). Penjelasan ini diperdalam dalam Tafsir Tahlili yang memaparkan bahwa segala ciptaan memiliki kadar dan keserasian unik yang disesuaikan dengan kondisi lingkungan tempatnya tumbuh. Perbedaan karakteristik pada setiap tanaman, mulai dari rasa hingga kebutuhan nutrisi seperti yang terlihat pada perbedaan tomat, cabai, hingga melon, menjadi bukti nyata bahwa Allah telah menetapkan *setpoint* atau parameter alami yang berbeda-beda bagi setiap makhluk agar dapat berkembang secara sempurna.

Prinsip *mauzun* atau keseimbangan tersebut menjadi inspirasi teoretis dalam perancangan sistem kendali ini, di mana kemampuan *Fuzzy Mamdani* dalam merumuskan aturan linguistik merupakan manifestasi dari upaya manusia untuk memahami takaran yang seimbang di alam. Pemetaan *input* dan *output* yang presisi pada sistem kendali mencerminkan ketelitian dalam menjaga parameter lingkungan agar tetap berada pada kadar optimal bagi pertumbuhan tanaman. Integrasi sensor IoT berperan penting sebagai sarana untuk memantau fenomena alam yang telah ditetapkan kadarnya oleh Allah, sehingga akurasi data yang ditangkap menjadi krusial agar keputusan kendali tetap menjaga harmoni lingkungan tanpa melampaui batas atau melakukan pemborosan sumber daya.

Penelitian ini menjadi ikhtiar ilmiah untuk mengaplikasikan teknologi yang mampu meneladani ketelitian ciptaan Allah melalui sistem yang mampu mengakomodasi karakteristik spesifik setiap makhluk. Sebagaimana tafsir mengenai keberagaman tanaman, kebutuhan parameter yang berbeda pada tiap jenis tanaman menuntut adanya fleksibilitas dalam sistem kendali agar tidak hanya stabil secara teknis namun juga adaptif secara fungsional. Tantangan kemudian muncul ketika nilai keseimbangan tersebut diterapkan pada arsitektur sistem yang masih bersifat kaku dan terbatas hanya pada satu jenis ekosistem tertentu.

Berbagai penelitian sebelumnya telah membuktikan efektivitas logika *fuzzy mamdani* dalam menjaga stabilitas suhu dan kelembapan *greenhouse*, namun mayoritas sistem kendali *fuzzy mamdani* yang dikembangkan bersifat statis dan dirancang secara spesifik hanya untuk satu jenis tanaman. Sebagai contoh, penelitian oleh Haryawan et al (2023). merancang sistem monitoring iklim mikro

menggunakan logika *fuzzy* yang secara spesifik dikhususkan untuk kebutuhan tanaman Tomat, sedangkan penelitian terpisah oleh Arief et al (2024) mengembangkan sistem serupa yang dikhususkan hanya untuk tanaman Cabai dengan karakteristik *setpoint* yang berbeda.

1.2 Identifikasi Masalah

Bagaimana merancang sistem kendali suhu dan kelembapan *greenhouse* menggunakan *fuzzy mamdani* yang mampu mempertahankan nilai *setpoint* suhu dan kelembapan pada berbagai profil tanaman?

1.3 Batasan Penelitian

1. Data kondisi lingkungan luar ruangan diperoleh dari layanan cuaca publik, bukan dari sensor fisik di lapangan.
2. Aktuator yang dikendalikan dibatasi pada perangkat utama pengatur suhu dan kelembapan, seperti kipas *intake*, kipas *exhaust*, heater, dan *humidifier*.
3. Pengujian akan dilakukan hanya pada profil tanaman melon, tomat dan bayam.
4. Pengujian sistem kendali dilakukan hanya pada level simulasi dan uji coba prototipe tanpa menyertakan hasil panen tanaman.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang sistem kendali suhu dan kelembapan *greenhouse* menggunakan *fuzzy mamdani* yang mampu mempertahankan nilai *setpoint* suhu dan kelembapan pada berbagai profil tanaman.

1.5 Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat yang diharapkan dari penelitian ini kepada berbagai pihak, diantaranya sebagai berikut:

1. Bagi petani dan pengelola *greenhouse*, penelitian ini diharapkan dapat menghadirkan sistem kendali suhu dan kelembapan yang fleksibel dan mudah disesuaikan dengan kebutuhan berbagai jenis tanaman melalui pengaturan profil tanaman.
2. Bagi kalangan akademisi dan peneliti, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem kendali cerdas berbasis *fuzzy* yang ringan, adaptif, dan relevan dengan konteks pertanian presisi berskala kecil.

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian terkait pengendalian suhu dan kelembapan pada *greenhouse* dan sistem budidaya tertutup telah banyak dikembangkan, salah satunya adalah logika *fuzzy*. Di antara berbagai pendekatan *fuzzy* yang ada, metode *fuzzy mamdani* menjadi salah satu metode yang paling banyak digunakan dalam pengendalian suhu dan kelembapan karena kemampuannya dalam merepresentasikan pengetahuan pakar melalui aturan linguistik yang mudah dipahami serta memberikan respon kendali yang halus pada sistem yang bersifat non-linear dan penuh ketidakpastian seperti *greenhouse*.

Penelitian yang dilakukan oleh Riahi et al. (2024) mengembangkan sistem pengendalian iklim mikro *greenhouse* menggunakan *fuzzy mamdani* untuk mengatur suhu dan kelembapan di dalam *greenhouse* terisolasi. Sistem *fuzzy* dirancang berdasarkan aturan linguistik yang merepresentasikan kondisi lingkungan aktual terhadap *setpoint*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *fuzzy mamdani* mampu menjaga kestabilan suhu dan kelembapan dengan tingkat *error* yang rendah serta respon yang stabil, sehingga sesuai digunakan untuk pengendalian iklim mikro *greenhouse*. Namun, sistem ini masih menggunakan *setpoint* statis dan belum mempertimbangkan perbedaan kebutuhan lingkungan antar jenis tanaman.

Pendekatan *fuzzy mamdani* juga diterapkan oleh Adek (2024) pada *greenhouse* hidroponik untuk mengoptimalkan pertumbuhan tanaman melon. Sistem *fuzzy* digunakan sebagai pengendali utama suhu dan kelembapan berdasarkan aturan pakar yang telah ditentukan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan *fuzzy mamdani* menghasilkan lingkungan tumbuh yang lebih stabil dibandingkan pengendalian konvensional. Meskipun demikian, sistem kendali dirancang khusus untuk satu jenis tanaman, sehingga fleksibilitas penggunaan untuk tanaman lain dengan kebutuhan lingkungan berbeda masih terbatas.

Implementasi *fuzzy mamdani* berbasis IoT dikembangkan oleh Arief et al. (2024) dalam sistem pemantauan dan penyiraman pintar pada *greenhouse* tanaman cabai. Logika *fuzzy* digunakan untuk menentukan aksi kendali berdasarkan kondisi lingkungan yang terukur. Penelitian ini menunjukkan bahwa *fuzzy mamdani* efektif diintegrasikan dengan platform IoT untuk pengendalian dan *monitoring* jarak jauh. Namun, pengendalian yang diterapkan masih berfokus pada satu jenis tanaman dan belum mengadopsi konsep profil tanaman sebagai dasar adaptasi *setpoint* atau aturan *fuzzy*.

Penelitian oleh Ammar et al. (2023) mengembangkan sistem pengendalian iklim mikro pada *greenhouse* tanaman tomat menggunakan logika *fuzzy* berbasis aturan. Sistem *fuzzy mamdani* digunakan untuk menjaga suhu dan kelembapan sesuai dengan kebutuhan tanaman tomat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan *fuzzy mamdani* mampu meredam fluktuasi suhu dan kelembapan secara lebih halus dibandingkan pengendalian manual. Namun, sistem yang

dikembangkan masih bersifat statis dan tidak mendukung penggunaan satu sistem kendali untuk berbagai profil tanaman.

Pengolahan data sensor juga menjadi aspek penting dalam sistem kendali *greenhouse*. González-Vidal et al. (2022) mengkaji penggunaan agregasi data dari dua sensor suhu dan kelembapan yang ditempatkan pada posisi berbeda di dalam *greenhouse*. Nilai rata-rata dari kedua sensor digunakan sebagai representasi kondisi lingkungan aktual sebelum diproses oleh sistem kendali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode agregasi sederhana seperti rata-rata mampu mengurangi fluktuasi pembacaan sensor individual dan meningkatkan kestabilan input sistem *fuzzy*. Pendekatan ini relevan untuk sistem *greenhouse* karena mampu meningkatkan keandalan data lingkungan yang menjadi dasar pengambilan keputusan kendali.

Penelitian oleh Husein et al. (2019) mengembangkan sistem pengendalian suhu berbasis *duty cycle* pada aktuator pendingin menggunakan pendekatan *fuzzy* Proporsional Integral Derivative (PID). Nilai keluaran *fuzzy* digunakan untuk menentukan durasi aktif dan nonaktif aktuator dalam satu siklus waktu tertentu. Pendekatan berbasis waktu ini memungkinkan pengendalian yang lebih efisien dan responsif terhadap perubahan suhu, serta mengurangi beban kerja aktuator. Konsep *duty cycle* tersebut relevan untuk diterapkan pada sistem pengendalian suhu dan kelembapan *greenhouse*, terutama dalam mengatur kipas, *heater*, atau *humidifier* secara periodik.

Pra-pemrosesan data berupa normalisasi nilai error juga berperan penting dalam sistem kendali *fuzzy*. Bicomumakuba et al. (2025) menekankan bahwa data

sensor yang digunakan sebagai input sistem kendali perlu melalui tahap pembersihan, agregasi, dan normalisasi agar berada dalam rentang yang konsisten. Normalisasi nilai *error* memungkinkan seluruh masukan *fuzzy* berada pada skala yang seragam, sehingga inferensi *fuzzy* dapat berjalan lebih optimal dan tidak bias akibat perbedaan rentang nilai profil tanaman. Pendekatan ini sangat relevan untuk sistem kendali *greenhouse* dengan multisensor dan profil tanaman yang beragam.

Tabel 2. 1 Penelitian Terkait

No.	Judul Penelitian	Hasil	Persamaan	Perbedaan
1.	Effectiveness of the Fuzzy Logic Control to Manage the Microclimate Inside a Smart Insulated Greenhouse (Riahi et al., 2024)	<i>fuzzy mamdani</i> mampu menjaga suhu dan kelembapan <i>greenhouse</i> secara stabil	Sama-sama menerapkan logika <i>fuzzy</i> untuk mengendalikan suhu dan kelembapan pada sistem <i>greenhouse</i>	Tidak menerapkan konsep profil tanaman dan set-point bersifat statis untuk satu kondisi lingkungan
2.	Fuzzy Mamdani Smart Control for Optimizing Melon Growth in Nutrient Film Technique (NFT) Hydroponic Greenhouse (Adek, 2024)	<i>fuzzy mamdani</i> berhasil menstabilkan suhu dan kelembapan untuk pertumbuhan melon	Sama-sama menggunakan metode <i>fuzzy mamdani</i> untuk pengendalian suhu dan kelembapan pada <i>greenhouse</i>	Sistem hanya difokuskan pada tanaman melon dan belum mendukung adaptasi profil tanaman
3.	Rancang Bangun Sistem Pemantauan dan Penyiraman Pintar Tanaman Cabai pada Greenhouse Menggunakan Fuzzy Mamdani Berbasis Blynk IoT (Arief et al., 2024)	<i>fuzzy mamdani</i> mampu mengatur penyiraman dan kondisi lingkungan secara otomatis	Menggunakan logika <i>fuzzy mamdani</i> dan konsep IoT dalam sistem <i>greenhouse</i>	Fokus utama pada penyiraman tanaman cabai dan tidak menerapkan mekanisme profil tanaman berbasis rentang <i>error</i>
4.	Sistem Monitoring Iklim Mikro pada Prototipe Greenhouse Tanaman Tomat Menggunakan Metode Fuzzy dan Aplikasi Telegram (Haryawan et al., 2023)	<i>fuzzy logic</i> mampu menjaga kestabilan suhu dan kelembapan <i>greenhouse</i>	Sama-sama menggunakan <i>fuzzy logic</i> untuk pengendalian iklim mikro <i>greenhouse</i>	Sistem dirancang khusus untuk tanaman tomat dan bersifat statis tanpa dukungan profil tanaman
5.	Smart Operation of Climatic Systems in a Greenhouse (González-vidal et al., 2022)	Pendekatan kendali cerdas berbasis multi-sensor mampu meningkatkan kestabilan iklim mikro <i>greenhouse</i>	Sama-sama memanfaatkan data suhu dan kelembapan dari lebih dari satu sensor untuk pengendalian	Tidak menggunakan <i>fuzzy mamdani</i>

No.	Judul Penelitian	Hasil	Persamaan	Perbedaan
			lingkungan greenhouse	
6.	Duty Cycle Control on Compressor of Split Air Conditioners Using Internet of Things Embedded in Fuzzy-PID (Husein et al., 2019)	Sistem kendali berbasis waktu mampu meningkatkan efisiensi energi dan kestabilan suhu ruangan	Sama-sama menggunakan konsep <i>error</i> dan kendali berbasis waktu dalam sistem pengendalian suhu	Objek penelitian berupa AC ruangan dengan <i>fuzzy</i> PID, bukan greenhouse dan tidak mengendalikan kelembapan
7.	Multi-Sensor Monitoring, Intelligent Control, and Data Processing for Smart Greenhouse Environment Management (Bicamumakuba et al., 2025)	pengolahan data, agregasi multi-sensor, dan normalisasi berperan penting dalam peningkatan kualitas sistem smart greenhouse	Sama-sama membahas penggunaan data multi-sensor suhu dan kelembapan serta pentingnya pra-pemrosesan data	Merupakan studi <i>Systematic Literature Review</i> (SLR) dan tidak membahas implementasi sistem kendali secara langsung
USULAN PENELITIAN				
8.	Sistem Kendali Suhu dan Kelembapan Greenhouse Menggunakan Fuzzy Mamdani Berdasarkan Profil Tanaman		Sistem kendali suhu dan kelembapan <i>greenhouse</i> menggunakan <i>fuzzy mamdani</i> berdasarkan profil tanaman dengan memanfaatkan dua sensor suhu dan kelembapan yang diagregasi menggunakan nilai rata-rata, serta normalisasi nilai <i>error</i> sebagai input sistem fuzzy.	

2.2 Konsep Profil Tanaman

Profil tanaman didefinisikan sebagai sekumpulan parameter kebutuhan biologis spesifik suatu tanaman yang diadaptasikan berdasarkan jenis atau fase pertumbuhan tanaman tersebut. Profil tanaman berperan sebagai pedoman dalam sistem kendali untuk menetapkan *setpoint* kendali serta membentuk fungsi keanggotaan *fuzzy* yang sesuai. Dengan demikian, sistem kendali tidak bersifat kaku, melainkan dapat menyesuaikan diri dengan karakteristik tanaman yang berbeda.

2.2.1 Parameter Iklim Mikro Tanaman

Profil tanaman juga mencakup parameter iklim mikro yang berperan penting dalam menunjang proses fisiologis tanaman. Parameter iklim mikro tersebut meliputi suhu dan kelembapan udara, yang secara langsung memengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Suhu yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat menghambat laju fotosintesis dan mengganggu keseimbangan metabolisme tanaman, sedangkan kelembapan udara yang terlalu rendah dapat menyebabkan stress pada tanaman dan kelembapan yang terlalu tinggi berpotensi meningkatkan serangan patogen (Tjahyanti et al., 2025).

Pada tanaman bayam, variasi ekstrem suhu dan kelembapan dilaporkan dapat menghambat penyerapan nutrisi sehingga berdampak langsung pada pertumbuhan dan hasil panen bayam (Febriansyah et al., 2023). Kondisi serupa juga ditemukan pada tanaman hortikultura lain seperti melon dan tomat, yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan lingkungan mikro, khususnya pada fase pertumbuhan *vegetatif* dan *generatif*.

Setiap jenis tanaman memiliki rentang suhu dan kelembapan optimal yang berbeda untuk mencapai pertumbuhan maksimal. Tanaman bayam tumbuh optimal pada suhu berkisar 24–27 °C dengan kelembapan relatif sekitar 40–80%, sehingga kestabilan kedua parameter tersebut sangat diperlukan dalam sistem budidaya tertutup (Febriansyah et al., 2023). Tanaman bawang daun memerlukan kondisi lingkungan dengan suhu udara berkisar 19–24 °C dan kelembapan relatif sekitar 80–90% agar proses pertumbuhan dapat berlangsung secara optimal (Hudha et al., 2023). Sementara itu, tanaman melon umumnya tumbuh baik pada suhu 25–30 °C

dengan kelembapan relatif 60–80%, terutama ketika dibudidayakan di dalam *greenhouse* yang memungkinkan pengendalian iklim mikro secara lebih presisi (Damanik & Sahfitra, 2026; Wilujeng et al., 2024). Ketidaksesuaian suhu dan kelembapan dari rentang optimal tersebut dapat menurunkan laju *fotosintesis*, menghambat pertumbuhan *vegetatif*, serta menurunkan kualitas dan kuantitas hasil panen. Rentang parameter suhu udara dan kelembapan udara optimal untuk beberapa tanaman yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Profil Tanaman

Tanaman	Suhu Udara Optimal (°C)	Kelembapan Udara Optimal (%RH)	Sumber
Bayam	24–27	40–80	(Febriansyah et al., 2023)
Bawang daun	19–24	80–90	(Hudha et al., 2023)
Melon	25–30	60–80	(Damanik & Sahfitra, 2026; Wilujeng et al., 2024)

2.3 Internet of Things pada Greenhouse

Penggunaan IoT pada sistem *greenhouse* merupakan salah satu tren utama di bidang *smart farming*. IoT dalam *greenhouse* menghubungkan berbagai sensor dan aktuator ke jaringan internet sehingga memungkinkan pemantauan dan pengendalian kondisi lingkungan secara otomatis dan *real-time* (Rahmanul et al., 2023).

