

Sistem Kendali Fertigasi Presisi Berbasis Logika Fuzzy untuk Budidaya Tanaman Hidroponik

Precision Fertigation Control System Based on Fuzzy Logic for Hydroponic Plant Cultivation

Haryo Prastono^{1*}, Mohamad Solahudin², Supriyanto²

¹ Pusat Riset Hortikultura, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Cibinong, Indonesia.

² Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University, Bogor, Indonesia.

Email*): haryo13@brin.go.id

Received:
21 May 2024

Revised:
11 September 2024

Accepted:
16 September 2024

Published:
29 September 2024

DOI:
10.29303/jrpb.v12i2.639

ISSN 2301-8119, e-ISSN
2443-1354

Available at
<http://jrpb.unram.ac.id/>

Abstract: The fertigation control system has been extensively developed, particularly for hydroponic plant cultivation. However, existing studies often overlook the characteristics of the interaction between the environment and plants. Evapotranspiration and the moisture status of the growing medium are two critical parameters in determining the volume of fertigation. As a control system, fuzzy logic can manage fertigation based on these two parameters. This study aims to deliver water and nutrients to plants more effectively and efficiently, aligning with current environmental conditions and plant needs. The research was conducted through several stages: defining design criteria, creating a fuzzy logic design, simulating the fuzzy logic-based fertigation control system, and testing the system. Simulation results indicate that when the moisture content of the growing medium is between 26% and 31%, the fertigation duration varies according to evapotranspiration values. When the moisture content exceeds 32%, fertigation does not occur regardless of evapotranspiration values. Testing results demonstrate that the fuzzy logic used in this control system is efficient in delivering fertigation, as evidenced by minimal runoff compared to systems without control. Additionally, the moisture status of the growing medium consistently remains within the available water zone or at the optimum condition for plant water absorption, with a mean absolute percentage error of 1.98%. The designed fuzzy logic control system is also effective in providing fertigation, with the total volume ranging from 132 to 308.4 ml/day, closely matching the daily evapotranspiration rate. Based on plant physiological measurements, the fuzzy logic control system outperforms fertigation without control.

Keywords: control system; fertigation; fuzzy logic; hydroponic

Abstrak: Sistem kendali fertigasi telah banyak dikembangkan khususnya untuk budidaya tanaman hidroponik. Namun, beberapa kajian yang telah dilakukan belum memperhatikan karakteristik hubungan antara lingkungan dan tanaman. Evapotranspirasi dan status kelembaban media tanam adalah dua parameter utama dalam menentukan volume fertigasi. Logika fuzzy sebagai salah satu jenis sistem kendali dapat mengontrol pemberian fertigasi berdasarkan dua parameter tersebut. Tujuan penelitian ini yaitu untuk memberikan air dan nutrisi bagi tanaman agar lebih efektif dan efisien sesuai dengan kondisi lingkungan dan kebutuhan tanaman terkini. Pelaksanaan penelitian dilakukan dengan tahapan antara lain: penentuan kriteria desain, pembuatan rancangan logika fuzzy, simulasi sistem kendali fertigasi berbasis logika fuzzy, dan pengujian sistem kendali fertigasi berbasis logika fuzzy. Hasil simulasi menunjukkan ketika kelembaban media tanam berada pada rentang 26 - 31%, durasi fertigasi bervariasi menyesuaikan nilai evapotranspirasi. Ketika kelembaban media tanam lebih dari 32%, proses fertigasi tidak terjadi pada berbagai nilai evapotranspirasi. Hasil pengujian menunjukkan logika fuzzy yang digunakan dalam sistem kendali ini terbukti efisien dalam memberikan fertigasi. Hal ini terbukti dengan minimnya limpasan yang dihasilkan oleh sistem kendali fertigasi berbasis logika fuzzy dibandingkan tanpa sistem kendali. Selain itu, kondisi status kelembaban media tanam selalu terjaga pada zona air tersedia atau pada kondisi optimum penyerapan air oleh tanaman, dengan nilai *mean absolute percentage error* yaitu 1,98%. Sistem kendali logika fuzzy yang dirancang juga terbukti efektif dalam

memberikan fertigasi, dimana total volume fertigasi yang diberikan oleh sistem kendali ini berkisar antara 132 – 308,4 ml/hari mendekati nilai evapotranspirasi harian yang terjadi. Berdasarkan hasil pengukuran fisiologi tanaman, sistem kendali logika fuzzy yang dirancang memberikan hasil yang lebih unggul dibandingkan pemberian fertigasi tanpa menggunakan sistem kendali.

Kata kunci: fertigasi; hidroponik; logika fuzzy; sistem kendali

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Tanaman melakukan fotosintesis untuk tumbuh dan berkembang. Proses fotosintesis dilakukan dengan menyerap karbondioksida dan air untuk menghasilkan energi dan oksigen oleh tanaman. Air adalah salah satu unsur utama yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Ketersediaan air yang kurang mengakibatkan proses fotosintesis terhambat sehingga tanaman kekurangan makanan dan menjadi layu. Sebaliknya ketersediaan air yang berlebih menyebabkan pemborosan terhadap sumber daya air, serta mengakibatkan tanah menjadi jenuh / kelebihan air dan sirkulasi oksigen di dalam tanah terhambat (Nugroho & Setiawan, 2022).

Air sangat dibutuhkan untuk proses metabolisme tanaman, sehingga sangat banyak usaha yang dilakukan untuk mengembangkan sistem irigasi yang ideal. Salah satu usaha tersebut adalah penggunaan irigasi tetes yang banyak berkembang hingga saat ini. Di rumah tanaman, irigasi tetes tidak hanya digunakan untuk memberikan air pada tanaman, namun juga dapat digunakan untuk memberikan nutrisi yang disebut dengan istilah fertigasi. Fertigasi sering diaplikasikan khususnya pada sistem penanaman dengan metode hidroponik. Kombinasi pemberian air dan nutrisi dengan metode irigasi tetes ini dapat meningkatkan efektifitas pemberian fertigasi, karena lebih tepat sasaran dengan berada di sekitar zona perakaran tanaman (Sumarni et al., 2019).

Efisiensi juga perlu dilakukan dalam pemberian fertigasi bagi tanaman. Tujuannya adalah untuk meminimalisir biaya produksi dan menerapkan budidaya tanaman yang ramah lingkungan. Efisiensi dapat dilakukan dengan mengendalikan pemberian irigasi sesuai dengan kondisi dan kebutuhan tanaman. Kebutuhan air irigasi dilandasi atas dua parameter, yaitu evapotranspirasi dan status kelembaban media tanam. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk membuat sistem irigasi otomatis. Sistem kendali yang digunakan juga bermacam-macam seperti kontrol PID, *neural network*, dan logika fuzzy (Abioye et al., 2020).