Dalam sistem smart *greenhouse* berbasis IoT, sensor berfungsi untuk mengukur parameter seperti suhu, dan kelembapan udara, sementara aktuator akan merespons perubahan lingkungan sesuai data sensor. Data lingkungan yang dikumpulkan kemudian dikirim ke mikrokontroler atau *gateway* dan selanjutnya ke server melalui protokol seperti *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT)

(Cahyadi et al., 2025) . Hal ini memungkinkan petani memantau kondisi *greenhouse* secara jarak jauh melalui aplikasi web atau ponsel, sekaligus mengotomatisasi kontrol untuk menjaga iklim mikro tetap optimal.

Penerapan IoT terbukti meningkatkan efisiensi sumber daya seperti energi di dalam *greenhouse*. Otomasi pengaturan suhu dan kelembapan berbasis sensor juga berdampak pada penghematan energi listrik. Sistem *greenhouse* cerdas dengan kontrol *fuzzy logic* dilaporkan dapat mengurangi penggunaan energi sekitar 20–22% tanpa mengorbankan kondisi tumbuh tanaman (Bersani et al., 2022). Penghematan ini dicapai dengan cara menyalakan aktuator hanya saat diperlukan dan pada intensitas yang dibutuhkan.

2.4 Logika *Fuzzy Mamdani*

Logika fuzzy merupakan pengembangan dari logika boolean klasik yang diperkenalkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965. Berbeda dengan logika biner yang hanya mengenal nilai 0 dan 1, logika fuzzy memungkinkan variabel memiliki derajat keanggotaan di antara 0 dan 1. Dalam logika fuzzy, suatu variabel tidak hanya memiliki nilai biner 0 atau 1, namun dapat memiliki nilai antara keduanya, seperti 0,2 atau 0,8 (Nurjannah et al., 2024). Misalnya, suhu “tinggi” atau “rendah” pada logika fuzzy, nilai suhu aktual dapat memiliki keanggotaan tertentu pada himpunan fuzzy seperti rendah, optimal, dan tinggi.

Dalam logika *fuzzy*, variabel dan pernyataan dinyatakan dalam bentuk himpunan fuzzy yang memiliki fungsi keanggotaan. Konsep ini memungkinkan penanganan data yang tidak pasti dan kompleks dengan cara menangkap

ketidakpastian dalam data dan memberikan fleksibilitas dalam pengambilan keputusan (Nurjannah et al., 2024).

2.4.1 Fungsi Keanggotaan *Fuzzy*

Fungsi derajat keanggotaan adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data pada derajat keanggotaan yang memiliki interval antara 0 sampai 1 (Munawaroh et al., 2019). Beberapa bentuk fungsi keanggotaan yang umum digunakan adalah (Fua & Kaesmetan, 2025):

a. *Tringular membership function*

Fungsi keanggotaan segitiga, dapat dituliskan pada persamaan 2.1 berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{untuk } x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{untuk } a \leq x \leq b \\ \frac{x-c}{b-c} & \text{untuk } b \leq x \leq c \end{cases} \quad (2.1)$$

Keterangan:

- $\mu(x)$ = fungsi keanggotaan.
- x = nilai dari fungsi keanggotaan.
- a = batas awal dari perubahan fungsi keanggotaan.
- b = batas akhir dari perubahan fungsi keanggotaan.

b. *Trapezoidal membership fuction*

Fungsi keanggotaan trapesium, dapat dituliskan pada persamaan 2.2 berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{untuk } x \leq a \text{ atau } x \geq d \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{untuk } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{untuk } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{untuk } x \geq d \end{cases} \quad (2.2)$$

Keterangan:

- $\mu(x)$ = fungsi keanggotaan.
- x = nilai dari fungsi keanggotaan.
- a = batas awal dari perubahan fungsi keanggotaan.
- b = batas akhir dari perubahan fungsi keanggotaan.

2.4.2 Sistem Inferensi *Fuzzy Mamdani*

Sistem inferensi fuzzy mamdani merupakan metode penalaran fuzzy untuk merancang sistem kontrol berbasis aturan linguistik. Pengambilan keputusan dilakukan dengan menyatukan aturan-aturan “*IF-THEN*” yang berasal dari pengetahuan pakar. Setiap aturan menghubungkan kondisi *input* fuzzy dengan *output* fuzzy, dan hasil akhir keputusan diperoleh melalui proses fuzzifikasi input, evaluasi aturan, agregasi hasil, dan defuzzifikasi.

Langkah-langkah dalam proses pengambilan keputusan menggunakan logika *fuzzy mamdani* dapat dijelaskan sebagai berikut (Sahulata et al., 2020):

a. Pembentukan himpunan *fuzzy* (fuzzifikasi)

Variabel input di buat ke dalam himpunan *fuzzy* agar dapat digunakan dalam perhitungan nilai kebenaran dari premis pada setiap aturan dan variabel *input* maupun variabel *output* dibagi menjadi satu atau lebih himpunan *fuzzy*.

b. Aplikasi fungsi implikasi atau pembentukan aturan *fuzzy*

Aplikasi fungsi implikasi atau pembentukan aturan *fuzzy*. Setiap aturan (proposisi) pada basis pengetahuan *fuzzy* akan berhubungan dengan suatu relasi *fuzzy*. Setiap aturan dapat ditulis dalam bentuk umum sebagai berikut:
 IF x is A THEN y is B dimana x , y adalah skalar, serta A dan B adalah himpunan *fuzzy*. Proposisi yang mengikuti IF disebut sebagai anteseden sedangkan proposisi yang mengikuti THEN disebut konsekuen. Proposisi ini dapat diperluas dengan menggunakan operator *fuzzy* yaitu: AND dan OR,

atau dapat didefinisikan sebagai berikut : IF x_1 is A_1 AND ... AND x_n is A_n
THEN y is B .

c. Komposisi Aturan

Mengkombinasikan semua variabel input dengan t-norm. T-norm adalah operasi irisan pada himpunan fuzzy. Adanya aturan komponen himpunan baru X_r , dimana $R = 1, 2, 3, \dots, n$ sebagai berikut: $X = x_1$ AND x_2 AND ... AND x_n , yang didefinisikan oleh fungsi keanggotaan: $\mu_X(x) = \min(\mu_{x_1}(x), \mu_{x_2}(x), \dots, \mu_{x_n}(x))$ untuk $x \in X$

d. Defuzzyfikasi

Proses mengubah *fuzzy output* menjadi nilai tegas berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. *Input* dari proses *defuzzyfikasi* adalah suatu himpunan yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan *fuzzy* sedangkan *output* yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan *fuzzy*. *Defuzzyfikasi* merupakan metode yang sangat penting dalam sistem *fuzzy*. Salah satu metode dari *defuzzyfikasi* adalah *Centroid Method* atau bisa juga disebut *Center of Area (Center of Gravity)*. *Centroid Method* adalah pengambilan titik pusat z^* pada daerah *fuzzy*, dengan persamaan matematis pada persamaan 2.3 berikut:

$$z^* = \frac{\int z\mu(z)dz}{\int \mu(z)dz} \quad (2.3)$$

Keterangan :

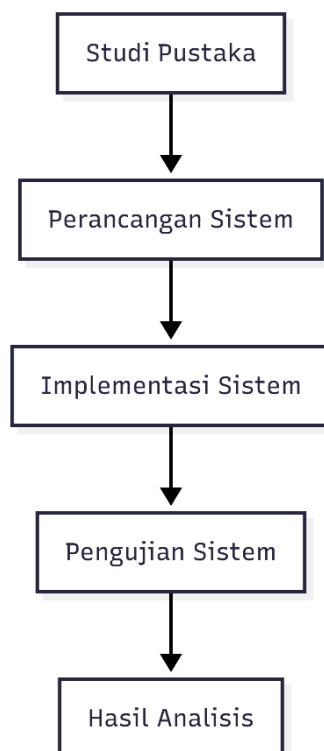
z^*	= nilai keluaran akhir (nilai tegas) hasil proses defuzzyfikasi..
z	= variabel <i>output</i> pada domain fuzzy.
$\mu(z)$	= nilai derajat keanggotaan dari z .
$\int z\mu(z)dz$	= hasil perkalian setiap nilai <i>output</i> dengan derajat keanggotaannya.
$\int \mu(z)dz$	= jumlah seluruh derajat keanggotaan pada domain <i>output</i> .

BAB III

DESAIN DAN IMPLEMENTASI

3.1 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang disusun secara sistematis untuk memastikan tujuan penelitian dapat tercapai dengan baik. Prosedur penelitian berfungsi sebagai gambaran umum mengenai alur kegiatan penelitian, mulai dari tahap perancangan sistem hingga tahap pengujian dan analisis kinerja sistem kendali. Secara keseluruhan, tahapan prosedur penelitian ini menggambarkan proses pengembangan sistem kendali suhu dan kelembapan greenhouse menggunakan metode *fuzzy mamdani*. Alur prosedur penelitian secara umum ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Prosedur Penelitian

Tahap awal penelitian adalah studi pustaka. Pada tahap ini dilakukan pengumpulan dan kajian literatur yang relevan dengan topik penelitian, meliputi iklim mikro tanaman, sistem kendali suhu dan kelembapan, IoT, serta metode *fuzzy mamdani*.

Tahap berikutnya adalah perancangan sistem. Pada tahap ini dilakukan perancangan arsitektur sistem kendali greenhouse yang meliputi pemilihan sensor suhu dan kelembapan, perancangan aktuator, penentuan mikrokontroler, serta perancangan sistem komunikasi data berbasis IoT. Selain itu, pada tahap ini juga dilakukan perancangan algoritma *fuzzy mamdani* yang digunakan sebagai pengendali utama suhu dan kelembapan berdasarkan nilai *setpoint* yang ditentukan.

Tahap berikutnya adalah implementasi sistem, di mana rancangan yang telah dibuat pada tahap sebelumnya direalisasikan ke dalam bentuk sistem yang dapat dijalankan. Implementasi meliputi pemasangan sensor suhu dan kelembapan di dalam *greenhouse*, integrasi mikrokontroler dengan sistem *backend*, serta penerapan algoritma *fuzzy mamdani* untuk menghasilkan keputusan kendali. Pada tahap ini juga dilakukan implementasi profil tanaman sebagai parameter konfigurasi sistem yang menentukan nilai *setpoint* dan rentang kerja pengendali *fuzzy*.

Setelah sistem berhasil diimplementasikan, tahap selanjutnya adalah pengujian sistem. Pengujian sistem diawali dengan pengujian kalibrasi sensor suhu dan kelembapan melalui perbandingan dengan alat ukur referensi untuk memastikan tingkat keakuratan pembacaan sensor. Selanjutnya dilakukan pengujian hasil fuzzy, yaitu untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam

memetakan nilai error suhu dan kelembapan menjadi keluaran kendali yang sesuai berdasarkan aturan fuzzy mamdani dan profil tanaman yang digunakan. Setelah itu, dilakukan *blackbox testing* untuk menguji fungsionalitas sistem secara keseluruhan, meliputi proses pembacaan data sensor, pemrosesan algoritma fuzzy, pengiriman perintah melalui protokol komunikasi, hingga eksekusi aktuator.

Tahap akhir penelitian adalah analisis. Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap data hasil pengujian untuk menilai kemampuan sistem kendali dalam menjaga kestabilan suhu dan kelembapan *greenhouse*. Evaluasi difokuskan pada besarnya *error* terhadap *setpoint*, kestabilan respon kendali, serta kemampuan sistem *fuzzy* dalam mempertahankan kondisi lingkungan pada rentang yang diinginkan. Hasil analisis dan evaluasi ini digunakan sebagai dasar untuk menarik kesimpulan serta memberikan rekomendasi pengembangan sistem pada penelitian selanjutnya.

3.2 Desain Sistem

Desain sistem merupakan tahapan yang menjelaskan rancangan keseluruhan sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini, mulai dari arsitektur sistem, komponen perangkat keras dan perangkat lunak, mekanisme akuisisi data, hingga perancangan antarmuka pengguna. Tahapan ini bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai bagaimana setiap komponen saling terintegrasi dalam mendukung proses monitoring dan pengendalian suhu serta kelembapan pada *greenhouse*. Perancangan sistem dilakukan dengan pendekatan IoT yang menghubungkan sensor, aktuator, *server* aplikasi, basis data, dan *web application* dalam satu kesatuan sistem yang mampu bekerja secara otomatis menggunakan

metode *fuzzy mamdani*. Desain sistem yang disajikan pada bagian ini menjadi dasar implementasi yang dilakukan pada tahap selanjutnya.

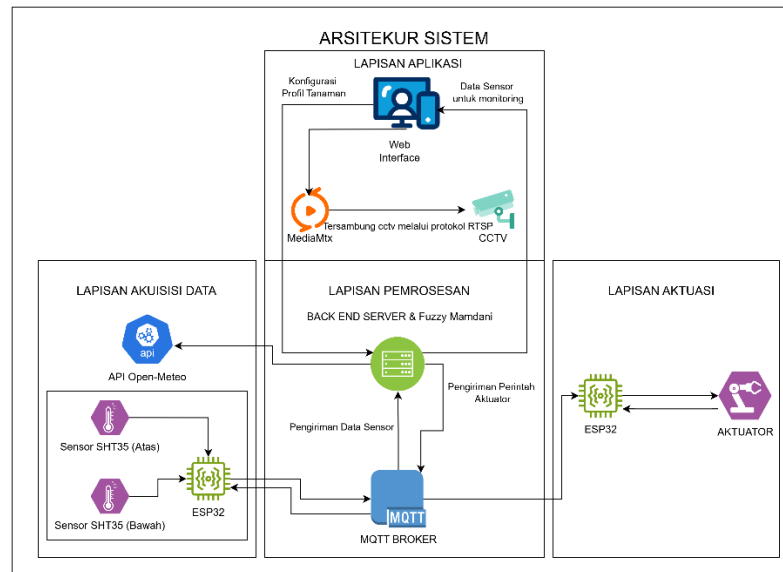
3.2.1 Gambaran Umum Sistem

Sistem yang dikembangkan pada penelitian ini merupakan sistem kendali suhu dan kelembapan greenhouse berbasis *Internet of Things* (IoT) yang bekerja secara otomatis menggunakan metode *fuzzy mamdani*. Selain berfungsi sebagai sistem kendali otomatis, sistem ini juga dilengkapi dengan sebuah aplikasi berbasis web yang berperan sebagai platform IoT untuk melakukan monitoring kondisi lingkungan greenhouse serta konfigurasi profil tanaman.

Melalui *web application* ini, pengguna dapat memantau nilai suhu dan kelembapan udara secara *real-time*, melihat status aktuator, serta melakukan pemilihan dan pengaturan profil tanaman. *Web application* berfungsi sebagai antarmuka antara pengguna dengan sistem kendali, sehingga pengguna dapat melakukan konfigurasi sistem tanpa harus berinteraksi langsung dengan perangkat keras.

3.2.2 Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem IoT pada penelitian terdiri dari empat lapisan utama, yaitu lapisan akuisisi data, lapisan pemrosesan, lapisan aplikasi, dan lapisan aktuasi. Pembagian arsitektur ke dalam beberapa lapisan bertujuan untuk memisahkan fungsi pengukuran, komunikasi, pengolahan data, interaksi pengguna, serta eksekusi kendali, sehingga sistem menjadi lebih terstruktur, modular, dan mudah dikembangkan, yang ditunjukkan dalam gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Arsitektur Sistem

Lapisan akuisisi data berfungsi sebagai lapisan yang bertanggung jawab dalam pengambilan data lingkungan greenhouse. Pada lapisan ini digunakan sensor suhu dan kelembapan udara serta sumber data lingkungan luar sebagai masukan sistem kendali. Komponen yang digunakan pada lapisan akuisisi data ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Komponen Lapisan Akuisisi Data

No	Komponen	Fungsi
1	Sensor SHT35 (atas)	Mengukur suhu dan kelembapan udara pada bagian atas greenhouse
2	Sensor SHT35 (Bawah)	Mengukur suhu dan kelembapan udara pada bagian bawah greenhouse
3	API OpenMeteo	Menyediakan data suhu dan kelembapan udara lingkungan luar greenhouse

Berdasarkan Tabel 3.1, sistem menggunakan dua sensor SHT35 yang dipasang pada posisi berbeda di dalam greenhouse untuk memperoleh representasi kondisi lingkungan internal yang lebih akurat, di mana nilai suhu dan kelembapan diperoleh dari hasil perhitungan rata-rata pembacaan kedua sensor. Selain itu, data

dari *Application Programming Interface* (API) OpenMeteo dimanfaatkan sebagai informasi tambahan mengenai kondisi lingkungan luar yang dapat memengaruhi mikroiklim di dalam greenhouse, karena data cuaca yang disediakan bersifat regional dan lebih representatif dalam menggambarkan kondisi lingkungan luar dibandingkan pengukuran pada satu titik menggunakan sensor fisik.

Lapisan pemrosesan berperan sebagai pusat pengolahan data dan pengambilan keputusan kendali. Pada lapisan ini, data hasil pengukuran dari lapisan akuisisi data diproses menggunakan algoritma *fuzzy mamdani* untuk menghasilkan keputusan kendali suhu dan kelembapan. Komponen utama pada lapisan pemrosesan ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Komponen Lapisan Pemrosesan

No	Komponen	Fungsi
1	Server Aplikasi	Mengolah data sensor dan menjalankan proses pengendalian
2	Algoritma Fuzzy Mamdani	Menentukan keputusan kendali suhu dan kelembapan
3	Basis Data PostgreSQL	Menyimpan data sensor, data historis, dan konfigurasi profil tanaman

Berdasarkan Tabel 3.2, lapisan pemrosesan tidak hanya berfungsi sebagai tempat eksekusi algoritma *fuzzy mamdani*, tetapi juga sebagai pengelola data sistem. Basis data PostgreSQL digunakan untuk menyimpan data historis pengukuran dan konfigurasi profil tanaman, sehingga sistem dapat mendukung proses *monitoring* jangka panjang dan pengaturan parameter kendali secara fleksibel.