Logika fuzzy yang digunakan sebagai sistem kendali irigasi memiliki keunggulan tersendiri. Keunggulannya adalah sistem ini tidak membutuhkan model yang akurat dari objek tanaman yang akan diiri. Hal ini dikarenakan logika fuzzy bekerja berdasarkan aturan yang dirumuskan dalam format logika *if-and-then* yang didapat dari pengetahuan ahli tentang proses tersebut. Sehingga hal ini memberikan keuntungan dan kelebihan jika diterapkan pada sistem fertigasi yang kompleks dan tidak linier (Abioye et al., 2020). Penggunaan sistem kendali irigasi dengan logika fuzzy juga telah dilakukan oleh Jaiswal & Ballal (2020); Krishnan et al. (2020); Touati et al. (2013); dan Navinkumar et al. (2021), dimana mereka menggunakan beberapa parameter lingkungan (kelembaban udara, suhu udara, curah hujan, kecepatan angin, intensitas matahari) dan media tanam (kelembaban tanah) sebagai parameter *input* untuk mengatur sudut bukaan kran atau durasi penyiraman. Namun dari beberapa penelitian tersebut parameter lingkungan yang digunakan masing-masing berdiri sendiri sebagai variabel *input* untuk logika fuzzy, tanpa diolah dan dikonversi terlebih dahulu menjadi nilai evapotranspirasi. Selain itu parameter kelembaban media tanam yang digunakan belum memperhatikan status kelembaban media tanam, dimana seharusnya air yang bisa diserap oleh tanaman harus berada pada zona air tersedia atau diantara kapasitas lapang (batas

maksimal tanaman dapat menyerap air dari media tanam) dan titik layu (batas minimal tanaman dapat menyerap air dari media tanam).

Berdasarkan permasalahan terkait pemberian fertigasi khususnya pengembangan sistem kendali yang telah dilakukan. Perlu adanya usaha untuk meningkatkan efisiensi sumber daya dan efektifitas pemberian fertigasi agar sesuai dengan kebutuhan tanaman dan kondisi lingkungan terkini. Oleh karena itu perlu adanya kajian lebih lanjut terkait parameter evapotranspirasi dan kelembaban media tanam sebagai *input* sistem kendali fertigasi presisi yang sesuai dengan karakteristik hubungan antara lingkungan dan tanaman.

Tujuan

Kajian terkait sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy ini bertujuan untuk memberikan air dan nutrisi bagi tanaman sesuai dengan kondisi lingkungan dan kebutuhan tanaman terkini. Sistem kendali yang dirancang dapat lebih efektif memberikan fertigasi sesuai dengan nilai evapotranspirasi harian yang terjadi. Selain itu sistem kendali yang dirancang dapat lebih efisien memberikan fertigasi dengan menjaga status kelembaban media tanam pada kondisi air tersedia dan minim limpasan. Ketika kondisi ini tercapai, diharapkan dapat menghasilkan tanaman dengan jumlah dan kualitas fisiologi yang lebih baik dibandingkan tanpa menggunakan sistem kendali.

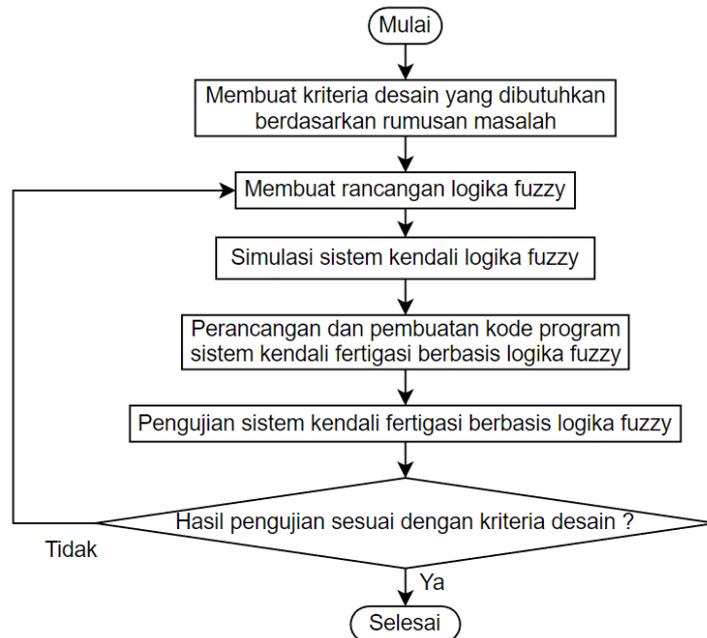
METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Penelitian ini dilaksanakan dalam rumah tanaman (*greenhouse*) yang berlokasi di laboratorium lapangan Siswadhi Soepardjo, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor. Penelitian ini menggunakan purwarupa mesin *dosing* nutrisi hasil rancangan Prastono (2023). Mesin ini dapat diaplikasikan untuk mengontrol pencampuran nutrisi hidroponik dan pemberian fertigasi dengan berbagai jenis sistem kendali. Mesin *dosing* nutrisi yang digunakan dikelola oleh mini komputer berupa Raspberry Pi sehingga dapat digunakan untuk berbagai macam sistem pemrograman. Selain itu mesin *dosing* nutrisi ini juga dilengkapi jaringan instalasi irigasi tetes berupa aktuator pompa yang digunakan untuk mengalirkan fertigasi dari bak penampung nutrisi menuju tanaman. Kemudian beberapa bahan yang digunakan untuk pengujian sistem kendali ini terdiri atas larutan nutrisi AB Mix dengan konsentrasi 1000 ppm, tanaman cabai (*Capsicum frutescens*) berumur dua bulan setelah tanam, campuran media tanam *cocopeat* (75%) dan arang sekam (25%), serta *polybag*. Selanjutnya beberapa bahan yang digunakan untuk pengujian sistem kendali antara lain gelas ukur untuk mengukur volume limpasan fertigasi dan TDS meter untuk mengukur konsentrasi larutan nutrisi. Kemudian untuk simulasi sistem kendali logika fuzzy menggunakan aplikasi Matlab R2022a dengan modul *fuzzy logic designer*.

Metode

Pelaksanaan penelitian menggunakan pendekatan metode rancangbangun dalam membuat sistem kendali fertigasi presisi. Mengacu pada metode desain yang dilakukan oleh Hermawan & Yanuar (2023), tahapan penelitian ini dimulai dengan membuat kriteria desain untuk memecahkan permasalahan yang ada pada budidaya tanaman secara hidroponik dengan irigasi tetes. Berdasarkan kebutuhan atas kriteria desain, selanjutnya dibuat rancangan logika fuzzy sebagai sistem kendali untuk fertigasi. Hasil rancangan logika fuzzy kemudian disimulasikan untuk mendapatkan nilai fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy yang optimal. Setelah didapat hasil simulasi yang optimal nilai fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy yang didapat diunggah ke purwarupa mesin *dosing* nutrisi untuk divalidasi pada lingkungan nyata. Secara lengkap tahapan penelitian ini tersaji pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir tahapan penelitian

1. Kriteria Desain

Kriteria desain ditetapkan agar sistem kendali fertigasi yang dirancang mampu memberikan fertigasi yang efektif dan efisien sesuai yang diharapkan. Beberapa kriteria desain yang menjadi acuan dalam perancangan sistem kendali fertigasi presisi ini yaitu:

- Kondisi status kelembaban media tanam berada diantara kapasitas lapang dan titik layu, dengan nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) < 10%.
- Nilai limpasan fertigasi menggunakan sistem kendali logika fuzzy kurang dari nilai limpasan fertigasi tanpa menggunakan sistem kendali.

2. Perancangan Sistem Kendali Logika Fuzzy

Parameter sifat - sifat media tanam seperti kelembaban media tanam dan evapotranspirasi adalah dua parameter penting untuk menerapkan praktik pengelolaan fertigasi (Chen et al., 2015). Dua parameter tersebut digunakan sebagai *input* untuk mengendalikan sistem fertigasi pada penelitian ini. Sistem kendali ini hanya menentukan variabel kuantitas atau volume larutan nutrisi yang dikonversi menjadi bentuk durasi fertigasi yang diberikan untuk media tanam (Abioye et al., 2020). Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan dalam sistem kendali fertigasi berbasis logika fuzzy, seperti metode Mamdani, Sugeno, dan Tsukamoto (Alamouti et al., 2023; Setiowati et al., 2022; Silalahi et al., 2022). Pada penelitian ini metode Mamdani digunakan sebagai sistem kendali fertigasi berbasis logika fuzzy. Beberapa tahapan dalam proses perancangan sistem kendali logika fuzzy seperti fuzifikasi, inferensi, dan defuzifikasi dilakukan guna memberikan fertigasi yang efektif dan efisien.

a. Fuzifikasi

Fuzifikasi adalah proses mengubah *input* sistem yang bernilai tegas menjadi variabel linguistik menggunakan fungsi keanggotaan yang disimpan pada basis pengetahuan (Radhika & Parvathi, 2016). Dalam menentukan *fuzzy set input*, nilai kelembaban media tanam menjadi parameter *input* pertama dalam sistem kendali logika fuzzy ini. Nilai kelembaban media tanam yang digunakan pada proses fuzifikasi ini dibagi menjadi tiga kategori, yaitu kering, lembab, dan basah. Jenis fungsi keanggotaan

yang digunakan sebagai *fuzzy set input* untuk parameter kelembaban media tanam adalah fungsi segitiga dan trapesium.

Evapotranspirasi menjadi parameter *input* kedua dalam sistem kendali fertigasi berbasis logika fuzzy ini. Tipe evapotranspirasi yang digunakan adalah evapotranspirasi standar (ET_o) yang telah ditentukan oleh FAO dengan metode Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Penggunaan ET_o sebagai parameter input kedua memiliki keunggulan tersendiri, dimana ET_o dapat menjadi nilai evapotranspirasi standar yang digunakan untuk berbagai jenis tanaman. Oleh karena itu sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy yang dirancang dapat digunakan untuk semua jenis tanaman dengan metode budidaya hidroponik berbasis irigasi tetes. Nilai evapotranspirasi yang digunakan pada proses fuzifikasi ini dibagi menjadi tiga kategori, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Jenis fungsi keanggotaan yang digunakan sebagai *fuzzy set input* untuk parameter evapotranspirasi adalah fungsi segitiga. Batas – batas nilai dan jenis fungsi keanggotaan dari *fuzzy set input* akan ditentukan dengan proses simulasi menggunakan modul *fuzzy logic designer* pada aplikasi Matlab (Sharma & Obaid, 2020).

Parameter *output* yang digunakan pada sistem kendali fertigasi ini adalah durasi penyiraman dalam satuan detik. Rentang durasi penyiraman akan dibagi menjadi empat kategori yaitu mati, pendek, medium, dan lama. Fungsi keanggotaan yang digunakan sebagai *fuzzy set output* untuk parameter durasi fertigasi adalah fungsi segitiga. Batas-batas nilai dan jenis fungsi keanggotaan yang digunakan baik sebagai *fuzzy set input* dan *fuzzy set output* akan ditentukan dengan proses simulasi menggunakan modul *fuzzy logic designer* pada aplikasi Matlab.

b. Inferensi

Inferensi merupakan proses mengubah *input* fuzzy menjadi *output* fuzzy dengan mengikuti aturan – aturan yang telah ditetapkan. Aturan fuzzy merupakan logika yang digunakan untuk pengambilan keputusan. Logika yang digunakan merupakan logika IF-AND (Ariani & Endra, 2013). Terdapat sembilan aturan yang digunakan dalam proses inferensi ini. Sembilan aturan tersebut merupakan kombinasi dari berbagai kategori yang ada pada parameter kelembaban media tanam (kering, lembab, dan basah) parameter evapotranspirasi (rendah, sedang, dan tinggi) serta parameter durasi fertigasi (mati, cepat, medium, dan lama). Rancangan logika aturan yang digunakan pada penelitian ini ditentukan melalui proses simulasi menggunakan modul *fuzzy logic designer* pada aplikasi Matlab.

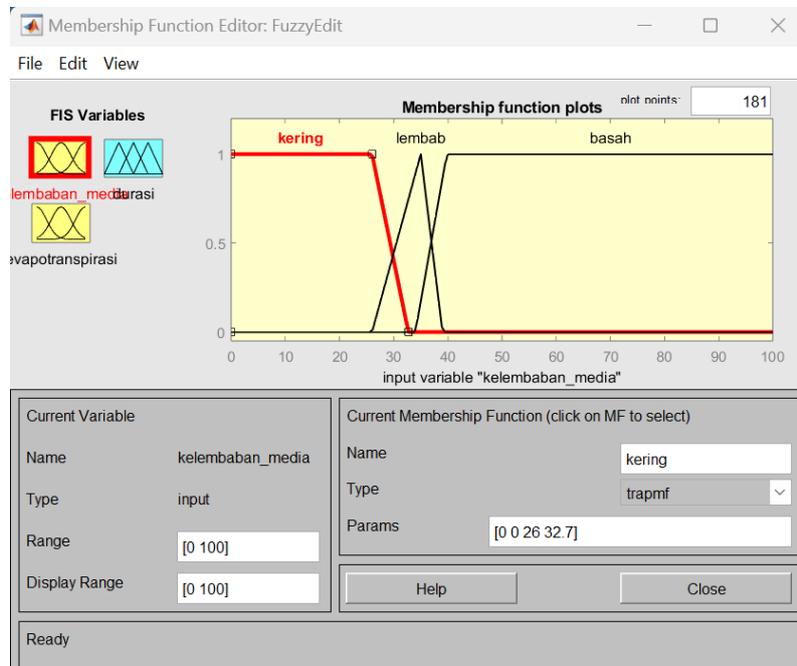
c. Defuzifikasi

Defuzzifikasi adalah proses mengubah hasil dari tahap inferensi menjadi *output* yang bernilai tegas menggunakan fungsi keanggotaan yang telah ditetapkan. Defuzzifikasi pada penelitian ini menggunakan metode *center of area*.