Lapisan aplikasi menyediakan antarmuka bagi pengguna untuk melakukan *monitoring* dan konfigurasi sistem. Pada lapisan ini diimplementasikan sebuah aplikasi berbasis web yang memungkinkan pengguna memantau data suhu dan

kelembapan hasil pembacaan sensor, memantau kondisi *greenhouse* melalui cctv, serta melakukan konfigurasi profil tanaman. Konfigurasi profil tanaman yang dilakukan melalui aplikasi web akan diteruskan ke lapisan pemrosesan dan digunakan sebagai parameter dalam proses pengendalian selanjutnya.

Lapisan aktuasi merupakan lapisan yang bertugas mengeksekusi keputusan kendali yang dihasilkan oleh lapisan pemrosesan dalam bentuk aksi fisik. Aktuator pada lapisan ini secara langsung memengaruhi kondisi suhu dan kelembapan udara di dalam *greenhouse*. Komponen pada lapisan aktuasi ditunjukkan pada tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Komponen Lapisan Aktuasi

No	Komponen	Fungsi
1	Kipas Exhaust	Mengeluarkan udara panas dan lembap dari <i>greenhouse</i>
2	Kipas Intake	Memasukkan udara dari luar ke dalam <i>greenhouse</i>
3	Humidifier	Meningkatkan kelembapan udara dan evaporative cooling untuk menurunkan suhu udara di dalam <i>greenhouse</i>
4	Heater	Meningkatkan suhu udara di dalam <i>greenhouse</i>

Berdasarkan Tabel 3.3, aktuator-aktuator tersebut bekerja berdasarkan perintah kendali yang dikirimkan oleh lapisan pemrosesan melalui mikrokontroler ESP32. Aktuator diaktifkan berdasarkan durasi waktu tertentu sehingga mampu menyesuaikan kondisi suhu dan kelembapan udara di dalam *greenhouse* agar mendekati nilai *setpoint* yang ditentukan.

3.2.3 Desain *Greenhouse*

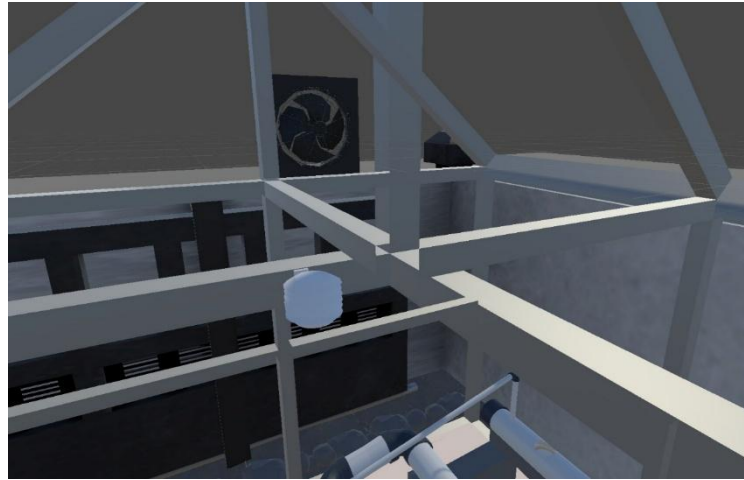
Greenhouse yang digunakan pada penelitian ini merupakan *greenhouse* prototipe berskala kecil yang dirancang sebagai media uji coba penerapan sistem kendali suhu dan kelembapan. Perancangan *greenhouse* dilakukan dengan mempertimbangkan keterbatasan lahan serta tujuan penelitian yang berfokus pada pengujian fungsional sistem kendali, bukan pada produksi tanaman skala besar. Secara fisik, *greenhouse* prototipe memiliki

ukuran panjang 3,5 meter, lebar 3 meter, dan tinggi 3 meter. Tampilan keseluruhan *greenhouse* dari sisi depan ditunjukkan pada gambar 3.3.

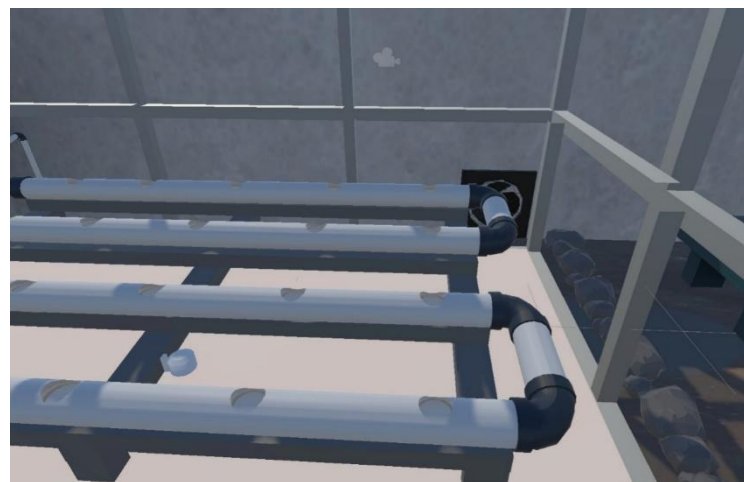


Gambar 3. 3 Desain *greenhouse* tampak depan

Akuisisi data lingkungan *greenhouse* dilengkapi dengan dua unit sensor suhu dan kelembapan SHT35 yang ditempatkan pada dua posisi berbeda, yaitu pada bagian atas dan bagian bawah *greenhouse*. Penempatan sensor bagian atas bertujuan untuk merepresentasikan kondisi udara panas yang cenderung terakumulasi di bagian atas ruang *greenhouse*, sedangkan sensor bagian bawah merepresentasikan kondisi lingkungan di sekitar zona tanaman. Konfigurasi penempatan kipas *exhaust* dan sensor SHT35 bagian atas ditunjukkan pada gambar 3.4, sementara penempatan kipas *intake* dan sensor SHT35 bagian bawah ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3. 4 Posisi Kipas *Exhaust* dan Sensor SHT35 Atas



Gambar 3. 5 Posisi Kipas *Intake* dan Sensor SHT35 Bawah

Penempatan aktuator pada greenhouse prototipe dilakukan secara sederhana dan disesuaikan dengan ukuran ruang. Kipas *intake* ditempatkan pada bagian bawah *greenhouse* untuk memasukkan udara dari luar, sedangkan kipas *exhaust* ditempatkan pada bagian atas untuk membuang udara panas dan lembap. *Heater* ditempatkan pada bagian bawah *greenhouse*, sementara *humidifier* ditempatkan pada bagian atas agar uap air dapat terdistribusi secara merata ke seluruh ruang *greenhouse*. Konfigurasi penempatan aktuator ini bertujuan untuk mendukung proses pengujian sistem kendali suhu dan kelembapan secara efektif dan terkendali.

3.2.4 Strategi Akuisisi Data, Penempatan, dan Agregasi Sensor

Sensor SHT35 ditempatkan pada dua posisi berbeda, yaitu pada bagian bawah dan bagian atas *greenhouse*. Sensor bagian bawah digunakan untuk merepresentasikan kondisi suhu dan kelembapan udara di sekitar zona tanaman, yang secara langsung memengaruhi proses pertumbuhan tanaman. Sementara itu, sensor bagian atas digunakan untuk merepresentasikan kondisi udara pada bagian atas *greenhouse* yang cenderung memiliki suhu lebih tinggi akibat akumulasi udara panas.

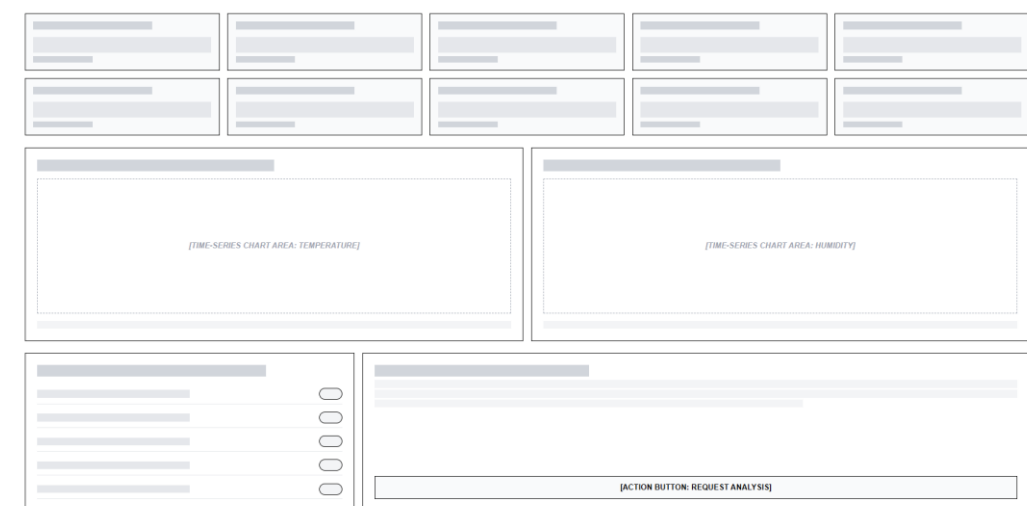
Data suhu dan kelembapan yang digunakan sebagai masukan sistem kendali tidak diambil dari satu sensor secara tunggal, melainkan diperoleh melalui proses agregasi data dari kedua sensor. Metode agregasi yang digunakan adalah perhitungan nilai rata-rata dari pembacaan sensor bagian atas dan bawah. Pendekatan ini dipilih untuk menghasilkan nilai yang lebih representatif terhadap kondisi lingkungan *greenhouse* secara keseluruhan.

Penggunaan nilai rata-rata sebagai hasil agregasi bertujuan untuk mereduksi pengaruh fluktuasi lokal yang mungkin terjadi pada salah satu titik pengukuran. Dengan demikian, sistem kendali tidak bereaksi secara berlebihan terhadap perubahan kondisi yang bersifat sementara atau lokal. Strategi agregasi ini juga berkontribusi dalam meningkatkan kestabilan data masukan bagi algoritma *fuzzy mamdani*, sehingga keputusan kendali yang dihasilkan dapat lebih konsisten dalam mempertahankan suhu dan kelembapan udara mendekati nilai *setpoint* yang telah ditentukan.

3.2.5 Desain *Web Application*

Web application pada penelitian ini dirancang sebagai antarmuka pengguna untuk melakukan *monitoring* dan konfigurasi sistem kendali *greenhouse*. Aplikasi ini berfungsi sebagai media interaksi antara pengguna dan sistem kendali yang berjalan secara otomatis pada lapisan pemrosesan. *Web application* tidak melakukan pengambilan keputusan kendali secara langsung, melainkan menyediakan informasi kondisi lingkungan serta fasilitas pengaturan parameter yang digunakan oleh sistem.

Web application menampilkan data suhu dan kelembapan udara hasil pembacaan sensor secara real-time. Selain itu, aplikasi juga menampilkan status aktuator, seperti *heater*, kipas *exhaust*, kipas *intake*, dan *humidifier*, sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi kerja sistem kendali pada setiap siklus operasi. Rancangan *dashboard monitoring* ini ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Rancangan *Dashboard Monitoring* pada *Web Application*

Web application juga menyediakan fitur pengaturan profil tanaman. Melalui fitur ini, pengguna dapat memilih dan mengatur profil tanaman yang digunakan,

termasuk parameter *setpoint* suhu dan kelembapan serta batas nilai minimum dan maksimum yang menjadi acuan sistem kendali. Pengaturan profil tanaman ini memungkinkan sistem untuk menyesuaikan mekanisme kendali sesuai dengan kebutuhan tanaman yang dibudidayakan. Rancangan pengaturan profil tanaman ditunjukkan pada Gambar 3.7.

Gambar 3. 7 Rancangan Pengaturan Profil Tanaman pada *Web Application*

3.3 Perancangan *Fuzzy Mamdani*

Pada penelitian ini, metode *fuzzy mamdani* digunakan sebagai algoritma utama dalam sistem kendali suhu dan kelembapan greenhouse. Metode ini dipilih karena kemampuannya dalam menangani ketidakpastian serta hubungan nonlinear antara kondisi lingkungan dan respon kendali yang diperlukan. Dengan pendekatan *fuzzy*, keputusan kendali tidak ditentukan secara tegas (*crisp*), melainkan berdasarkan derajat keanggotaan dan aturan linguistik yang menyerupai cara berpikir manusia.

Algoritma *fuzzy mamdani* pada sistem ini diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman *python* dengan memanfaatkan pustaka *scikit-*

fuzzy. Pustaka ini menyediakan fasilitas untuk membangun sistem *fuzzy*, mulai dari pendefinisian variabel linguistik, fungsi keanggotaan, basis aturan *fuzzy*, hingga proses inferensi dan defuzzifikasi. Implementasi menggunakan *python* memungkinkan pengembangan sistem yang fleksibel, mudah dikonfigurasi, serta terintegrasi dengan platform IoT dan sistem backend yang digunakan pada penelitian ini.

Perancangan sistem *fuzzy* pada penelitian ini mencakup penentuan variabel *input* dan *output*, perancangan fungsi keanggotaan, penyusunan basis aturan fuzzy, serta penentuan metode inferensi dan defuzzifikasi. Seluruh komponen tersebut dirancang agar sistem kendali mampu mempertahankan suhu dan kelembapan udara di dalam greenhouse mendekati nilai *setpoint* yang telah ditentukan berdasarkan profil tanaman.

3.3.1 Variabel *Input* dan *Output*

Variabel *input* sistem *fuzzy mamdani* pada penelitian ini didefinisikan dalam bentuk *error* ter-normalisasi. Normalisasi dilakukan untuk menyamakan skala seluruh variabel *input* agar dapat diproses secara konsisten oleh sistem *fuzzy*, serta menghindari dominasi salah satu parameter terhadap proses inferensi. Normalisasi *error* dapat dituliskan pada persamaan 3.1 berikut:

$$e_{norm} = \begin{cases} 0, & X_{min} \leq X_{aktual} \leq X_{maks} \\ \frac{X_{aktual}-X_{min}}{X_{maks}-X_{min}}, & X_{aktual} < X_{min} \\ \frac{X_{aktual}-X_{maks}}{X_{maks}-X_{min}}, & X_{aktual} > X_{maks} \end{cases} \quad (3.1)$$

Keterangan:

X_{aktual} = nilai parameter hasil pengukuran.
 X_{maks} = batas maksimum parameter.
 X_{min} = batas minimum parameter.

Persamaan 3.1 digunakan untuk menormalisasi error suhu maupun kelembapan udara, baik untuk kondisi internal greenhouse maupun kondisi lingkungan luar. Apabila nilai parameter masih berada dalam rentang ideal tanaman, maka nilai error dianggap nol karena sistem tidak memerlukan aksi pengendalian tambahan. Nilai error akan bernilai negatif apabila parameter berada di bawah batas minimum rentang ideal, dan bernilai positif apabila parameter melebihi batas maksimum rentang ideal. Dengan demikian, sistem fuzzy dapat membedakan arah penyimpangan kondisi lingkungan dan menentukan aksi kontrol yang sesuai. Variabel input sistem *fuzzy* pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Variabel *Input*

No	Input	Deskripsi
1	<i>temperature error</i>	Error suhu udara internal ternormalisasi terhadap nilai setpoint tanaman.
2	<i>rh error</i>	Error kelembapan udara internal ternormalisasi terhadap nilai setpoint tanaman.
3	<i>outside temperature error</i>	Error suhu udara lingkungan luar ternormalisasi terhadap nilai setpoint tanaman.
4	<i>outside rh error</i>	Error kelembapan udara lingkungan luar ternormalisasi terhadap nilai setpoint tanaman.

Keempat variabel input tersebut didefinisikan pada domain yang sama, yaitu $[-2,2]$ dengan resolusi 0,01. Penyamaan domain ini bertujuan untuk memudahkan perancangan fungsi keanggotaan dan menjaga keseimbangan kontribusi masing-masing variabel *input* dalam proses inferensi *fuzzy*.

Variabel *output* sistem *fuzzy* merepresentasikan tingkat intensitas kendali aktuator yang digunakan untuk mengatur kondisi suhu dan kelembapan udara di dalam *greenhouse*. Variabel *output* pada penelitian ini didefinisikan pada domain

[0,100], yang menggambarkan intensitas kerja aktuator dalam satu siklus kendali.

Variabel *output* yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada tabel 3.5.

Tabel 3. 5 Variabel *Output*

No	Output	Deksripsi
1	<i>heater</i>	Intensitas kerja <i>heater</i>
2	<i>exhaust fan</i>	Intensitas kerja kipas <i>exhaust</i>
3	<i>intake fan</i>	Intensitas kerja kipas <i>intake</i>
4	<i>humidifier</i>	Intensitas kerja <i>humidifier</i>

3.3.2 Himpunan *Fuzzy* dan Fungsi Keanggotaan

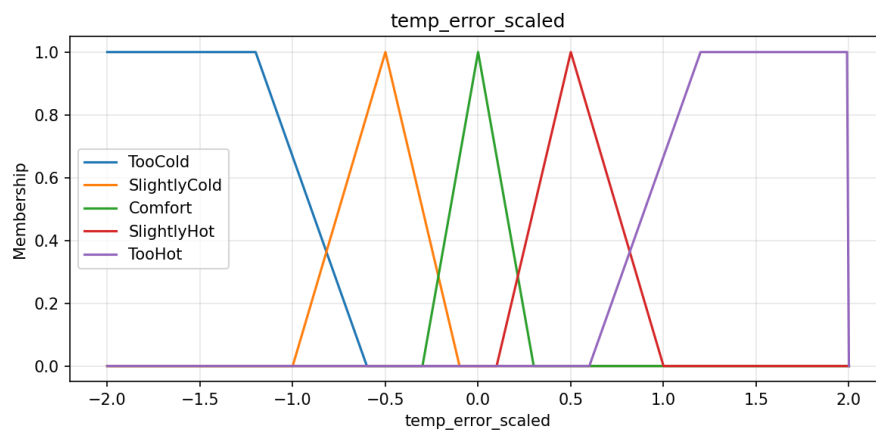
Pada penelitian ini, setiap variabel *input* dan *output* pada sistem *fuzzy mamdani* direpresentasikan menggunakan himpunan *fuzzy* dengan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga dan trapesium. Pemilihan bentuk fungsi keanggotaan tersebut didasarkan pada kesederhanaan, kemudahan interpretasi, serta kemampuannya dalam merepresentasikan perubahan kondisi lingkungan secara bertahap.