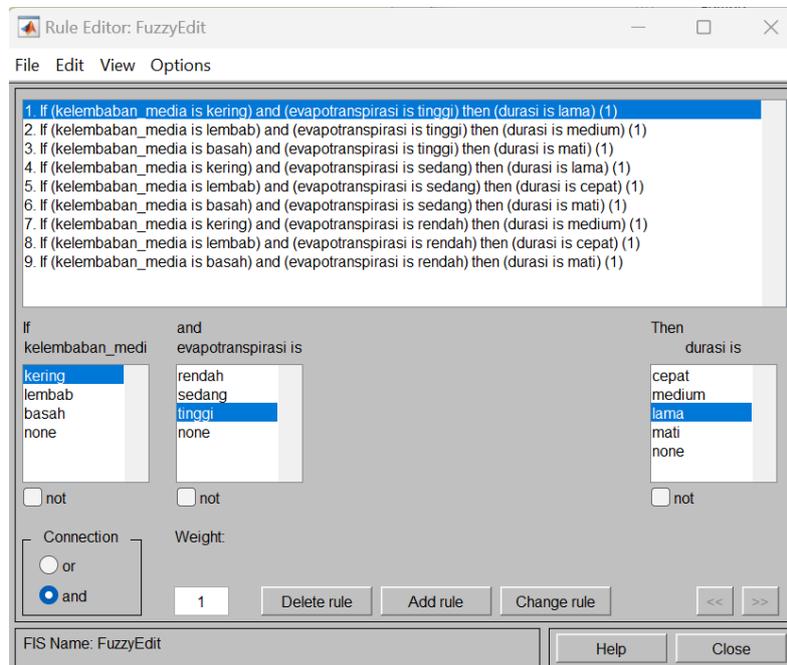
3. Simulasi Sistem Kendali Logika Fuzzy

Proses simulasi dilakukan menggunakan aplikasi Matlab R2022a dengan spesifikasi perangkat keras prosesor komputer AMD Athlon Silver 3050U, AMD Radeon Graphics, dan RAM 4 GB. Tujuan simulasi sistem kendali logika fuzzy adalah untuk mendapatkan nilai fungsi keanggotaan *fuzzy set input*, *fuzzy set output*, dan aturan fuzzy yang tepat. Sehingga bisa mendapatkan hasil yang akurat ketika diimplementasikan pada sistem nyata, dan memberikan fertigasi yang efektif dan efisien. Tujuan lainnya adalah untuk menghemat biaya dan waktu sehingga proses optimasi tidak harus dilakukan pada kondisi nyata. Simulasi dilakukan dengan teknik *trial and error*. Tahap pertama dari simulasi ini adalah menetapkan nilai fungsi keanggotaan pada *fuzzy set input* dan *fuzzy set output* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Nilai yang ditetapkan dari fungsi keanggotaan ini yaitu jenis fungsi keanggotaan (fungsi trapesium atau segitiga) dan batasan / titik *set point* dari setiap fungsi

keanggotaan. Selain fungsi keanggotaan pada *fuzzy set input* dan *fuzzy set output*, aturan-aturan fuzzy juga disesuaikan dalam proses simulasi ini untuk mendapatkan hasil yang optimal. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, penyesuaian dilakukan dengan menetapkan setiap variabel linguistik dari *fuzzy set input* dan mencocokkannya dengan variabel linguistik dari *fuzzy set output* yang tepat, sehingga didapat *output* durasi fertigasi yang hampir mendekati dengan kebutuhan tanaman.



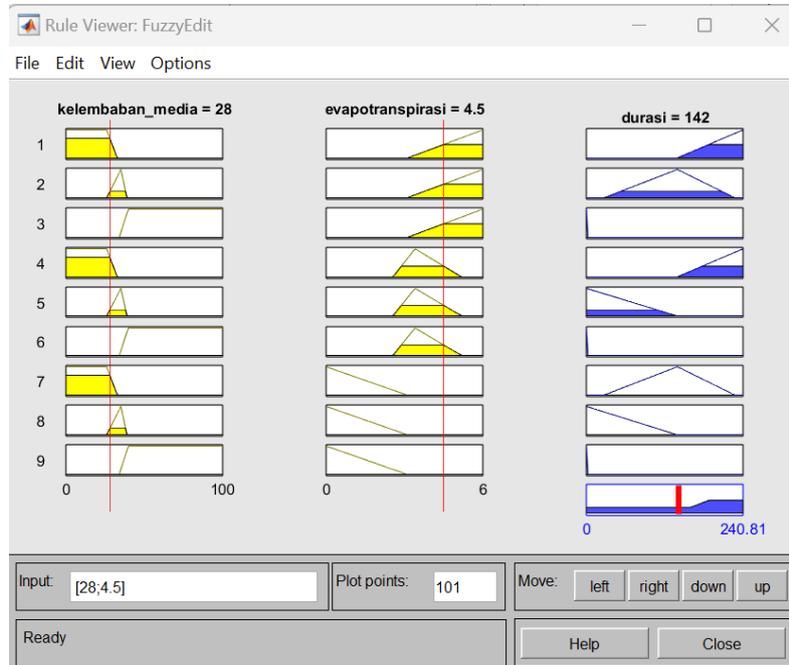
Gambar 2. Membership function editor pada modul fuzzy logic designer Matlab



Gambar 3. Rule editor pada modul fuzzy logic designer Matlab

Tahap kedua dari simulasi ini adalah melakukan perhitungan durasi fertigasi berdasarkan nilai – nilai dan aturan yang telah ditetapkan pada tahap pertama. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, nilai durasi fertigasi dicari untuk setiap nilai kelembaban media tanam dan evapotranspirasi. Kemudian hasil dari simulasi ini dicocokkan dengan kebutuhan

durasi fertigasi sebenarnya. Apabila nilai MAPE dari hasil simulasi lebih besar dari 5%, maka proses simulasi pada tahap pertama dilakukan kembali. Iterasi dari proses simulasi ini terus dilakukan hingga didapat hasil yang akurat dengan nilai MAPE kurang dari 5%. Setelah dilakukan beberapa iterasi pada proses simulasi ini, nilai fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy yang didapat dari hasil simulasi diunggah ke purwarupa mesin *dosing* nutrisi untuk divalidasi pada lingkungan nyata.



Gambar 4. Simulation editor pada modul fuzzy logic designer Matlab

4. Pengujian Sistem Kendali Fertigasi Presisi Berbasis Logika Fuzzy

a. Uji Validasi Sistem Kendali Logika Fuzzy

Pengujian dilakukan guna menilai apakah rancangan sistem kendali yang dibuat telah memberikan fertigasi yang efektif dan efisien sesuai dengan kriteria desain yang telah ditetapkan. Sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy dikatakan valid dan bagus apabila kondisi kelembaban media tanam tetap stabil berada diantara kapasitas lapang dan titik kritis. Titik kritis adalah titik tengah antara kapasitas lapang dan titik layu. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui efektifitas sistem kendali dalam menjaga kondisi kelembaban media tanam agar tetap stabil berada pada zona air tersedia. Berdasarkan kriteria desain yang telah disebutkan sebelumnya, status kelembaban media tanam masih dapat melewati batas kapasitas lapang atau berada di bawah titik kritis dengan nilai *error* tertentu. Pengamatan dilakukan dengan mengambil data dari sensor kelembaban media tanam selama 7 hari. Apabila status kelembaban media tanam berada di atas kapasitas lapang atau di bawah titik kritis maka kondisi ini disebut *error* dari sistem kendali. Kemudian *error* ini dihitung menggunakan persamaan (1) untuk mendapatkan nilai rata-rata persentase *error* (Prastono et al., 2023).

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right) 100}{n} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

n = jumlah data

O_i = nilai kelembaban media tanam selama proses pengujian

P_i = nilai kapasitas lapang atau titik kritis

Observasi terhadap pemberian fertigasi juga dilakukan untuk membandingkannya terhadap volume evapotranspirasi standar. Waktu dan durasi proses fertigasi diambil dari data yang dikirimkan pusat sistem kendali kedalam *database*. Kemudian untuk total fertigasi yang diberikan selama satu hari didapat dengan persamaan (2).

$$V = Q \times t \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

V = total volume fertigasi dalam satu hari (ml)

Q = debit *emitter* (ml/detik)

t = lama durasi fertigasi dalam satu hari (detik)

Nilai evapotranspirasi standar (ET₀) dihitung menggunakan persamaan (3) Penman - Monteith yang telah ditentukan oleh FAO dan menjadi acuan dalam SNI 7745:2012 tentang tata cara penghitungan evapotranspirasi tanaman acuan dengan metode Penman - Monteith (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta R_n + \gamma \frac{900}{(T+273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34 U_2)} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana:

Δ = kemiringan kurva tekanan uap air terhadap suhu (kPa/°C)

R_n = radiasi matahari netto di atas permukaan tanaman (MJ/m²/hari)

γ = konstanta psikometrik (kPa/°C)

T = suhu udara rata - rata harian (°C)

U₂ = kecepatan angin pada ketinggian dua meter di atas permukaan tanah (m/s)

e_s = tekanan uap air jenuh (kPa)

e_a = tekanan uap air aktual (kPa)

Untuk melihat perbandingan secara visual volume fertigasi yang diberikan terhadap evapotranspirasi standar yang terjadi, data hasil perhitungan dari persamaan (2) dan (3) diplot ke dalam grafik. Sehingga nantinya dapat diketahui apakah volume fertigasi yang diberikan oleh sistem kendali logika fuzzy telah sesuai dengan evapotranspirasi harian yang terjadi.

b. Pengukuran Limpasan Air dan Nutrisi Selama Proses Fertigasi

Pengukuran limpasan bertujuan untuk mengetahui kinerja sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy dalam mengontrol pemberian fertigasi agar tidak melebihi nilai kapasitas lapang. Pengukuran dilakukan dengan meletakkan ember dibagian bawah rak *polybag* pada pagi hari sebelum proses fertigasi dimulai. Kemudian dilakukan pengukuran volume yang tertampung di dalam ember pada pagi hari berikutnya untuk mengukur jumlah air yang melimpas selama proses fertigasi dilakukan dalam satu hari. Pengamatan limpasan dilakukan pada dua jenis perlakuan yaitu dengan menggunakan sistem kendali logika fuzzy dan tanpa menggunakan sistem kendali sebagai pembanding. Hasil pengamatan lalu diplotkan ke dalam grafik untuk melihat perbedaan nilai limpasan secara visual.