Variabel *error* suhu internal dibagi ke dalam lima himpunan *fuzzy* linguistik, yaitu *Too Cold*, *Slightly Cold*, *Comfort*, *Slightly Hot*, dan *Too Hot*. Himpunan *Too Cold* dan *Too Hot* direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan trapesium untuk menggambarkan kondisi ekstrem, sedangkan himpunan di antara keduanya direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan segitiga untuk menggambarkan transisi kondisi yang lebih halus. Himpunan *fuzzy error* suhu internal ditunjukkan pada tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Himpunan *Fuzzy* Suhu *Internal*

No	Himpunan Fuzzy	Jenis Fungsi Keanggotaan	Parameter Fungsi
1	<i>Too Cold</i>	Trapesium	$[-2.0, -2.0, -1.2, -0.6]$
2	<i>Slightly Cold</i>	Segitiga	$[-1.0, -0.5, -0.1]$
3	<i>Comfort</i>	Segitiga	$[-0.3, 0.0, 0.3]$
4	<i>Slightly Hot</i>	Segitiga	$[0.1, 0.5, 1.0]$
5	<i>Too Hot</i>	Trapesium	$[0.6, 1.2, 2.0, 2.0]$

Pembagian himpunan *fuzzy* ini memungkinkan sistem untuk membedakan kondisi suhu yang sangat rendah, mendekati *setpoint*, hingga sangat tinggi secara bertahap. Bentuk dan domain fungsi keanggotaan *error* suhu ditunjukkan pada Gambar 3.8.



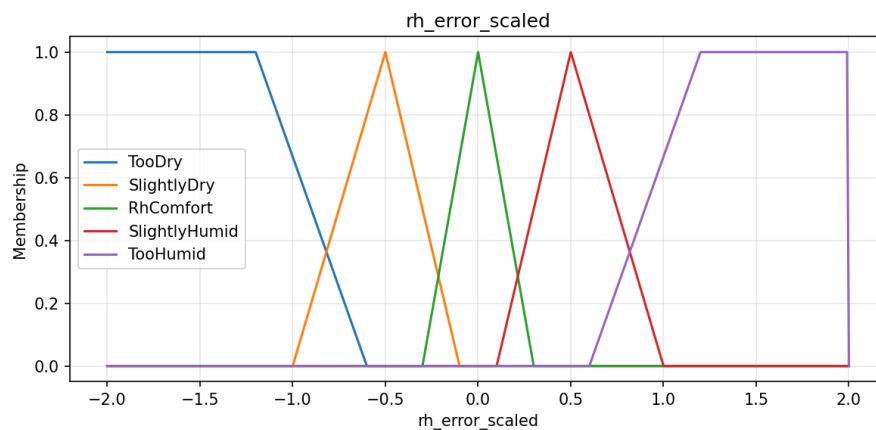
Gambar 3. 8 Fungsi Keanggotaan *Error* Suhu Internal

Variabel *error* kelembapan internal juga dibagi ke dalam lima himpunan *fuzzy*, yaitu *Too Dry*, *Slightly Dry*, *Rh Comfort*, *Slightly Humid*, dan *Too Humid*. Struktur himpunan *fuzzy* yang digunakan serupa dengan variabel *error* suhu internal, di mana kondisi ekstrem direpresentasikan menggunakan fungsi trapesium dan kondisi transisi direpresentasikan menggunakan fungsi segitiga. Himpunan *fuzzy error kelembapan internal* ditunjukkan pada Tabel 3.7.

Tabel 3. 7 Himpunan *Fuzzy* Kelembapan Internal

No	Himpunan Fuzzy	Jenis Fungsi Keanggotaan	Parameter Fungsi
1	<i>Too Dry</i>	Trapesium	$[-2.0, -2.0, -1.2, -0.6]$
2	<i>Slightly Dry</i>	Segitiga	$[-1.0, -0.5, -0.1]$
3	<i>Rh Comfort</i>	Segitiga	$[-0.3, 0.0, 0.3]$
4	<i>Slightly Humid</i>	Segitiga	$[0.1, 0.5, 1.0]$
5	<i>Too Humid</i>	Trapesium	$[0.6, 1.2, 2.0, 2.0]$

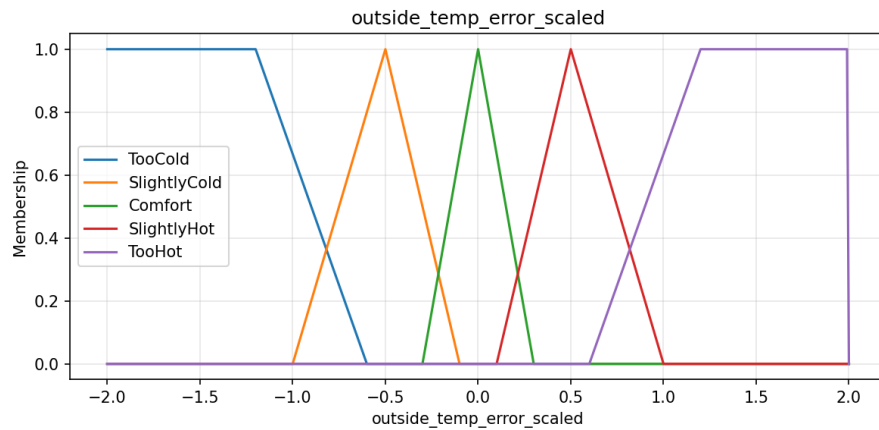
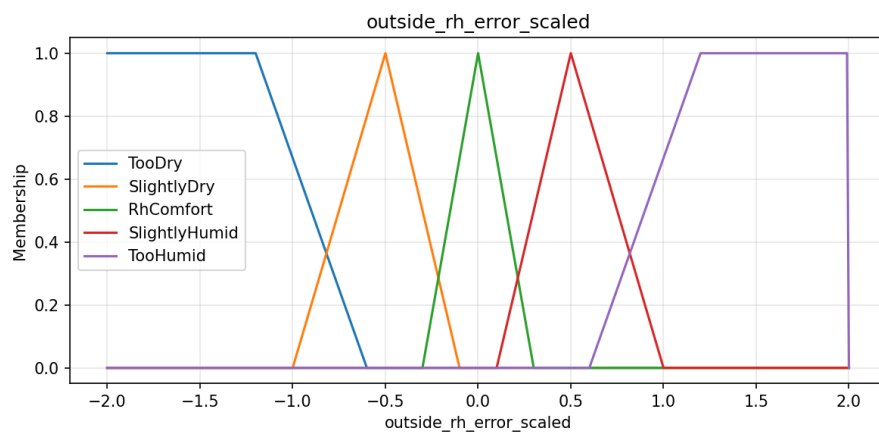
Pendekatan ini bertujuan untuk memberikan respon kendali yang lebih halus terhadap perubahan kelembapan udara di sekitar nilai *setpoint*, serta menghindari perubahan kendali yang bersifat mendadak. Bentuk fungsi keanggotaan *error* kelembapan internal ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Fungsi Keanggotaan *Error* Kelembapan Internal

Variabel *error* suhu eksternal dan *error* kelembapan eksternal dirancang menggunakan struktur himpunan *fuzzy* yang sama dengan variabel *error* suhu internal dan *error* kelembapan internal. Hal ini dilakukan untuk menjaga konsistensi skala dan interpretasi linguistik antara kondisi internal dan eksternal greenhouse.

Dengan menggunakan himpunan *fuzzy* yang seragam, sistem *fuzzy* dapat membandingkan kondisi lingkungan luar terhadap kondisi internal *greenhouse* secara langsung. Fungsi keanggotaan *error* suhu eksternal dan *error* kelembapan eksternal masing-masing ditunjukkan pada Gambar 3.10 dan Gambar 3.11.

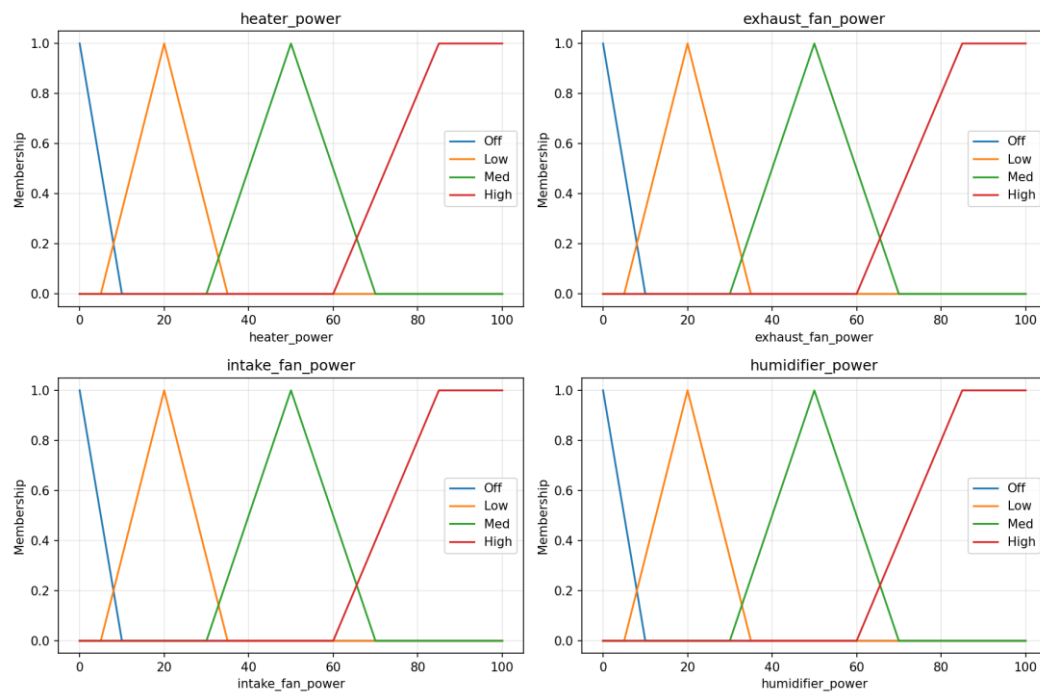
Gambar 3. 10 Fungsi Keanggotaan *Error* Suhu EksternalGambar 3. 11 Fungsi Keanggotaan *Error* Kelembapan Eksternal

Variabel *output* sistem *fuzzy* merepresentasikan intensitas kerja aktuator yang digunakan dalam sistem kendali greenhouse. Setiap variabel *output* dibagi ke dalam empat himpunan *fuzzy*, yaitu *Off*, *Low*, *Med*, dan *High*. Himpunan *Off* dan *High* direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan trapesium, sedangkan *Low* dan *Med* direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan segitiga. Himpunan *fuzzy output* ditunjukkan pada tabel 3.8.

Tabel 3. 8 Himpunan *Fuzzy Heater, Humidifier, Exhaust Fan, Intake Fan*

No	Himpunan Fuzzy	Jenis Fungsi Keanggotaan	Parameter Fungsi
1	<i>Off</i>	Trapesium	[0, 0, 0, 10]
2	<i>Low</i>	Segitiga	[5, 20, 35]
3	<i>Med</i>	Segitiga	[30, 50, 70]
4	<i>High</i>	Trapesium	[60, 85, 100, 100]

Domain variabel *output* berada pada rentang 0 hingga 100, yang merepresentasikan tingkat intensitas atau durasi aktif aktuator dalam satu siklus kendali. Pembagian himpunan *fuzzy output* ini memungkinkan sistem kendali untuk menghasilkan variasi tingkat respon aktuator secara bertahap. Bentuk fungsi keanggotaan variabel output ditunjukkan pada Gambar 3.12.

Gambar 3. 12 Fungsi Keanggotaan Intensitas *Heater*, Intensitas *Humidifier*, Intensitas Kipas *Exhaust*, Intensitas Kipas *Intake*

3.3.3 Basis Aturan *Fuzzy*

Basis aturan *fuzzy* pada penelitian ini disusun dalam bentuk aturan linguistik IF–THEN yang menghubungkan kondisi *error* suhu dan kelembapan dengan

respon kendali aktuator. Setiap aturan merepresentasikan pengetahuan heuristik dalam pengendalian lingkungan greenhouse dan dapat menghasilkan lebih dari satu keluaran aktuator secara simultan.

- R1. IF Temperature Error is Too Hot THEN Exhaust Fan is High AND Intake Fan is High AND Heater is Off AND Humidifier is High.*
- R2. IF Temperature Error is Slightly Hot AND RH Error is Too Dry OR Slightly Dry THEN Exhaust Fan is Med AND Intake Fan is Med AND Humidifier is Med AND Heater is Off.*
- R3. IF Temperature Error is Slightly Hot AND RH Error is Rh Comfort OR Slightly Humid OR Too Humid THEN Exhaust Fan is Med AND Intake Fan is Med AND Heater is Off AND Humidifier is Off.*
- R4. IF Temperature Error is Slightly Hot AND RH Error is Too Dry AND Outside Temp Error is Slightly Cold OR Too Cold THEN Exhaust Fan is Med AND Intake Fan is Med AND Humidifier is Low AND Heater is Off.*
- R5. IF Temperature Error is Comfort AND RH Error is Too Humid AND Outside RH Error is Too Dry OR Slightly Dry OR Rh Comfort THEN Exhaust Fan is Low AND Intake Fan is Low AND Humidifier is Off AND Heater is Off.*
- R6. IF Temperature Error is Comfort AND RH Error is Rh Comfort OR Slightly Humid THEN Heater is Off AND Exhaust Fan is Off AND Intake Fan is Off AND Humidifier is Off.*

- R7. IF *Temperature Error* is Comfort AND *RH Error* is Too Dry OR Slightly Dry THEN *Humidifier* is Low AND *Exhaust Fan* is Off AND *Intake Fan* is Off AND *Heater* is Off.
- R8. IF *Temperature Error* is Slightly Cold THEN *Heater* is Med AND *Exhaust Fan* is Off AND *Intake Fan* is Low AND *Humidifier* is Off.
- R9. IF *Temperature Error* is Too Cold THEN *Heater* is High AND *Exhaust Fan* is Off AND *Intake Fan* is Low AND *Humidifier* is Off.
- R10. IF *Temperature Error* is Slightly Cold OR Too Cold AND *Outside Temperature Error* is Slightly Hot OR Too Hot THEN *Intake Fan* is High.
- R11. IF *Temperature Error* is Comfort OR Slightly Hot AND *RH Error* is Too Humid THEN *Exhaust Fan* is Low AND *Intake Fan* is Low AND *Humidifier* is Off.

3.3.4 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan tahap akhir pada sistem *fuzzy mamdani* yang bertujuan untuk mengubah himpunan *fuzzy* keluaran hasil proses inferensi menjadi nilai tegas (*crisp output*). Nilai tegas ini selanjutnya digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan kendali pada sistem.

Pada penelitian ini, proses defuzzifikasi untuk seluruh variabel *output* dilakukan menggunakan metode *centroid*. Pemilihan metode *centroid* didasarkan pada kemampuannya dalam menghasilkan nilai keluaran yang halus dan proporsional terhadap perubahan kondisi masukan. Pendekatan ini sesuai untuk sistem kendali suhu dan kelembapan greenhouse yang memerlukan respon bertahap

dan stabil, serta membantu menghindari perubahan kendali yang bersifat mendadak.

Nilai hasil defuzzifikasi berada pada rentang 0 hingga 100 dan merepresentasikan tingkat intensitas kerja aktuator dalam satu siklus kendali. Nilai ini kemudian digunakan untuk menentukan durasi waktu aktif aktuator pada sistem kendali periodik yang dijalankan.

3.3.5 Mekanisme Eksekusi *Fuzzy* Periodik

Hasil akhir dari sistem *fuzzy mamdani* pada penelitian ini berupa nilai keluaran tegas (*crisp output*) dalam rentang 0 hingga 100 untuk setiap aktuator. Nilai tersebut merepresentasikan tingkat intensitas kendali, namun belum dapat digunakan secara langsung oleh perangkat aktuator di lapangan. Oleh karena itu, diperlukan suatu mekanisme translasi untuk mengubah nilai keluaran *fuzzy* menjadi perintah kendali yang dapat dieksekusi oleh sistem IoT.

Pada penelitian ini digunakan pendekatan kendali berbasis waktu (*duty cycle*), di mana setiap aktuator bekerja dalam satu siklus kendali dengan durasi tertentu. Satu siklus kendali pada penelitian ini ditetapkan selama 1.800 (30 menit). Lama waktu aktif aktuator dihitung secara proporsional terhadap nilai keluaran *fuzzy* yang dituliskan pada persamaan 3.2 berikut:

$$t_{on} = \frac{P_{fuzzy}}{100} \times T_{cycle} \quad (3.2)$$

Keterangan:

t_{on}	= durasi waktu aktif aktuator,
P_{fuzzy}	= nilai keluaran fuzzy (0–100),
T_{cycle}	= durasi satu siklus kendali.

Setiap perintah kendali yang dihasilkan dikemas dalam bentuk *payload* data yang memuat informasi status aktuator, durasi waktu aktif, durasi siklus kendali, serta nilai keluaran *fuzzy* yang dihasilkan. *Payload* ini kemudian dikirimkan melalui protokol komunikasi yang digunakan sistem IoT untuk dieksekusi oleh perangkat pengendali aktuator.