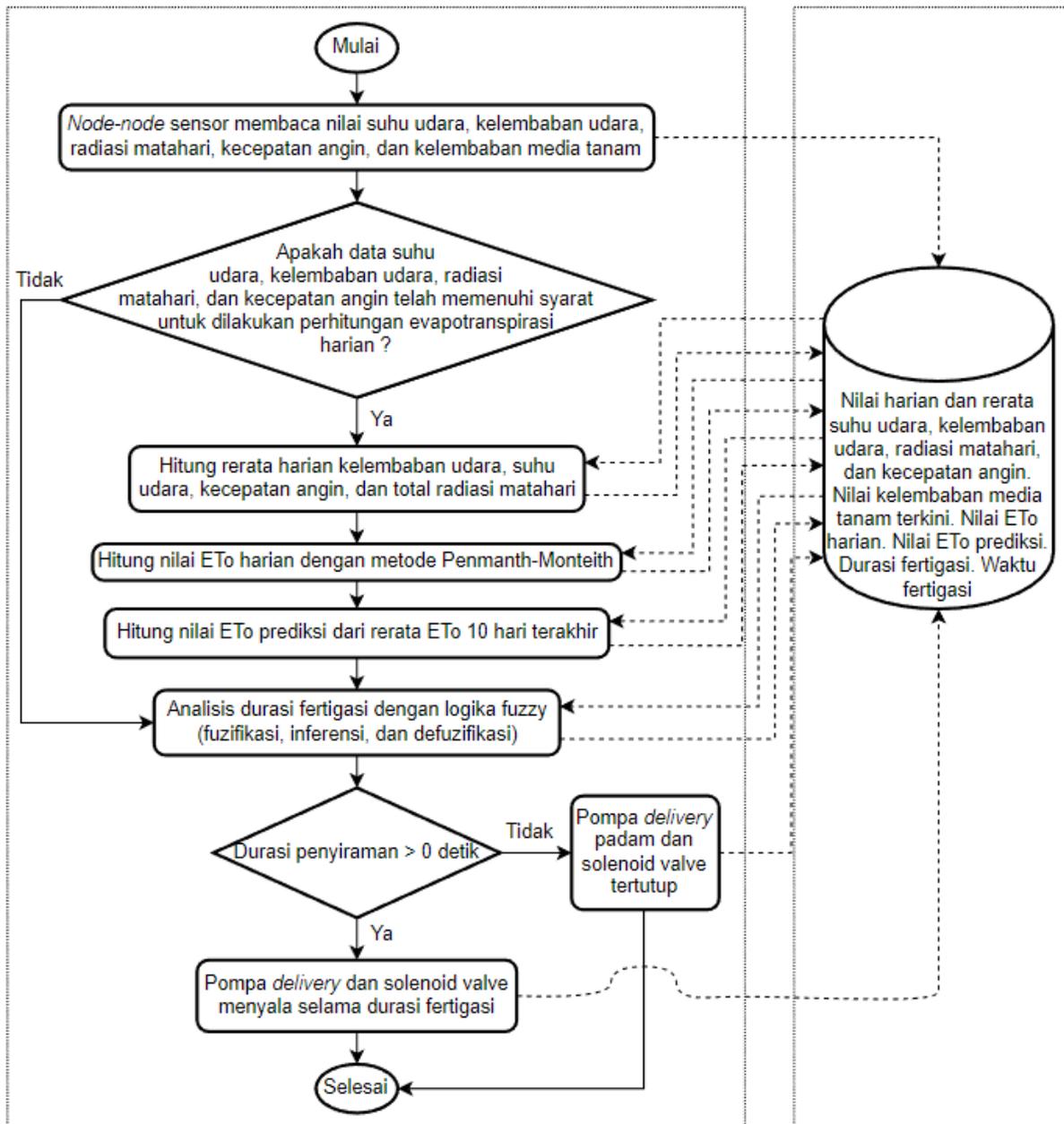
c. Pengukuran Fisiologi Tanaman

Pengukuran fisiologi tanaman dilakukan untuk mengetahui pengaruh antara pemberian fertigasi menggunakan sistem kendali logika fuzzy dengan pemberian fertigasi secara konvensional terhadap pertumbuhan tanaman. Tanaman cabai berumur 2 bulan setelah tanam digunakan sebagai objek pengujian. Pemilihan umur tersebut dilakukan karena pada umur 60 - 70 hari tanaman cabai akan berpindah dari fase vegetatif ke fase generatif (Andani et al., 2020). Oleh karena itu kebutuhan akan irigasi akan relatif lebih banyak (Kusmali et al., 2015). Pengujian dilakukan selama 7 hari dengan parameter pengukuran antara lain jumlah daun, tinggi tanaman, jumlah buah, dan

jumlah bunga. Jumlah daun dihitung secara manual pada daun yang telah mekar sempurna. Tinggi tanaman diukur dengan penggaris dari permukaan media tanam hingga ujung batang. Jumlah bunga dihitung secara manual ketika tanaman memasuki fase pembungaan. Jumlah buah dihitung secara manual pada buah yang telah muncul secara sempurna. Pengukuran dilakukan setiap hari pada Pukul 08.00 WIB. Jumlah sampel tanaman yang digunakan untuk setiap perlakuan adalah 10 tanaman. Sehingga terdapat 20 tanaman selama periode pengujian. Hasil pengukuran kemudian diplot ke dalam grafik untuk melihat perbedaan nilai setiap parameter fisiologi yang telah ditentukan secara visual.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Mekanisme Kerja Sistem Kendali Fertigasi Presisi Berbasis Logika Fuzzy



Gambar 5. Mekanisme kerja sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy

Terdapat beberapa komponen perangkat keras yang digunakan dalam sistem kendali fertigasi presisi pada penelitian ini. Komponen - komponen tersebut terdiri atas: modul

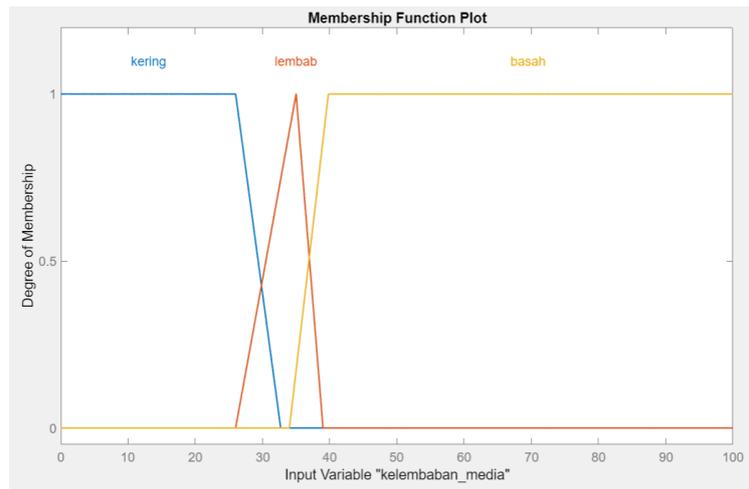
sensor untuk membaca nilai kelembaban media tanam, modul sensor untuk membaca nilai parameter lingkungan dalam perhitungan evapotranspirasi, dan modul *server* yang berfungsi sebagai pusat sistem kendali dan *server database*. Modul *server* juga terhubung dengan pompa air untuk proses pengiriman larutan nutrisi dari tandon penampung nutrisi ke dalam rumah tanaman. Sistem kendali fertigasi yang dirancang bekerja setiap 10 menit. Mekanisme kerja dari sistem kendali fertigasi ini dapat dilihat pada Gambar 5.

Berdasarkan informasi pada Gambar 5, mekanisme kerja dari sistem kendali fertigasi presisi ini dimulai dengan membaca nilai parameter lingkungan dan kelembaban media tanam oleh sensor - sensor yang terpasang pada *node - node* sensor di dalam rumah tanaman. Hasil pembacaan dari setiap *node* sensor kemudian dikirim ke *server database* melalui jaringan *wifi*. Selanjutnya sistem kendali memutuskan, apakah data parameter lingkungan yang diterima telah memenuhi kriteria untuk dilakukan perhitungan evapotranspirasi harian atau belum. Jika telah memenuhi kriteria, maka akan dilakukan perhitungan rerata harian nilai setiap parameter lingkungan. Hasil perhitungan ini kemudian dikirim ke *database*. Nilai rerata harian parameter lingkungan ini kemudian digunakan untuk menghitung nilai evapotranspirasi standar selama satu hari penuh yang telah berlalu. Nilai evapotranspirasi standar ini kemudian dikirim ke *database*. Untuk mendapatkan nilai evapotranspirasi prediksi di hari berikutnya, maka perlu dilakukan perhitungan nilai rerata evapotranspirasi 10 hari terakhir. Nantinya nilai evapotranspirasi prediksi ini yang akan digunakan sebagai parameter input bagi logika fuzzy.

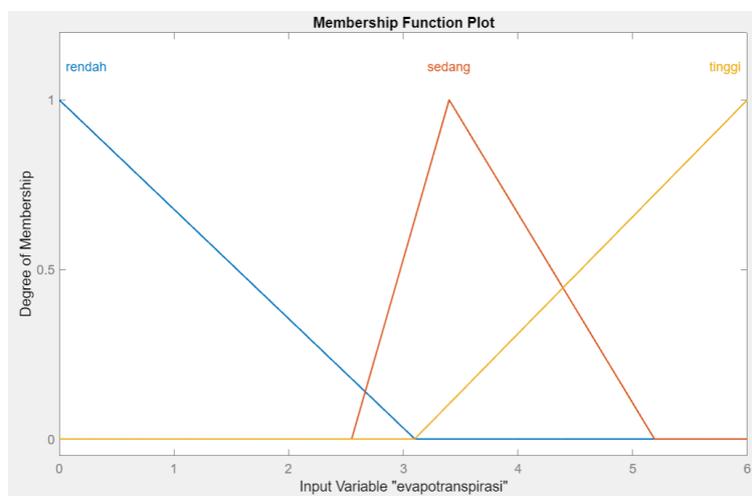
Analisis logika fuzzy dimulai ketika perhitungan evapotranspirasi prediksi selesai dilakukan atau data parameter lingkungan belum lengkap untuk digunakan dalam menghitung nilai evapotranspirasi harian. Sistem kendali mengambil data evapotranspirasi prediksi dan kelembaban media tanam terkini dari *database* sebagai parameter *input* bagi logika fuzzy. Sistem kendali logika fuzzy melakukan proses fuzifikasi, inferensi, dan defuzifikasi untuk mendapatkan nilai durasi fertigasi yang dibutuhkan. Pada proses fuzifikasi, parameter *input* yang terdiri atas evapotranspirasi prediksi dan kelembaban media tanam yang bernilai kuantitatif akan dirubah menjadi variabel linguistik. Seperti rendah, sedang, dan tinggi untuk evapotranspirasi prediksi. Kering, lembab, dan basah untuk kelembaban media tanam. Setelah itu tahap inferensi dilakukan berdasarkan logika *if-and-then* berdasarkan aturan yang telah ditetapkan. Contoh kondisi pada tahap inferensi adalah *if* (kelembaban media tanam tinggi) *and* (evapotranspirasi rendah) *then* (durasi fertigasi mati). Tahap terakhir dari proses pengolahan data dengan logika fuzzy adalah proses defuzifikasi. Tahap ini adalah kebalikan dari proses fuzifikasi, dimana variabel linguistik yang dihasilkan dari proses inferensi akan dirubah menjadi nilai kuantitatif. Contohnya ketika variabel linguistik dari *output* durasi fertigasi adalah mati, maka durasi fertigasi yang dihasilkan sebesar 0 detik. Ketika variabel linguistik dari durasi fertigasi menyatakan cepat, medium, dan lama, maka pompa fertigasi dan *solenoid valve* akan menyala berdasarkan nilai kuantitatif dari durasi fertigasi yang dihasilkan. Sistem kendali fertigasi ini bekerja dengan interval waktu setiap 10 menit. Nilai interval ini berdasarkan atas perubahan kelembaban media tanam yang dapat terjadi secara signifikan.

2. Simulasi Sistem Kendali Fertigasi Presisi Berbasis Logika Fuzzy

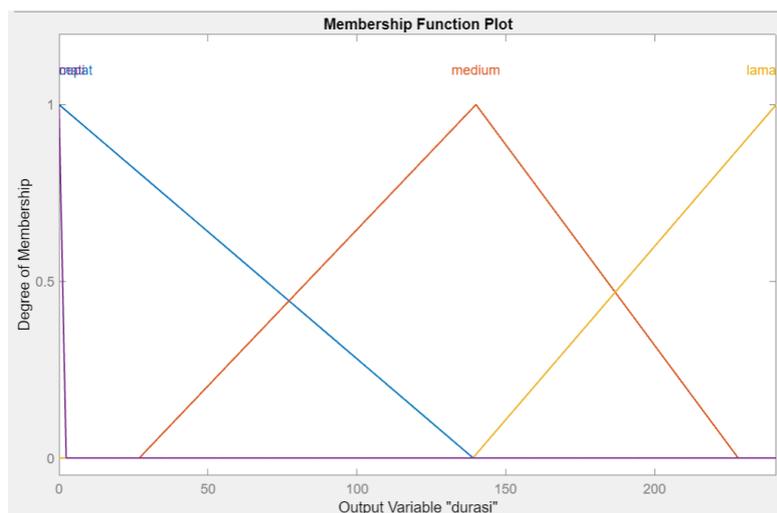
Simulasi sistem kendali dilakukan untuk mendapatkan nilai dan jenis fungsi keanggotaan serta aturan-aturan fuzzy yang tepat agar dapat digunakan dalam aplikasi sistem kendali fertigasi presisi. Nilai fungsi keanggotaan kelembaban media tanam sebagai *fuzzy set input*, fungsi keanggotaan evapotranspirasi sebagai *fuzzy set input*, fungsi keanggotaan durasi fertigasi sebagai *fuzzy set output*, dan aturan fuzzy dari hasil simulasi masing-masing dapat dilihat pada Gambar 6, 7, 8, dan Tabel 1.



Gambar 6. Himpunan keanggotaan kelembaban media tanam sebagai fuzzy set input



Gambar 7. Himpunan keanggotaan evapotranspirasi sebagai fuzzy set input



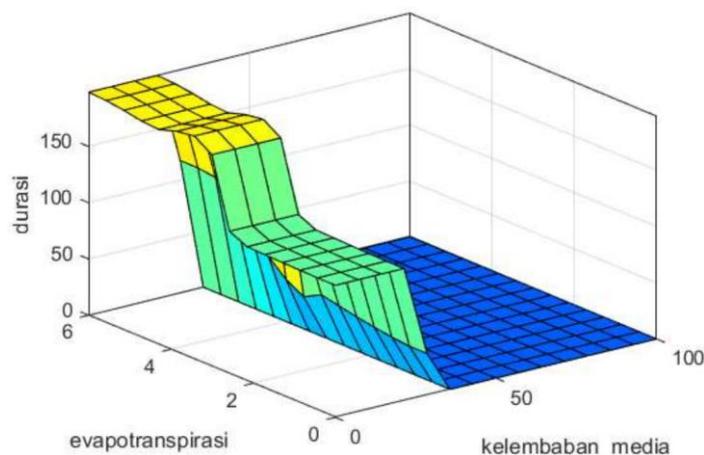
Gambar 8. Himpunan keanggotaan durasi fertigasi sebagai fuzzy set output

Tabel 1. Aturan fuzzy sistem kendali fertigasi

No.	Aturan
1	IF (MC kering) and (ETo tinggi) THEN (Durasi lama)
2	IF (MC lembab) and (ETo tinggi) THEN (Durasi medium)
3	IF (MC basah) and (ETo tinggi) THEN (Durasi mati)
4	IF (MC kering) and (ETo sedang) THEN (Durasi lama)
5	IF (MC lembab) and (ETo sedang) THEN (Durasi cepat)
6	IF (MC basah) and (ETo sedang) THEN (Durasi mati)
7	IF (MC kering) and (ETo rendah) THEN (Durasi medium)
8	IF (MC lembab) and (ETo rendah) THEN (Durasi cepat)
9	IF (MC basah) and (ETo rendah) THEN (Durasi mati)

Pada Gambar 6 – 8 dapat dilihat bahwa nilai fungsi keanggotaan untuk setiap parameter fuzzy (kelembaban media tanam, evapotranspirasi, dan durasi fertigasi) memiliki bentuk yang tidak simetris. Hal ini menunjukkan bahwa dua parameter *input* yaitu kelembaban media tanam dan evapotranspirasi memiliki bobot yang berbeda dalam mempengaruhi nilai *output* yaitu durasi fertigasi. Menurut Ummah et al. (2021) jenis fungsi keanggotaan dan rentang nilai dari setiap fungsi keanggotaan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *output* fuzzy yang diharapkan, sehingga ketika simulasi dilakukan untuk mendapat hasil yang optimum, maka nilai fungsi keanggotaan yang didapat akan berbeda-beda.