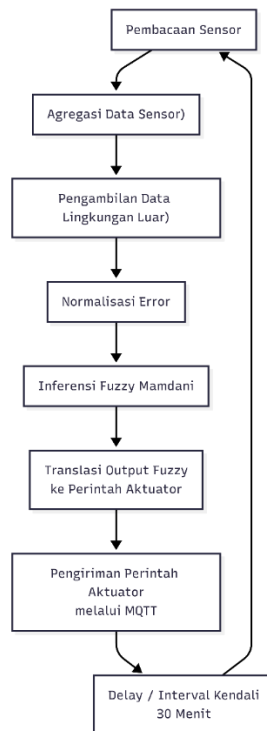
Tabel 3. 9 Tabel *Payload* Data

Nama Variabel	Keterangan
<i>topic</i>	Topik MQTT yang digunakan untuk mengirim perintah ke aktuator
<i>is on</i>	Menunjukkan status aktif atau tidaknya aktuator
<i>on seconds</i>	Durasi waktu aktif aktuator dalam satu siklus kendali (detik)
<i>cycle seconds</i>	Durasi satu siklus kendali
<i>fuzzy power</i>	Nilai keluaran fuzzy yang dihasilkan sistem

Berdasarkan Tabel 3.9, *payload* perintah aktuator dikirimkan ke perangkat pengendali aktuator melalui protokol MQTT, variabel *topic* digunakan sebagai penentu kanal komunikasi MQTT untuk masing-masing aktuator, sehingga perintah kendali dapat diteruskan secara tepat.

3.4 Mekanisme Sistem Kendali

Mekanisme sistem kendali pada penelitian ini bekerja secara periodik setiap 30 menit. Alur pengendalian sistem mengacu pada diagram blok mekanisme pengendalian suhu dan kelembapan yang ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3. 13 Diagram Blok Mekanisme Pengendalian Suhu dan Kelembapan

Proses dimulai dari pembacaan sensor, di mana sistem membaca data suhu dan kelembapan udara dari dua sensor SHT35 yang ditempatkan pada bagian atas dan bawah *greenhouse*. Data hasil pembacaan ini merepresentasikan kondisi lingkungan internal *greenhouse* pada waktu tertentu.

Selanjutnya, sistem melakukan agregasi data sensor dengan menghitung nilai rata-rata suhu dan kelembapan dari kedua sensor. Proses agregasi ini bertujuan untuk memperoleh nilai yang lebih representatif terhadap kondisi lingkungan secara keseluruhan serta mengurangi pengaruh fluktuasi lokal pada satu titik pengukuran.

Setelah proses agregasi, sistem melakukan pengambilan data lingkungan luar melalui layanan *Application Programming Interface* (API) OpenMeteo. Data

lingkungan luar ini digunakan sebagai informasi tambahan untuk membantu sistem dalam mengambil keputusan kendali yang lebih adaptif.

Tahap berikutnya adalah normalisasi *error*, yaitu proses perhitungan selisih antara nilai suhu dan kelembapan aktual dengan nilai *setpoint* yang telah ditentukan pada profil tanaman, di mana nilai *error* yang telah dinormalisasi tersebut selanjutnya diproses pada tahap inferensi *fuzzy mamdani*. Pada tahap ini, sistem mengevaluasi kondisi lingkungan berdasarkan basis aturan *fuzzy* yang telah dirancang untuk menentukan respon kendali yang paling sesuai terhadap kondisi suhu dan kelembapan yang terjadi.

Hasil inferensi *fuzzy* selanjutnya diterjemahkan pada tahap translasi *output fuzzy* menjadi perintah aktuator, di mana nilai keluaran *fuzzy* dalam rentang 0 hingga 100 dikonversi menjadi parameter kendali berupa durasi waktu aktif serta jumlah aktuator yang diaktifkan dalam satu siklus kendali. Perintah kendali yang telah dibentuk kemudian dikirimkan melalui protokol MQTT, dan setelah perintah diterima, sistem memasuki tahap eksekusi aktuator, di mana aktuator seperti *heater*, kipas *exhaust*, kipas *intake*, dan *humidifier* beroperasi sesuai dengan perintah kendali yang diberikan.

Setelah seluruh aktuator dieksekusi, sistem memasuki tahap *delay* atau interval kendali selama 30 menit. Interval ini digunakan sebagai jeda sebelum sistem kembali melakukan pembacaan sensor dan mengulangi seluruh mekanisme kendali pada siklus berikutnya.

3.5 Skenario Pengujian Sistem

Skenario pengujian sistem disusun untuk mengevaluasi kinerja dan fungsionalitas sistem kendali suhu dan kelembapan *greenhouse* yang telah dirancang dan diimplementasikan. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa setiap komponen sistem, baik perangkat keras maupun perangkat lunak, dapat bekerja sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Selain itu, pengujian juga bertujuan untuk menilai tingkat akurasi sensor yang digunakan sebagai sumber data masukan, serta mengevaluasi kemampuan sistem dalam melakukan *monitoring* dan pengendalian kondisi lingkungan *greenhouse* secara otomatis. Melalui serangkaian pengujian yang dilakukan, diharapkan dapat diperoleh gambaran mengenai tingkat keandalan sistem dalam mendukung pengendalian suhu dan kelembapan *greenhouse* sesuai kebutuhan tanaman yang dibudidayakan.

3.5.1 Pengujian Kalibrasi Sensor

Pengujian kalibrasi sensor dilakukan untuk mengevaluasi tingkat keakuratan pembacaan sensor suhu dan kelembapan SHT35 yang digunakan pada sistem. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan nilai pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi berupa Termometer Hygrometer yang telah terkalibrasi. Parameter yang diuji meliputi suhu udara ($^{\circ}\text{C}$) dan kelembapan relatif (%RH).

Proses pengujian dilakukan dengan mencatat nilai pembacaan sensor dan nilai pembacaan alat referensi secara bersamaan pada beberapa waktu pengukuran. Data hasil pengukuran kemudian dianalisis untuk mengetahui tingkat kesalahan pengukuran sensor terhadap nilai referensi.

Analisa tingkat akurasi sensor menggunakan perhitungan standar deviasi sampel dan standar error. Standar error digunakan untuk mengetahui tingkat penyimpangan hasil pengukuran sensor terhadap nilai rata-rata data pengukuran. Semakin kecil nilai standar error, maka semakin baik tingkat keakuratan sensor. Standar deviasi sampel dihitung menggunakan persamaan 3.3 berikut (Wijaya et al., 2025):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.3)$$

keterangan:

s	= standar deviasi sampel.
x_i	= data ke-i.
$\bar{x}$	= data rata-rata.
n	= jumlah data.

Nilai standar error dihitung menggunakan persamaan 3.4 berikut (Wijaya et al., 2025):

$$SE = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.4)$$

keterangan:

SE	= standar error.
s	= standar deviasi sampel.
n	= ukuran sampel.

3.5.2 Pengujian *Black Box*

Pengujian *black box* dilakukan untuk mengevaluasi fungsi sistem kendali suhu dan kelembapan greenhouse secara keseluruhan tanpa memperhatikan proses internal yang terjadi di dalam sistem. Pengujian ini berfokus pada perilaku sistem berdasarkan hubungan antara kondisi lingkungan yang terjadi dan respon yang dihasilkan oleh sistem kendali. Melalui pengujian ini, sistem dijalankan secara

periodik sesuai mekanisme kendali yang telah dirancang, yaitu dengan interval kendali setiap 30 menit serta menggunakan profil tanaman yang telah ditentukan.

Pengujian *black box* juga mengevaluasi respon aktuator terhadap perubahan kondisi lingkungan, pengujian ini juga bertujuan untuk memastikan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan suhu dan kelembapan udara di dalam greenhouse mendekati nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Pengujian juga mencakup aspek sistem IoT, seperti konsistensi interval kendali, sinkronisasi data monitoring pada aplikasi web, serta kemampuan sistem dalam memperbarui parameter kendali ketika terjadi pergantian profil tanaman. Dengan demikian, pengujian *black box* ini dapat memberikan gambaran mengenai kinerja sistem secara menyeluruh. Rincian parameter pengujian yang diamati ditunjukkan pada Tabel 3.10.

Tabel 3. 10 Tabel Parameter Pengujian *Black Box*

No	Parameter yang Diamati	Deskripsi	Tujuan Pengamatan
1	Suhu udara internal	Perubahan nilai suhu udara di dalam greenhouse antar siklus kendali	Menilai kestabilan suhu terhadap <i>setpoint</i>
2	Kelembapan udara internal	Perubahan nilai kelembapan udara antar siklus kendali	Menilai kestabilan kelembapan terhadap <i>setpoint</i>
3	Status aktuator	Perubahan status kerja <i>heater</i> , <i>exhaust fan</i> , <i>intake fan</i> , dan <i>humidifier</i> pada setiap siklus kendali	Mengamati respon sistem terhadap kondisi lingkungan
4	Interval kendali	Jarak waktu antar siklus kendali	Memastikan sistem bekerja periodik
5	Sinkronisasi data monitoring	Kesesuaian data suhu, kelembapan, dan status aktuator yang ditampilkan pada <i>web application</i> .	Memastikan data monitoring pada <i>web application</i> diperbarui dan ditampilkan secara benar sesuai kondisi sistem
6	Pergantian profil tanaman	Proses perubahan profil tanaman melalui <i>web application</i> yang menyebabkan pembaruan parameter <i>setpoint</i> suhu dan kelembapan pada sistem kendali	Memastikan sistem dapat memperbarui parameter kendali sesuai profil tanaman yang dipilih

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Implementasi Sistem

Tahap implementasi sistem dilakukan sebagai proses penerapan hasil perancangan ke dalam bentuk sistem yang dapat dioperasikan secara nyata. Pada penelitian ini, implementasi mencakup pembangunan perangkat keras *greenhouse*, pengembangan sistem *backend* dan *web application*, integrasi komunikasi data berbasis MQTT, serta penerapan metode *fuzzy mamdani* sebagai mekanisme pengambilan keputusan kendali. Seluruh komponen sistem diintegrasikan untuk membentuk sebuah sistem kendali suhu dan kelembapan *greenhouse* yang mampu melakukan *monitoring* dan pengendalian suhu serta kelembapan secara otomatis sesuai dengan profil tanaman yang digunakan.

4.1.1 Implementasi Perangkat Keras

Pada konfigurasi *learning rate* 0,001, hasil pelatihan model *Lightweight U-Net* pada Gambar 4.1 menunjukkan proses pembelajaran yang stabil dan konvergen. Pada Gambar 4.1(a) *Epoch* 100, *training accuracy* meningkat pesat di awal epoch dan mendekati nilai maksimum, sementara *validation accuracy* meningkat signifikan sebelum mencapai kondisi stabil. Training loss menurun tajam di awal pelatihan, diikuti penurunan *validation loss* secara bertahap hingga relatif stabil. Pola ini menunjukkan bahwa model mampu mempelajari fitur segmentasi tumor dengan baik dan memiliki kemampuan generalisasi yang memadai.

Implementasi perangkat keras pada penelitian ini dilakukan untuk membangun sistem pengendalian suhu dan kelembapan *greenhouse* secara otomatis. Sistem perangkat keras terdiri dari ESP32 sebagai mikrokontroler utama, sensor SHT35 sebagai pembaca suhu dan kelembapan udara, serta beberapa aktuator berupa *heater*, *humidifier*, *exhaust fan*, dan *intake fan*.

Sensor SHT35 digunakan untuk memperoleh data suhu dan kelembapan udara di dalam *greenhouse* secara berkala. Data sensor tersebut kemudian dikirimkan ke sistem *backend* untuk diproses menggunakan metode *fuzzy mamdani* sehingga sistem dapat menentukan nilai keluaran aktuator berdasarkan kondisi lingkungan yang terdeteksi.

Implementasi sensor SHT35 pada sistem *greenhouse* ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Implementasi Sensor SHT35 Bawah dan Atas

Sistem aktuator terdiri dari *heater* yang berfungsi meningkatkan suhu udara, *humidifier* untuk menambah kelembapan udara, *exhaust fan* untuk mengeluarkan udara panas dari *greenhouse*, serta *intake fan* yang digunakan untuk memasukkan

udara dari luar greenhouse. Seluruh aktuator dikendalikan berdasarkan hasil inferensi *fuzzy mamdani* dalam bentuk nilai *duty cycle* pada masing-masing perangkat.

Heater diletakkan pada sisi bawah tanaman di greenhouse dengan tujuan agar udara panas akan bergerak ke atas sehingga penyebaran panasnya lebih merata. Implementasi aktuator Heater ditunjukkan pada Gambar 4.2



Gambar 4. 2 Implementasi Aktuator *Heater*

Penempatan aktuator *intake fan* berada di sisi bawah dan berseberangan dengan *exhaust fan*, peletakan ini bertujuan untuk menciptakan ventilasi silang dan memiliki aliran udara yang baik, kemudian aktuator *humidifier* diletakkan pada bagian atas dengan tujuan penyebaran udara dingin nya merata dari atas sampai bawah. Implementasi aktuator *intake fan* dan *humidifier* ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Implementasi Aktuator *Intake Fan* dan *Humidifier*

Penempatan aktuator exhaust fan berada di sisi atas dan berseberangan dengan intake fan, peletakan ini bertujuan untuk menciptakan ventilasi silang dan memiliki aliran udara yang baik. Implementasi aktuator exhaust fan ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Implementasi Aktuator *Exhaust Fan*

4.1.2 Implementasi Sistem dan *Web Application*

Implementasi sistem dilakukan dengan mengintegrasikan komunikasi data antara ESP32, sistem *backend*, MQTT, *web monitoring*, dan sistem *streaming* CCTV berbasis IoT. Seluruh perangkat dalam *greenhouse* terhubung melalui

jaringan intranet yang terhubung menggunakan *access point*. Jaringan lokal tersebut kemudian dihubungkan ke internet menggunakan layanan *tunneling* Cloudflare sehingga sistem dapat diakses secara jarak jauh. Terdapat dua layanan utama yang ditunnelkan melalui Cloudflare, yaitu layanan *frontend* berupa *web monitoring* dan layanan *backend* berupa API yang digunakan untuk komunikasi data serta pengendalian sistem.

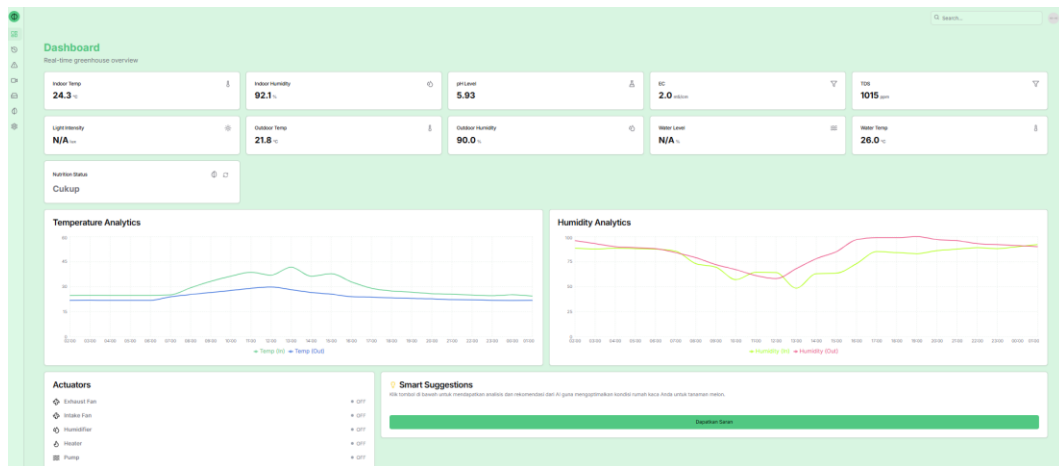
ESP32 bertugas membaca data suhu dan kelembapan dari sensor SHT35 secara berkala, kemudian mengirimkan data hasil pembacaan menuju sistem backend untuk diproses menggunakan metode *fuzzy mamdani*. Komunikasi antara perangkat IoT dan *server* dilakukan menggunakan protokol MQTT sehingga pertukaran data sensor dan perintah aktuator dapat berlangsung secara real-time.

Sistem backend dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Python dan terhubung dengan *database* PostgreSQL untuk penyimpanan data historis. Sistem *backend* bertanggung jawab dalam melakukan agregasi data sensor, pengambilan data cuaca eksternal dari API Open-Meteo, proses normalisasi *error*, inferensi *fuzzy mamdani*, serta pengiriman perintah aktuator melalui MQTT.

Sistem juga terhubung dengan *web monitoring* yang digunakan sebagai media pemantauan kondisi *greenhouse* secara *real time*. Data suhu, kelembapan, kondisi cuaca eksternal, serta status aktuator dikirimkan menuju *server* dan ditampilkan pada halaman *dashboard* sehingga pengguna dapat memantau kondisi *greenhouse* dari jarak jauh melalui jaringan internet.

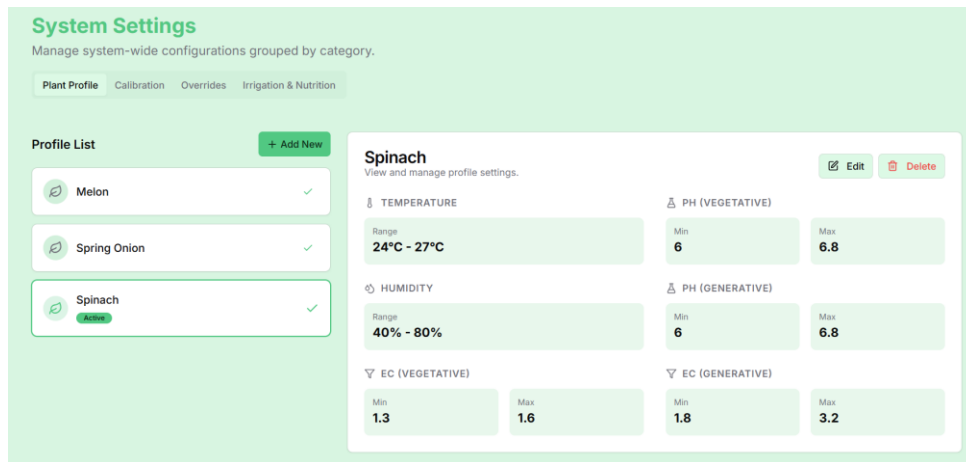
Selain sistem *monitoring*, *greenhouse* juga dilengkapi dengan kamera CCTV untuk melakukan pengawasan visual kondisi lingkungan dan tanaman.

Streaming video dari CCTV dikirim menggunakan protokol RTSP dan dikelola oleh perangkat lunak MediaMTX. MediaMTX berfungsi sebagai jembatan antara kamera CCTV dan aplikasi web dengan mengonversi serta mendistribusikan aliran video agar dapat diakses melalui *web application*. Selain itu, MediaMTX juga digunakan untuk mengelola proses perekaman dan penyimpanan cadangan video CCTV sehingga rekaman kondisi *greenhouse* dapat didokumentasikan dan dianalisis kembali apabila diperlukan. Implementasi halaman *dashboard monitoring* ditunjukkan pada gambar 4.5.



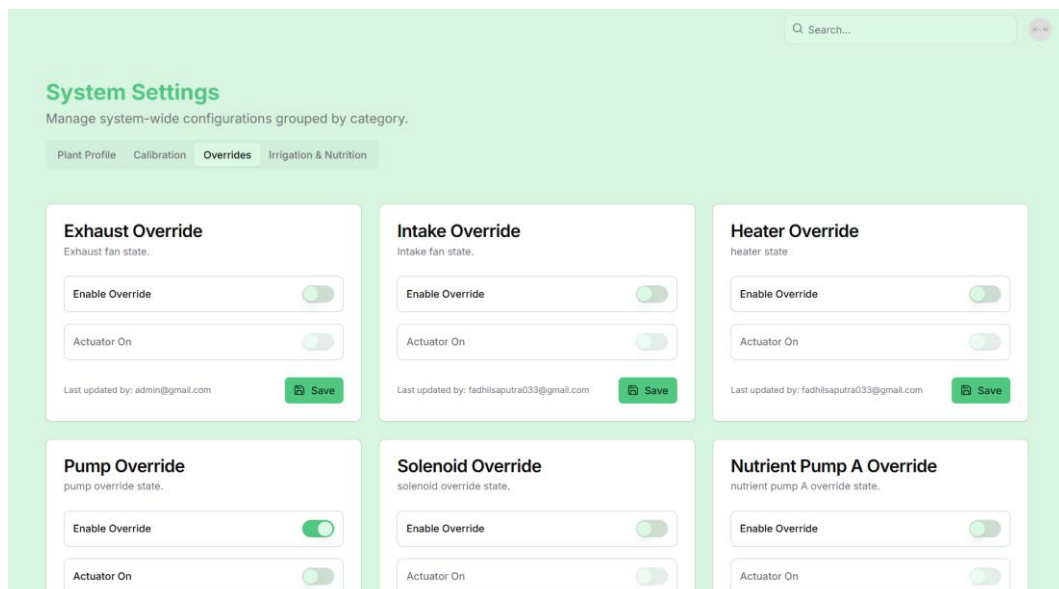
Gambar 4. 5 Halaman *Dashboard Monitoring*

Web application juga menyediakan fitur pengaturan profil tanaman yang digunakan untuk menentukan profil tanaman serta parameter suhu dan kelembapan optimal sesuai kebutuhan tanaman. Profil tanaman yang dipilih pengguna akan digunakan sistem sebagai acuan dalam proses pengendalian otomatis menggunakan *fuzzy mamdani*. Implementasi halaman pengaturan profil tanaman ditunjukkan pada gambar 4.6.



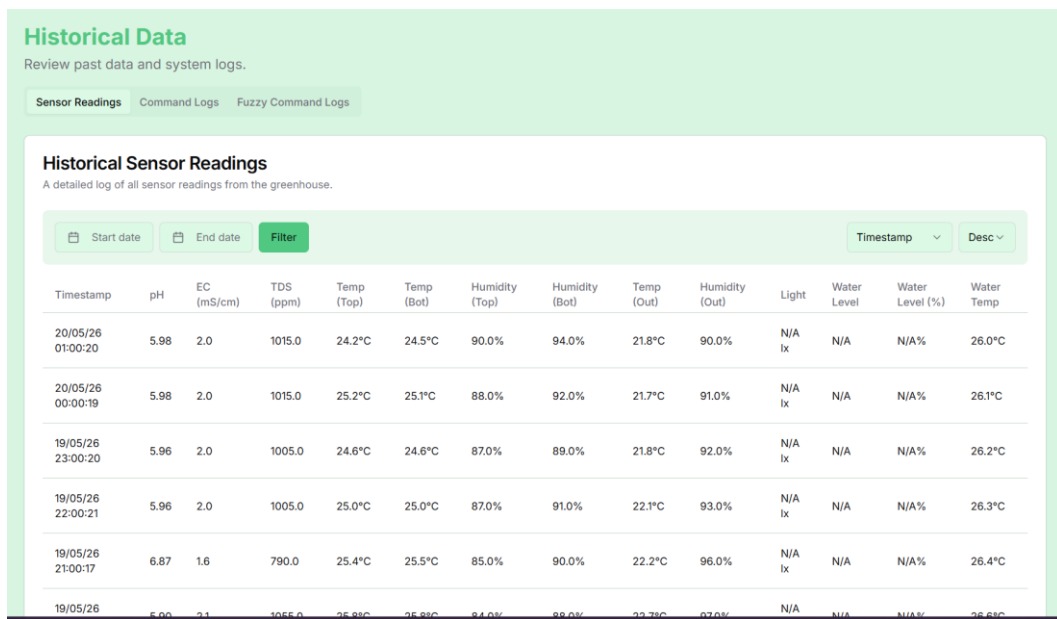
Gambar 4. 6 Halaman Pengaturan Profil Tanaman

Sistem juga menyediakan halaman *52ctuato* manual *52ctuator* yang memungkinkan pengguna melakukan *override* terhadap sistem otomatis. Melalui halaman ini, pengguna dapat mengaktifkan *heater*, *humidifier*, *exhaust fan*, maupun *intake fan* secara manual. Implementasi halaman *52ctuato* manual *52ctuator* ditunjukkan pada gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Halaman Kontrol Manual Aktuator

Selain fitur *monitoring* dan konfigurasi, sistem juga menyediakan halaman riwayat *monitoring* yang digunakan untuk menyimpan data pembacaan sensor dan aktivitas aktuator, dan respon *fuzzy* ke dalam *database*. Data historis tersebut dapat dimanfaatkan untuk proses analisis, evaluasi sistem, dan pengujian performa kendali *greenhouse*. Implementasi halaman riwayat monitoring ditunjukkan pada gambar 4.8.



Historical Data
Review past data and system logs.

Sensor Readings Command Logs Fuzzy Command Logs

Historical Sensor Readings
A detailed log of all sensor readings from the greenhouse.

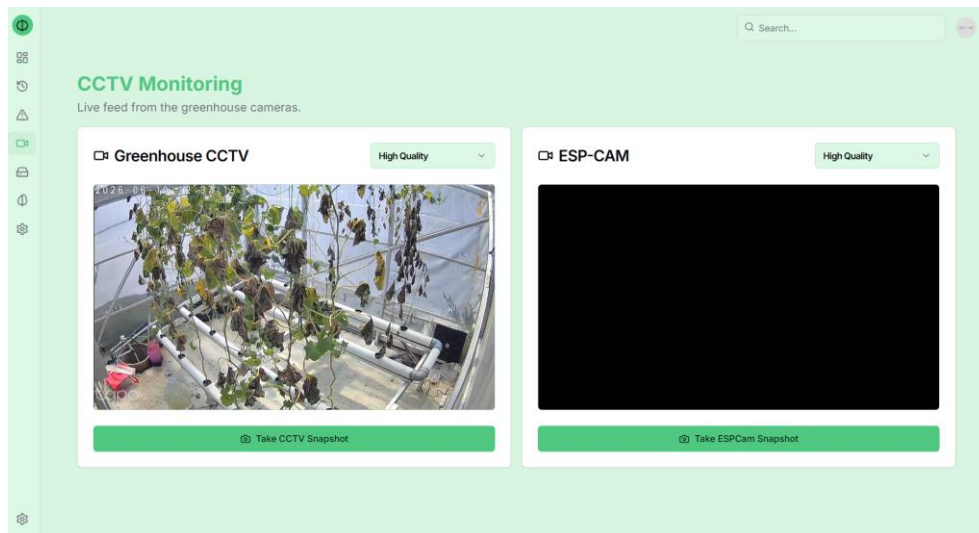
Start date End date Filter Timestamp Desc

Timestamp	pH	EC (mS/cm)	TDS (ppm)	Temp (Top)	Temp (Bot)	Humidity (Top)	Humidity (Bot)	Temp (Out)	Humidity (Out)	Light	Water Level	Water Level (%)	Water Temp
20/05/26 01:00:20	5.98	2.0	1015.0	24.2°C	24.5°C	90.0%	94.0%	21.8°C	90.0%	N/A lx	N/A	N/A%	26.0°C
20/05/26 00:00:19	5.98	2.0	1015.0	25.2°C	25.1°C	88.0%	92.0%	21.7°C	91.0%	N/A lx	N/A	N/A%	26.1°C
19/05/26 23:00:20	5.96	2.0	1005.0	24.6°C	24.6°C	87.0%	89.0%	21.8°C	92.0%	N/A lx	N/A	N/A%	26.2°C
19/05/26 22:00:21	5.96	2.0	1005.0	25.0°C	25.0°C	87.0%	91.0%	22.1°C	93.0%	N/A lx	N/A	N/A%	26.3°C
19/05/26 21:00:17	6.87	1.6	790.0	25.4°C	25.5°C	85.0%	90.0%	22.2°C	96.0%	N/A lx	N/A	N/A%	26.4°C
19/05/26	5.99	2.1	1055.0	25.8°C	25.8°C	84.0%	88.0%	22.7°C	97.0%	N/A	N/A	N/A%	26.6°C

Gambar 4. 8 Halaman Riwayat Monitoring

Sistem juga menyediakan halaman CCTV yang digunakan untuk memantau kondisi greenhouse secara visual secara *real time*. Halaman ini menampilkan *streaming* video yang berasal dari kamera CCTV yang terpasang di dalam *greenhouse* sehingga pengguna dapat mengamati kondisi tanaman, aktuator, serta lingkungan *greenhouse* secara langsung dari jarak jauh. *Streaming video* dikelola menggunakan MediaMTX yang berfungsi sebagai penghubung antara kamera CCTV dan aplikasi web melalui protokol RTSP. Selain menyediakan layanan

streaming, MediaMTX juga digunakan untuk melakukan perekaman dan penyimpanan cadangan video secara otomatis sehingga aktivitas di dalam *greenhouse* dapat didokumentasikan untuk keperluan monitoring dan evaluasi. Implementasi halaman CCTV ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Halaman CCTV

4.1.3 Implementasi Sistem *Fuzzy*

Pada konfigurasi *learning rate* 0,00001, hasil pelatihan model *Lightweight* U-Net pada Gambar 4.3 menunjukkan proses pembelajaran yang berlangsung lebih lambat dibandingkan skenario sebelumnya. Pada Gambar 4.3(a) *Epoch* 100, kurva *training accuracy* meningkat secara bertahap dari *epoch* awal hingga mencapai nilai yang cukup tinggi, sedangkan *validation accuracy* juga mengalami peningkatan namun masih terlihat fluktuasi pada beberapa titik. Grafik *loss* pada Gambar 4.3(a) menunjukkan penurunan *training loss* yang relatif lebih lambat dan disertai fluktuasi yang cukup besar, sementara *validation loss* menurun secara perlahan menuju nilai yang lebih stabil. Pola ini menunjukkan bahwa model masih

berada pada tahap penyesuaian parameter dan proses pembelajaran belum sepenuhnya mencapai kondisi optimal.

Implementasi sistem kendali *fuzzy* pada penelitian ini dijalankan pada sisi *backend* yang dikembangkan menggunakan *framework* FastAPI. Sistem dirancang untuk bekerja secara periodik dengan interval eksekusi setiap 30 menit, sesuai dengan mekanisme kendali berbasis *duty cycle* yang telah ditetapkan. Data lingkungan internal *greenhouse* diperoleh secara *real time* melalui protokol MQTT, di mana sensor SHT35 mengirimkan pembacaan suhu dan kelembapan setiap 10 detik sekali. Data ini diperbarui secara kontinu dan di agregasi menggunakan perhitungan rata-rata dari sensor bagian atas dan bawah sebelum diproses pada siklus kendali berikutnya. Pada saat proses inferensi *fuzzy* akan dijalankan, sistem secara otomatis mengambil data kondisi lingkungan eksternal melalui API OpenMeteo.

Setelah seluruh data input terkumpul, sistem melakukan normalisasi *error* berdasarkan rentang *setpoint* yang telah ditentukan pada profil tanaman yang aktif. Nilai *error* yang telah dinormalisasi kemudian dipetakan ke dalam himpunan fuzzy dan diproses menggunakan mesin inferensi *fuzzy mamdani* yang mengacu pada basis aturan linguistik yang telah dirancang. Hasil defuzzifikasi selanjutnya ditranslasikan menjadi parameter perintah kendali dan dikirimkan kembali ke mikrokontroler melalui topik MQTT yang sesuai untuk dieksekusi secara fisik oleh aktuator.

Untuk memastikan bahwa logika kendali *fuzzy* berjalan sesuai dengan rancangan aturan dan mampu memberikan respon yang adaptif terhadap berbagai

kondisi lingkungan, dilakukan pengujian basis aturan *fuzzy* menggunakan sebelas skenario kondisi yang merepresentasikan variasi ekstrem, optimal, dan transisional. Pengujian ini dijalankan pada tiga profil tanaman yang berbeda, yaitu bawang daun, bayam, dan melon, guna memverifikasi fleksibilitas sistem dalam menyesuaikan keluaran berdasarkan *setpoint* masing-masing tanaman. Skenario pengujian yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Skenario Pengujian Basis Aturan *Fuzzy*

Kode Skenario	Skenario
Sk-1	Kondisi Suhu Sedikit Rendah dan Kelembapan Optimal
Sk-2	Kondisi Suhu Optimal dan Kelembapan Optimal
Sk-3	Kondisi Suhu Rendah di Dalam Ruang, Suhu Luar Sangat Hangat
Sk-4	Kondisi Suhu Rendah di Dalam Ruang, Suhu Luar Lebih Dingin
Sk-5	Kondisi Suhu Sangat Tinggi dan Kelembapan Optimal
Sk-6	Kondisi Suhu Sedikit Tinggi dan Udara Sedikit Kering
Sk-7	Kondisi Suhu Sedikit Tinggi dan Kelembapan Sedikit Tinggi
Sk-8	Kondisi Suhu Optimal dan Kelembapan Sangat Tinggi
Sk-9	Kondisi Suhu Sangat Rendah di Dalam, Suhu Luar Lebih Hangat
Sk-10	Kondisi Suhu Optimal dan Udara Sangat Kering
Sk-11	Kondisi Suhu Sangat Rendah dan Kelembapan Optimal

Hasil pengujian basis aturan *fuzzy* untuk profil tanaman bawang daun ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Basis Aturan *Fuzzy* Tanaman Bawang Daun

Kode Skenario	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
Sk-1	17,5	85	24	70	heater: 899 detik kipas exhaust: mati kipas intake: 359 detik humidifier: mati
Sk-2	21,5	85	27	65	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati
Sk-3	16,5	85	28,5	85	heater: 900 detik kipas exhaust: mati kipas intake: 959 detik humidifier: mati
Sk-4	16,5	85	15	85	heater: 900 detik kipas exhaust: mati

Kode Skenario	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
					kipas intake: 360 detik humidifier: mati
Sk-5	30	85	38	70	heater: mati kipas exhaust: 1535 detik kipas intake: 1535 detik humidifier: 1535 detik
Sk-6	26,5	77	22	45	heater: mati kipas exhaust: 900 detik kipas intake: 900 detik humidifier: 899 detik
Sk-7	25,5	92	28	55	heater: mati kipas exhaust: 899 detik kipas intake: 899 detik humidifier: mati
Sk-8	21,5	93	26	55	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati
Sk-9	16,5	85	34	60	heater: 900 detik kipas exhaust: mati kipas intake: 1120 detik humidifier: mati
Sk-10	21,5	77	26	60	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: 359 detik
Sk-11	13	85	24	70	heater: 1535 detik kipas exhaust: mati kipas intake: 360 detik humidifier: mati

Berdasarkan hasil pengujian pada profil tanaman bawang daun, sistem *fuzzy* mampu menyesuaikan keluaran aktuator berdasarkan kondisi lingkungan *greenhouse*. Sistem mampu mengaktifkan aktuator yang sesuai berdasarkan suhu dan kelembapan yang terjadi pada setiap skenario pengujian.

Hasil pengujian basis aturan *fuzzy* untuk profil tanaman bayam ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Basis Aturan *Fuzzy* Tanaman Bayam

Kode Skenario	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
Sk-5	30,6	60	38	70	heater: mati kipas exhaust: 1535 detik kipas intake: 1535 detik humidifier: 1535 detik
Sk-6	28,5	28	22	45	heater: mati kipas exhaust: 900 detik kipas intake: 900 detik humidifier: 899 detik
Sk-8	25,5	92	26	55	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati
Sk-10	25,5	28	26	60	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: 359 detik
Sk-1	23,1	60	24	70	heater: 899 detik kipas exhaust: mati kipas intake: 359 detik humidifier: mati
Sk-2	25,5	60	27	65	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati
Sk-11	20,4	60	24	70	heater: 1535 detik kipas exhaust: mati kipas intake: 360 detik humidifier: mati
Sk-9	22,5	60	34	60	heater: 900 +117detik kipas exhaust: mati kipas intake: 1120 detik humidifier: mati
Sk-7	27,9	88	28	55	heater: mati kipas exhaust: 899 detik kipas intake: 899 detik humidifier: mati
Sk-4	22,5	60	21,6	60	heater: 900 detik kipas exhaust: mati kipas intake: 360 detik humidifier: mati

Kode Skenario	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
Sk-3	22,5	60	29,7	60	heater: 900 detik kipas exhaust: mati kipas intake: 959 detik humidifier: mati

Berdasarkan hasil pengujian pada profil tanaman bayam, sistem *fuzzy mamdani* menunjukkan kemampuan dalam menjaga kondisi lingkungan *greenhouse* sesuai kebutuhan tanaman. Sistem mampu mengaktifkan aktuator yang sesuai berdasarkan suhu dan kelembapan yang terjadi pada setiap skenario pengujian.

Hasil pengujian basis aturan *fuzzy* untuk profil tanaman melon ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Basis Aturan Fuzzy Tanaman Melon

Kode Skenario	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
Sk-1	23,5	70	24	70	heater: 899 detik kipas exhaust: mati kipas intake: 359 detik humidifier: mati
Sk-10	27,5	54	26	60	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: 359 detik
Sk-11	19	70	24	70	heater: 1535 detik kipas exhaust: mati kipas intake: 360 detik humidifier: mati
Sk-8	27,5	86	26	55	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati
Sk-9	22,5	70	34	60	heater: 900 detik kipas exhaust: mati kipas intake: 902 detik humidifier: mati
Sk-6	32,5	54	22	45	heater: mati kipas exhaust: 900 detik kipas intake: 900 detik humidifier: 899 detik

Kode Skenario	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
Sk-7	31,5	84	28	55	heater: mati kipas exhaust: 899 detik kipas intake: 899 detik humidifier: mati
Sk-5	36	70	38	70	heater: mati kipas exhaust: 1535 detik kipas intake: 1535 detik humidifier: 1535 detik
Sk-2	27,5	70	27	65	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati
Sk-4	22,5	70	21	70	heater: 900 detik kipas exhaust: mati kipas intake: 360 detik humidifier: mati
Sk-3	22,5	70	34,5	70	heater: 900 detik kipas exhaust: mati kipas intake: 959 detik humidifier: mati

Berdasarkan hasil pengujian pada profil tanaman melon, sistem *fuzzy mamdani* menunjukkan kemampuan dalam menjaga kondisi lingkungan *greenhouse* sesuai kebutuhan tanaman. Sistem mampu mengaktifkan aktuator yang sesuai berdasarkan suhu dan kelembapan yang terjadi pada setiap skenario pengujian.

4.2 Hasil *Testing* Setiap Skenario

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dan fungsionalitas sistem kendali suhu dan kelembapan *greenhouse* yang telah diimplementasikan. Tahap pengujian bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh komponen sistem, baik perangkat keras, perangkat lunak, maupun mekanisme kendali *fuzzy mamdani*, dapat bekerja sesuai dengan rancangan yang telah ditetapkan. Selain itu, pengujian juga dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi sensor sebagai sumber data

masuk ke sistem serta mengevaluasi kemampuan sistem dalam menjaga kondisi lingkungan *greenhouse* agar tetap berada pada rentang yang sesuai dengan kebutuhan tanaman. Pada penelitian ini, pengujian sistem meliputi pengujian kalibrasi sensor untuk menilai akurasi pengukuran suhu dan kelembapan, serta pengujian *black box* untuk mengevaluasi performa sistem kendali secara keseluruhan berdasarkan respon yang dihasilkan terhadap berbagai kondisi lingkungan.

4.2.1 Pengujian Kalibrasi Sensor

Proses pengujian dilakukan dengan mencatat nilai pembacaan sensor dan nilai pembacaan alat referensi secara bersamaan pada beberapa waktu pengukuran. Data hasil pengukuran kemudian dianalisis untuk mengetahui tingkat kesalahan pengukuran sensor terhadap nilai referensi.

Analisa tingkat akurasi sensor menggunakan perhitungan standar deviasi sampel pada persamaan 3.3 dan standar *error* pada persamaan 3.4. Standar *error* digunakan untuk mengetahui tingkat penyimpangan hasil pengukuran sensor terhadap nilai rata-rata data pengukuran. Semakin kecil nilai standar *error*, maka semakin baik tingkat keakuratan sensor.

Berdasarkan hasil pengujian, Berdasarkan hasil pengujian, sensor SHT35 suhu, nilai standar *error* relatif rendah dengan nilai standar *error* terbesar hanya sebesar 1,45. Nilai standar *error* yang dihasilkan menunjukkan bahwa pembacaan sensor relatif stabil dan memiliki penyimpangan yang kecil terhadap nilai rata-rata pengukuran, hasil pengujian ditunjukkan pada tabel 4.5 dan 4.6.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Kalibrasi Sensor Suhu SHT35 Bawah

No	Sensor SHT35 (°C)	alat Referensi (°C)	Selisih	Error (%)
1	34,4	35,8	1,4	3,91
2	32,8	32,0	0,8	2,50
3	32,0	30,0	2,0	6,67
4	30,3	29,8	0,5	1,68
5	29,5	29,5	0	0
Standar Deviasi	2,52			
Standar Error	1,13			

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Kalibrasi Sensor Suhu SHT35 Atas

No	Sensor SHT35 (°C)	alat Referensi (°C)	Selisih	Error (%)
1	27,0	25,0	2,0	8,00
2	26,2	25,0	1,2	4,80
3	24,7	24, 7	0	0
4	24,5	24, 3	0,2	0,82
5	24,5	24, 0	0,5	2,08
Standar Deviasi	3,25			
Standar Error	1,45			

Berdasarkan hasil pengujian, sensor SHT35 suhu, nilai standar *error* relatif rendah dengan nilai standar *error* terbesar hanya sebesar 0,98. Nilai standar *error* yang dihasilkan menunjukkan bahwa pembacaan sensor relatif stabil dan memiliki penyimpangan yang kecil terhadap nilai rata-rata pengukuran, hasil pengujian ditunjukkan pada tabel 4.7 dan 4.8.

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Sensor Kelembapan SHT35 Bawah

No	Sensor SHT35 (%RH)	Alat Referensi (%RH)	Selisih	Error (%)
1	53	52	1	1,92
2	55	54	1	1,85
3	60	57	3	5,26
4	65	65	0	0
5	67	67	0	0
Standar Deviasi	2,20			
Standar Error	0,98			

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Sensor Kelembapan SHT35 Bawah

No	Sensor SHT35 (%RH)	Alat Referensi (%RH)	Selisih	Error (%)
1	77	77	0	0
2	79	79	0	0
3	80	81	1	1,23
4	83	82	1	1,22

5	85	85	0	0
Standar Deviasi	0,67			
Standar Error	0,30			

4.2.2 Pengujian Black Box

Pengujian *black box* dilakukan untuk mengevaluasi fungsionalitas sistem kendali suhu dan kelembapan *greenhouse* secara keseluruhan dengan mengamati hubungan antara kondisi lingkungan *input* dan respon aktuator *output*, tanpa memperhatikan proses internal algoritma. Pengujian ini menggunakan tiga profil tanaman dengan dua skenario kondisi yaitu kondisi nyaman dengan suhu dan kelembapan dalam rentang optimal dan kondisi di atas rentang dengan suhu panas melebihi batas rentang. Hasil pengujian black box untuk profil tanaman bayam dengan skenario kondisi suhu panas ditunjukkan pada tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian *Black Box* Profil Tanaman Bayam Dengan Skenario Suhu Panas

Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
09/06/26 15:14:03	35.91	54.48	25.9	66	heater: mati kipas exhaust: 1535 detik kipas intake: 1535 detik humidifier: 1535 detik
09/06/26 15:44:03	31.73	56.4	25.6	66	heater: mati kipas exhaust: 1024 detik kipas intake: 1024 detik humidifier: 831 detik
09/06/26 16:14:03	29.05	60.25	25.1	67	heater: mati kipas exhaust: 1535 detik kipas intake: 1535 detik humidifier: 1535 detik
09/06/26 16:44:03	27.39	65.61	24.2	70	heater: mati kipas exhaust: 413 detik kipas intake: 413 detik humidifier: mati
09/06/26 17:14:04	25.86	74.69	23.3	74	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati
Siklus yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi stabil			5 siklus		
Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi stabil			2 jam 30 menit		

Berdasarkan hasil pengujian *black box* pada profil tanaman bayam dengan skenario suhu panas, sistem kendali mampu merespons kondisi awal *greenhouse* yang memiliki suhu tinggi sebesar 35,91°C dan kelembapan 54,48%. Untuk menurunkan suhu dan meningkatkan kelembapan menuju kondisi optimal, sistem mengaktifkan *exhaust fan*, *intake fan*, dan *humidifier* dengan durasi yang disesuaikan pada setiap siklus.

Seiring berjalannya waktu, suhu *greenhouse* mengalami penurunan bertahap hingga mencapai 25,86°C, sedangkan kelembapan meningkat menjadi 74,69%. Durasi kerja aktuator juga berkurang seiring kondisi lingkungan yang semakin mendekati *setpoint*. Kondisi stabil berhasil dicapai pada siklus kelima atau setelah 2 jam 30 menit

Hasil pengujian *black box* untuk profil tanaman bayam dengan skenario kondisi nyaman ditunjukkan pada tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Hasil Pengujian *Black Box* Profil Tanaman Bayam Dengan Skenario Nyaman

Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
19/05/2026 23:57	25.15	90.43	21.7	91	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati
20/05/2026 00:27	24.44	91.16	21.7	91	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati
Jumlah error ketidaksesuaian output yang dihasilkan fuzzy dengan kondisi ril aktuator			0		

Berdasarkan hasil pengujian *black box* pada profil tanaman bayam dengan skenario kondisi nyaman, sistem kendali menunjukkan respons yang tepat dengan mempertahankan seluruh aktuator dalam status mati ketika suhu internal

greenhouse berada dalam rentang optimal tanaman (24–27°C). Meskipun kelembapan internal tercatat sedikit di atas batas maksimal rentang optimal, sistem tidak mengaktifkan *exhaust fan* atau *intake fan* secara signifikan karena prioritas kendali difokuskan pada stabilitas suhu yang telah tercapai.

Hasil pengujian *black box* untuk profil tanaman melon dengan skenario kondisi suhu panas ditunjukkan pada tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Black Box Profil Tanaman Melon dengan Skenario Suhu Panas

Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
19/05/2026 14:58	37.28	64.13	26.0	82	heater: mati kipas exhaust: 1535 detik kipas intake: 1535 detik humidifier: 1535 detik
19/05/2026 15:28	34.88	68.15	25.1	88	heater: mati kipas exhaust: 1458 detik kipas intake: 1458 detik humidifier: 1472 detik
19/05/2026 15:58	32.53	73.24	24.3	94	heater: mati kipas exhaust: 900 detik kipas intake: 900 detik humidifier: mati
19/05/2026 16:28	30.38	81.63	23.8	99	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati
Siklus yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi stabil			4 siklus		
Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi stabil			2 jam		
Jumlah error ketidaksesuaian output yang dihasilkan fuzzy dengan kondisi ril aktuator			0		

Berdasarkan hasil pengujian *black box* pada profil tanaman melon dengan skenario suhu panas, sistem kendali mampu merespons kondisi awal *greenhouse* yang memiliki suhu tinggi sebesar 37,28°C dan kelembapan 64,13%. Untuk menurunkan suhu menuju kondisi yang sesuai dengan kebutuhan tanaman melon,

sistem mengaktifkan *exhaust fan*, *intake fan*, dan *humidifier* dengan durasi yang disesuaikan pada setiap siklus.

Seiring berjalannya waktu, suhu *greenhouse* mengalami penurunan bertahap hingga mencapai 30,38°C, sedangkan kelembapan meningkat menjadi 81,63%. Durasi kerja aktuator juga berkurang seiring kondisi lingkungan yang semakin mendekati *setpoint*. Kondisi stabil berhasil dicapai pada siklus keempat atau setelah 2 jam, ditandai dengan seluruh aktuator berada pada kondisi mati.

Hasil pengujian *black box* untuk profil tanaman melon dengan skenario kondisi nyaman ditunjukkan pada tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Hasil Pengujian *Black Box* Profil Tanaman Melon Dengan Kondisi Nyaman

Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
19/05/2026 17:29	27.95	85.90	23.6	99	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati
19/05/2026 17:59	27.22	81.93	23.4	99	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati
Jumlah error ketidaksesuaian output yang dihasilkan fuzzy dengan kondisi ril aktuator			0		

Berdasarkan hasil pengujian *black box* pada profil tanaman melon dengan skenario kondisi nyaman, sistem kendali menunjukkan respons yang tepat dengan mempertahankan seluruh aktuator dalam status mati ketika suhu internal *greenhouse* berada dalam rentang optimal tanaman (25-30°C). Meskipun kelembapan internal tercatat sedikit di atas batas maksimal rentang optimal, sistem

tidak mengaktifkan *exhaust fan* atau *intake fan* secara signifikan karena prioritas kendali difokuskan pada stabilitas suhu yang telah tercapai.

Hasil pengujian *black box* untuk profil tanaman bawang daun dengan skenario kondisi suhu panas ditunjukkan pada tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Profil Bawang Daun Dengan Skenario Suhu Panas

Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
08/06/26 15:12:17	35.25	50.07	25.5	61	heater: mati kipas exhaust: 1535 detik kipas intake: 1535 detik humidifier: 1535 detik
08/06/26 15:42:17	31.84	58.84	25.3	63	heater: mati kipas exhaust: 1535 detik kipas intake: 1535 detik humidifier: 1535 detik
08/06/26 16:12:22	29.32	63.28	24.9	66	heater: mati kipas exhaust: 1517 detik kipas intake: 1517 detik humidifier: 1517 detik
08/06/26 16:42:23	27.89	65.01	24.1	71	heater: mati kipas exhaust: 1150 detik kipas intake: 1150 detik humidifier: 1150 detik
08/06/26 17:12:23	26.45	70.50	23.2	77	heater: mati kipas exhaust: 899 detik kipas intake: 899 detik humidifier: 899 detik
08/06/26 17:42:27	25.60	76.80	22.6	81	heater: mati kipas exhaust: 899 detik kipas intake: 899 detik humidifier: 899 detik
08/06/26 18:12:28	24.98	79.32	22.2	84	heater: mati kipas exhaust: 693 detik kipas intake: 693 detik humidifier: 693 detik
08/06/26 18:42:33	24.68	81.51	22.1	86	heater: mati kipas exhaust: 466 detik kipas intake: 466 detik humidifier: mati
08/06/26 19:12:38	24.63	82.66	22.1	87	heater: mati kipas exhaust: 383 detik kipas intake: 383 detik humidifier: mati
08/06/26 19:42:44	24.4	83.50	22	88	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati

Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
Siklus yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi stabil			10 siklus		
Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi stabil			5 jam		
Error ketidaksesuaian output yang dihasilkan fuzzy dengan kondisi ril aktuator			0		

Berdasarkan hasil pengujian *black box* pada profil tanaman daun bawang dengan skenario suhu panas, sistem kendali mampu merespons kondisi awal greenhouse yang memiliki suhu tinggi sebesar 35,25°C dan kelembapan 53,76%. Untuk menurunkan suhu dan meningkatkan kelembapan menuju kondisi yang sesuai dengan kebutuhan tanaman daun bawang, sistem mengaktifkan *exhaust fan*, *intake fan*, dan *humidifier* dengan durasi tinggi pada beberapa siklus awal.

Seiring berjalannya waktu, suhu *greenhouse* mengalami penurunan bertahap hingga mencapai 24,40°C, sedangkan kelembapan meningkat menjadi 83,50%. Kondisi stabil berhasil dicapai pada siklus ke-11 atau setelah 5 jam 30 menit, ditandai dengan seluruh aktuator berada pada kondisi mati. Waktu stabilisasi yang lebih lama dibandingkan profil tanaman lainnya disebabkan oleh rentang suhu optimal daun bawang yang lebih rendah, yaitu 19–24°C.

Hasil pengujian *black box* untuk profil tanaman bawang daun dengan skenario kondisi nyaman ditunjukkan pada tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Hasil Pengujian Profil Bawang Daun Dengan Skenario Suhu Nyaman

Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
20/05/2026 01:52	24.09	92.28	21.5	91	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati

Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)	Suhu Luar (°C)	Kelembapan Luar (%RH)	Output
					humidifier: mati
20/05/2026 02:22	23.62	92.32	21.3	91	heater: mati kipas exhaust: mati kipas intake: mati humidifier: mati
Jumlah error ketidaksesuaian output yang dihasilkan fuzzy dengan kondisi ril aktuator			0		

Berdasarkan hasil pengujian *black box* pada profil tanaman daun bawang dengan skenario kondisi nyaman, sistem kendali menunjukkan respons yang tepat dengan mempertahankan seluruh aktuator dalam status mati ketika suhu internal greenhouse berada dalam atau sangat dekat dengan rentang optimal tanaman (19-24°C).

Selain mengevaluasi respon aktuator terhadap variasi kondisi lingkungan, pengujian *black box* juga mencakup verifikasi terhadap aspek operasional dan integrasi sistem IoT secara menyeluruh. Berdasarkan parameter pengujian yang telah ditetapkan, sistem berhasil mempertahankan interval kendali secara periodik setiap 30 menit sesuai dengan mekanisme *duty cycle* yang dirancang. Seluruh data pembacaan sensor, status aktuator, dan parameter kendali mengalami sinkronisasi data monitoring yang akurat pada antarmuka *web application*, sehingga informasi yang ditampilkan kepada pengguna secara *real-time*. Lebih lanjut, sistem juga teruji mampu melakukan pergantian profil tanaman secara dinamis melalui antarmuka web. Proses pergantian ini secara otomatis memperbarui nilai *setpoint* suhu dan kelembapan yang digunakan sebagai acuan mesin inferensi fuzzy.

4.3 Hasil Analisis

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan pada penelitian ini, metode segmentasi tumor otak menggunakan *Lightweight* U-Net berbasis citra MRI otak menunjukkan kinerja yang baik dalam mengidentifikasi area tumor. Hasil segmentasi yang diperoleh mampu membedakan jaringan tumor dan jaringan normal dengan cukup akurat, sehingga sistem yang dikembangkan berpotensi membantu tenaga medis dalam proses diagnosis dan perencanaan penanganan lebih lanjut. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa tujuan penelitian dalam mendukung peningkatan kualitas diagnosis penyakit tumor otak telah tercapai.

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian yang telah dilakukan, sistem kendali suhu dan kelembapan *greenhouse* menggunakan metode *fuzzy mamdani* berbasis profil tanaman mampu bekerja sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem berhasil mengintegrasikan sensor suhu dan kelembapan, aktuator, algoritma *fuzzy mamdani*, dan *web application monitoring* ke dalam satu kesatuan sistem kendali yang berjalan secara otomatis dan terstruktur. Implementasi sistem menunjukkan bahwa proses akuisisi data, pengolahan data, pengiriman perintah aktuator, hingga monitoring berbasis web dapat berjalan dengan baik secara *realtime*.

Hasil pengujian kalibrasi sensor menunjukkan bahwa sensor SHT35 memiliki *error* relatif rendah dengan nilai standar *error* terbesar hanya sebesar 1,45. Nilai standar deviasi dan standar *error* yang diperoleh juga menunjukkan bahwa pembacaan sensor cenderung stabil dan konsisten. Kondisi ini menjadi penting karena kualitas data sensor sangat memengaruhi kualitas keputusan yang dihasilkan oleh sistem *fuzzy mamdani*. Semakin akurat data masukan yang diperoleh, maka

semakin tepat pula respon kendali yang dihasilkan oleh sistem. Pengujian basis aturan *fuzzy* pada tiga profil tanaman mengonfirmasi bahwa mekanisme normalisasi *error* berbasis rentang optimal tanaman bekerja secara efektif. Sistem mampu memetakan sebelas skenario kondisi lingkungan menjadi respons aktuator yang proporsional, baik dalam kondisi suhu rendah, optimal, maupun ekstrem tinggi, tanpa memerlukan modifikasi pada struktur *fuzzy*.

Pengujian *black box* memperkuat temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa sistem beroperasi secara periodik setiap 30 menit sesuai mekanisme *duty cycle*, menghasilkan sinkronisasi data *realtime* pada *web application*, serta mampu memperbarui parameter kendali secara dinamis saat profil tanaman diganti. Pada skenario kondisi nyaman, sistem secara konsisten menonaktifkan seluruh aktuator sebagai bentuk penghematan energi ketika lingkungan telah berada pada kondisi yang sesuai. Sebaliknya, pada skenario suhu panas, sistem mengaktifkan kipas *exhaust*, *intake*, dan *humidifier* secara simultan untuk menerapkan pendinginan evaporatif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menurunkan suhu dan meningkatkan kelembapan secara bertahap hingga mencapai atau mendekati rentang kebutuhan tanaman. Perbedaan waktu stabilisasi pada setiap profil tanaman dipengaruhi oleh perbedaan *setpoint* serta rentang optimal masing-masing tanaman, di mana tanaman dengan kebutuhan suhu yang lebih rendah memerlukan waktu adaptasi yang lebih lama.

Penerapan konsep profil tanaman pada penelitian ini juga berhasil meningkatkan fleksibilitas sistem kendali dibandingkan pendekatan *greenhouse* konvensional yang umumnya hanya menggunakan satu *setpoint* statis. Dengan

pendekatan profil tanaman, sistem dapat menyesuaikan parameter suhu dan kelembapan berdasarkan karakteristik kebutuhan masing-masing tanaman. Pendekatan normalisasi *error* berbasis rentang optimal tanaman juga membantu menjaga konsistensi *domain fuzzy* sehingga satu struktur *fuzzy* yang sama dapat digunakan pada berbagai jenis tanaman tanpa perlu melakukan perubahan pada aturan *fuzzy* maupun fungsi keanggotaan.

Secara keseluruhan, sistem telah menunjukkan kinerja yang adaptif terhadap profil tanaman, stabil dengan hasil nilai *error* ketidaksesuaian antara *output* yang dihasilkan sistem *fuzzy* dan kondisi riil aktuator sebesar 0 pada setiap pengujian *black box*, dan efisien karena dapat menghemat energi dengan mematikan atau menurunkan intensitas kerja aktuator ketika *setpoint* mendekati atau mencapai rentang ideal. Keunggulan utama terletak pada fleksibilitas penggunaan satu mesin inferensi *fuzzy* untuk berbagai jenis tanaman melalui mekanisme profil dinamis, serta kemampuan translasi keluaran *fuzzy* menjadi durasi aktif aktuator yang meminimalkan beban kerja perangkat keras. Integrasi komunikasi MQTT, agregasi sensor, dan pengambilan data eksternal via API OpenMeteo berjalan tanpa gangguan selama pengujian, memastikan bahwa keputusan kendali didasarkan pada representasi lingkungan yang komprehensif.

Namun, terdapat beberapa batasan yang perlu dicatat. Kapasitas pendinginan pada prototipe skala kecil masih memengaruhi kecepatan sistem dalam mencapai kondisi stabil, terutama pada profil tanaman yang membutuhkan suhu relatif rendah seperti daun bawang. Pada kondisi suhu lingkungan eksternal yang tinggi, sistem memerlukan lebih banyak siklus kendali untuk mencapai rentang

optimal meskipun tetap mampu memberikan respons yang konsisten dan stabil sesuai karakteristik profil tanaman yang digunakan.

Pengembangan sistem kendali lingkungan *greenhouse* pada penelitian ini tidak hanya dipandang sebagai pencapaian teknis, tetapi juga sebagai bentuk implementasi nilai-nilai Islam yang menekankan ketepatan ukuran (*qadar*), keseimbangan (*mizan*), dan tanggung jawab dalam pengelolaan alam. Allah SWT menegaskan bahwa seluruh ciptaan-Nya ditetapkan dengan kadar dan ukuran yang presisi, sebagaimana tercantum dalam QS. *Al-Qamar* ayat 49:

إِنَّا كُلَّ شَيْءٍ خَلَقْنَاهُ بِقَدَرٍ

“*Sesungguhnya Kami menciptakan segala sesuatu sesuai dengan ukuran.*” (QS. *Al-Qamar* [54]: 49).

Ayat ini menjadi landasan filosofis dalam perancangan algoritma *fuzzy mamdani*, di mana parameter suhu dan kelembapan melalui mekanisme normalisasi *error* dan himpunan fuzzy yang terukur. Konsep *qadar* (ukuran) dalam ayat ini sejalan dengan prinsip sistem kendali yang tidak bekerja secara acak, melainkan berdasarkan kalkulasi proporsional terhadap besarnya penyimpangan kondisi aktual dari *setpoint* profil tanaman. Dengan demikian, sistem dirancang untuk menjaga suhu dan kelembapan agar tetap berada pada ukuran optimal bagi pertumbuhan tanaman, mencerminkan upaya manusia dalam meneladani ketelitian penciptaan Allah (KEMENAG, 2026).

Konsep pengendalian yang dilakukan secara presisi dan tidak berlebihan juga sejalan dengan hadis Rasulullah SAW:

عَنْ عَائِشَةَ رَضِيَ اللَّهُ عَنْهَا قَالَتْ: قَالَ رَسُولُ اللَّهِ صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ: إِنَّ اللَّهَ تَعَالَى يُحِبُّ إِذَا عَمِلَ أَحَدُكُمْ عَمَلًا أَنْ يُتَّقِنَهُ (رواه الطبري والبيهقي)

“Dari Aisyah r.a., sesungguhnya Rasulullah s.a.w. bersabda: “Sesungguhnya Allah mencintai seseorang yang apabila bekerja, mengerjakannya secara profesional” (HR. Thabrani, No: 891, Baihaqi, No: 334).

Hadis tersebut menegaskan pentingnya bekerja secara optimal, teliti, dan profesional dalam setiap pekerjaan. Penerapan sistem kendali otomatis berbasis *fuzzy mamdani* pada penelitian ini merupakan bentuk upaya untuk menghadirkan pengelolaan *greenhouse* yang lebih presisi, efisien, dan terukur melalui pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi dalam bidang teknologi pertanian dan IoT, tetapi juga mencerminkan nilai-nilai Islam dalam menjaga keseimbangan, ketelitian, dan kemanfaatan bagi kehidupan manusia (Febrianto & Muzakki, 2021).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan keputusan kendali yang berbeda sesuai karakteristik profil tanaman tanpa mengubah struktur dasar algoritma fuzzy. Pengujian kalibrasi sensor menunjukkan bahwa penyimpangan pembacaan sensor relatif rendah, dengan nilai standar error terbesar hanya sebesar 1,45. Pengujian fungsional juga menunjukkan bahwa seluruh fitur sistem berjalan sesuai kebutuhan, dengan nilai error ketidaksesuaian antara output yang dihasilkan sistem fuzzy dan kondisi riil aktuator sebesar 0 pada setiap pengujian. Pada pengujian *black box* sistem berhasil mencapai kondisi stabil pada seluruh profil tanaman dengan jumlah siklus stabilisasi yang berbeda. Kondisi stabil paling cepat dicapai pada profil tanaman melon dengan 4 siklus kendali, sedangkan kondisi stabil paling lama terjadi pada profil tanaman bawang daun dengan 10 siklus kendali. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penerapan fuzzy mamdani berbasis profil tanaman mampu meningkatkan fleksibilitas sistem kendali greenhouse serta mendukung pengelolaan iklim mikro yang lebih adaptif.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk pengembangan sistem lebih lanjut untuk penelitian selanjutnya.

1. Peningkatan kapasitas aktuator pendingin perlu dilakukan agar sistem mampu menurunkan suhu internal secara lebih efektif ketika beban panas

eksternal sangat tinggi. Pada penelitian ini, kapasitas fisik *exhaust fan*, *intake fan*, dan *humidifier* pada skala prototipe memengaruhi kecepatan penurunan suhu, terutama pada profil tanaman yang membutuhkan suhu relatif rendah seperti bawang daun.

2. Pengujian sistem pada skala *greenhouse* yang lebih besar dan dalam jangka waktu yang lebih panjang perlu dilakukan untuk memvalidasi performa sistem kendali dalam kondisi operasional nyata, termasuk pengamatan dampak langsung terhadap pertumbuhan dan hasil panen tanaman yang dibudidayakan.
3. Perluasan variabel *input fuzzy* dengan menambahkan parameter iklim mikro lain, seperti intensitas cahaya, kadar CO₂, dan kecepatan angin, dapat meningkatkan kecerdasan sistem dalam mengambil keputusan kendali yang lebih komprehensif dan sesuai dengan kebutuhan fisiologis tanaman secara menyeluruh.
4. Pengembangan mekanisme *setpoint* dinamis berbasis waktu perlu dipertimbangkan pada penelitian selanjutnya. Sebagian besar tanaman memiliki kebutuhan suhu dan kelembapan yang berbeda antara siang dan malam hari, di mana suhu malam umumnya lebih rendah untuk mendukung proses respirasi. Profil tanaman yang ada saat ini menggunakan satu rentang *setpoint* yang bersifat statis sepanjang hari, sehingga belum mampu mengakomodasi perbedaan kebutuhan fisiologis tanaman secara diurnal.

DAFTAR PUSTAKA

- Adek, R. T. (2024). Fuzzy Mamdani Smart Control for Optimizing Melon Growth in Nutrient Film Technique (NFT) Hydroponic Greenhouse. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 12(4), 3136–3144. <https://www.ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/6806>
- Arief, Z., Zarory, H., Jufrizel, J., & Mursyitah, D. (2024). Rancang bangun sistem pemantauan dan penyiraman pintar tanaman cabai pada greenhouse menggunakan Fuzzy Mamdani berbasis Blynk IoT. *Aiti*, 21(2), 271–284. <https://doi.org/10.24246/aiti.v21i2.271-284>
- Bersani, C., Ruggiero, C., Sacile, R., Soussi, A., & Zero, E. (2022). Internet of Things Approaches for Monitoring and Control of Smart Greenhouses in Industry 4.0. *Energies*.
- Bicamumakuba, E., Reza, N., Jin, H., Lee, K., & Chung, S. (2025). *Multi-Sensor Monitoring , Intelligent Control , and Data Processing for Smart Greenhouse Environment Management*. 1–25.
- Cahyadi, B. N., Pakaya, I., & Ismail, A. soleh. (2025). Perancangan Sistem Smart Greenhouse Berbasis IOT Untuk Peningkatan Produktivitas Sayuran. *Jurnal Aplikasi Dan Inovasi Ipteks SOLIDITAS*, 8, 166–177.
- Damanik, E., & Sahfitra, A. (2026). Pengaruh Pupuk Kandang Kambing dan Mikoriza terhadap Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Melon. *Jurnal Ilmiah Pertanian (JIPERTA)*, 8(1), 36–48. <https://doi.org/10.31289/jiperta.v8i1.65>
- Febriansyah, Z., Fitriyah, H., Regasari, R., & Putri, M. (2023). *Sistem Kendali Suhu dan kelembapan udara pada Tanaman Bayam Microgreen dalam Ruangan Tertutup menggunakan Regresi Linier*. 7(5), 2542–2547.
- Febrianto, R. W., & Muzakki. (2021). Work Motivation Based On Islamic Perspective. *Ulumuna: Jurnal Studi Keislaman*, 7(1).
- Fua, A. C. H., & Kaesmetan, Y. R. (2025). *Penerapan Metode Fuzzy Mamdani Untuk Pemetaan Stunting di Kabupaten Ende*. 4, 278–292.
- Gitakarma, M. S., & Tjahyanti, L. P. A. S. (2025). Perbandingan Kinerja Sistem Monitorinf Dan Kontrol IOT Berbasis Fuzzy Logic Dengan Kontrol Manual Dalam Model Skala Kecil. *Jurnal Komputer Dan Teknologi Sains (KOMTEKS)*, 3(1), 23–27.
- González-vidal, A., Mendoza-bernal, J., Ramallo, A. P., Zamora, M. Á., Martínez, V., & Skarmeta, A. F. (2022). *Smart Operation of Climatic Systems in a Greenhouse*. 1–18.
- Haryawan, M. A. B., Ichsan, M. H. H., & Primananda, R. (2023). Sistem Monitoring Iklim Mikro pada Prototipe Greenhouse Tanaman Tomat menggunakan

- Metode Fuzzy dan Aplikasi Telegram. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 7(1), 315–321. <http://i-ptiik.ub.ac.id>
- Hudha, F. V., Asnawati, & Rahmadiyahani. (2023). Pengaruh Naungan Dan Pemberian Urea Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Bawang Daun Pada Tanah Gambut. *Jurnal Sains Pertanian Equator*, October 2022, 1099–1107.
- Husein, Budiman, M., & Djamal, M. (2019). *Duty Cycle Control on Compressor of Split Air Conditioners Using Internet of Things Embedded in Fuzzy-PID*. 11(1), 112–124. <https://doi.org/10.15676/ijeei.2019.11.1.7>
- KEMENAG. (2026). KEMENAG. <https://quran.kemenag.go.id/quran/per-ayat/surah/15?from=19&to=19>
- Mohabuth, A. Q., & Nem, D. (2023). An IoT-Based Model for Monitoring Plant Growth in Greenhouses. *Journal of Information Systems and Informatics*, 5(2), 536–549. <https://doi.org/10.51519/journalisi.v5i2.489>
- Munawaroh, Normalisa, & Octaviano, A. (2019). Analisa dan Penerapan Sistem Inferensi Fuzzy Metode Mamdani untuk Penentuan Penerima Beasiswa. *International Journal of Artificial Intelligence*, 21–52. <https://doi.org/10.36079/lamintang.ijai-0601.31>
- Nurjannah, Muchtar, M., Sarimuddin, Sya'ban, K., Karim, R., & Al Jum'ah, M. N. (2024). *Perancangan Smart Trash Bin Menggunakan Logika Fuzzy Berbasis Arduino di SDN 5*. 12(3), 1630–1640.
- Rahmanul, R., Daud, D., & Ikhsan, M. (2023). Analisis Kebijakan Smart Farming Dalam Perkembangan Pertanian Di Era Revolusi Industri 4.0. *Jurnal Administrasi Politik Dan Sosial*, 4(3), 151–156. <https://doi.org/10.46730/japs.v4i3.124>
- Riahi, J., Nasri, H., Mami, A., & Vergura, S. (2024). Effectiveness of the Fuzzy Logic Control to Manage the Microclimate Inside a Smart Insulated Greenhouse. *Smart Cities*, 1304–1329.
- Sahulata, E. R. Y., Wattimanela, H. J., & Delsen, M. S. N. Van. (2020). Penerapan Fuzzy Inference System Tipe Mamdani Untuk Menentukan Jumlah Produksi Roti Berdasarkan Data Jumlah Permintaan Dan Persediaan (Studi Kasus Pabrik Cinderella Bread House Di Kota Ambon). *Jurnal Ilmu Matematika Dan Terapan*, 14(1), 79–90.
- Tang, H. H., & Ahmad, N. S. (2024). Fuzzy logic approach for controlling uncertain and nonlinear systems: a comprehensive review of applications and advances. *SYSTEMS SCIENCE & CONTROL ENGINEERING*, 2583. <https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2394429>

- Tjahyanti, L. P. A. S., Pratama, P. A., Prabawa, P. S., & Gitakarma, M. S. (2025). Desain dan Implementasi Sistem Kontrol Suhu dan Kelembaban di Greenhouse dengan Pendekatan Fuzzy. *MEANS (Media Informasi Analisa Dan Sistem)*, 10(1 SE-), 21–25. https://ejournal.ust.ac.id/index.php/Jurnal_Means/article/view/4508
- Velandia, J. B., Ayala, S. C. V., & Lara, D. D. L. (2022). A Systematic Review of Greenhouse Humidity Prediction and. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8483003>
- Vinh, H. X., & Khanh, P. Van. (2025). Optimizing Greenhouse Climate Control Using Deep Reinforcement Learning. *YMER*, 24(02), 607–631.
- Wijaya, T., Ghozali, T., & Bachri, K. (2025). Pemantauan Dan Pengendalian Suhu Dan Kelembapan Udara Untuk Tanaman Tomat Dengan Menggunakan WEMOS D1. *Cylinder: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 11(April).
- Wilujeng, E. D. I., Pertami, R. R. D., Salim, A., & Majidah, M. (2024). Pengaruh Iklim Mikro dan Penggunaan Media Tanam yang Berbeda pada Pertumbuhan Tanaman Melon Varietas Sweet Net. *Gontor Agrotech Science Journal*, 10(1), 49–56. <https://doi.org/10.21111/agrotech.v10i1.12126>