Gambar 9 menunjukkan hasil simulasi dimana ketika kelembaban media tanam berada pada 26 – 31%, durasi fertigasi bervariasi menyesuaikan nilai evapotranspirasi. Kemudian ketika kelembaban media tanam > 32% maka proses fertigasi tidak akan terjadi pada berbagai nilai evapotranspirasi. Simulasi tersebut juga menghasilkan tingkat akurasi sebesar 99,84% terhadap target durasi yang diharapkan. Nilai akurasi yang tinggi didapat karena simulasi berada pada kondisi yang ideal, dimana faktor kesalahan oleh pembacaan sensor dapat diabaikan. Setelah didapat hasil yang optimal, nilai fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy yang didapat dari hasil simulasi diunggah ke sistem kendali untuk divalidasi pada lingkungan nyata. Pengujian hasil simulasi pada lingkungan nyata dapat menghasilkan tingkat akurasi yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil simulasi. Hal ini disebabkan oleh kesalahan pembacaan sensor dalam mendeteksi parameter lingkungan. Untuk mengatasi hasil pengujian sistem kendali yang kurang akurat, maka iterasi dari proses simulasi harus dilakukan beberapa kali hingga didapat tingkat akurasi hasil simulasi minimal sebesar 95%.

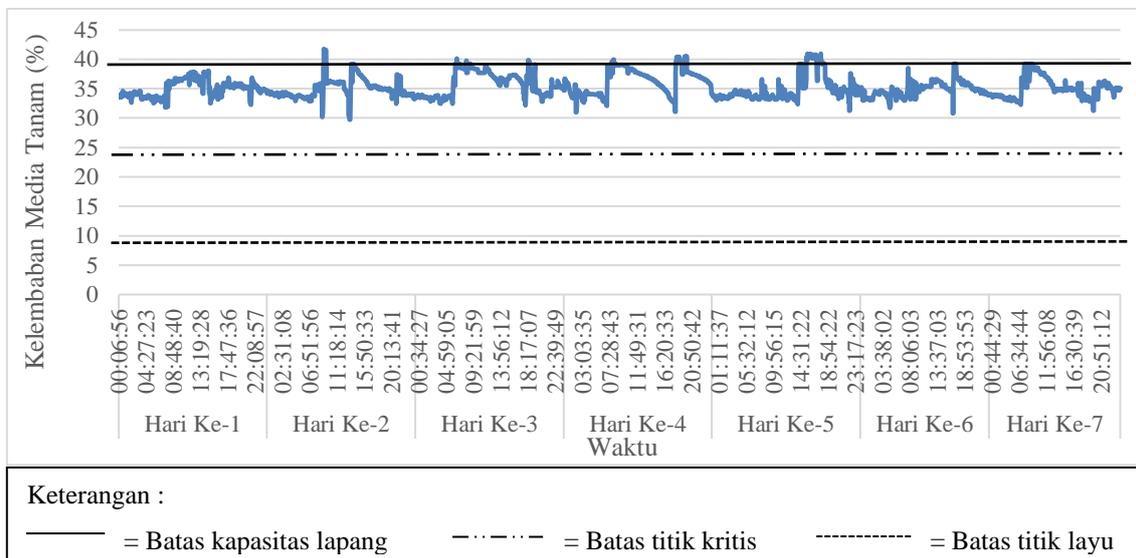


Gambar 9. Hasil simulasi sistem kendali fertigasi berbasis logika fuzzy

3. Pengujian Sistem Kendali Fertigasi Presisi Berbasis Logika Fuzzy

Sistem kendali fertigasi presisi ini memenuhi kriteria desain apabila dapat mempertahankan status kelembaban media tanam pada zona air tersedia, yaitu diantara

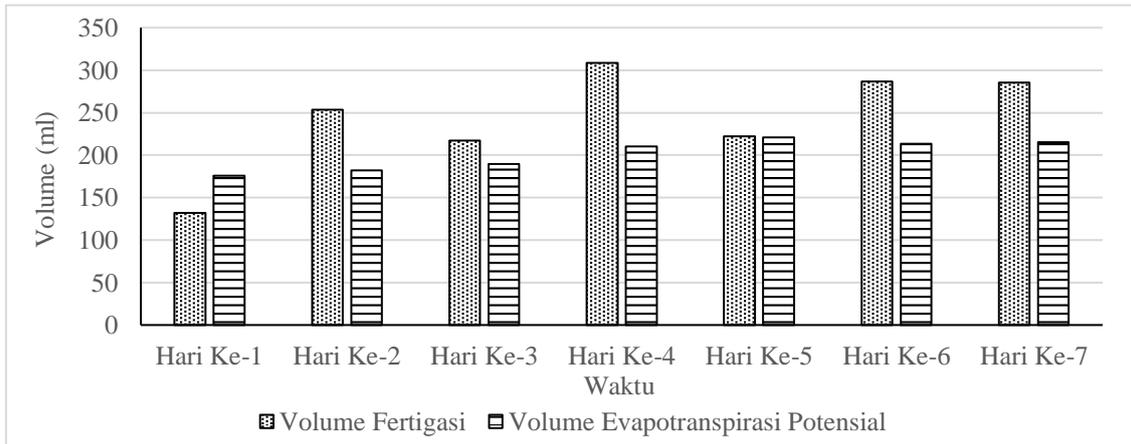
kapasitas lapang dan titik kritis. Nilai titik layu untuk media tanam campuran *cocopeat* dan arang sekam sebesar 9% (Nurlina et al., 2023). Berdasarkan hasil pengujian, kapasitas lapang untuk media tanam campuran *cocopeat* dan arang sekam yang digunakan adalah 39,1%. Pada Gambar 10 dapat dilihat bahwa sistem kendali fertigasi yang dirancang secara umum dapat mempertahankan status kelembaban media tanam berada pada zona air tersedia. Meskipun pada hasil pengujian masih menunjukkan *error*, yang mana pada beberapa periode, kelembaban media tanam berada di atas kapasitas lapang. Hal ini terjadi karena adanya *error* dalam pembacaan sensor kelembaban media tanam. Berdasarkan hasil validasi pembacaan sensor, nilai rata-rata MAPE untuk pembacaan sensor kelembaban media tanam sebesar 5%. Selain itu faktor homogenitas campuran media tanam juga dapat mempengaruhi hasil pengujian. Meskipun demikian, nilai MAPE pada hasil pengujian status kelembaban media tanam ini tergolong sangat kecil yaitu sebesar 1,98%, dan masih sesuai dengan kriteria desain yang dibutuhkan. Nilai *error* ini dapat diartikan bahwa selama 7 hari pengujian hanya selama 1,98% atau 3,32 jam kondisi kelembaban media tanam berada di atas kapasitas lapang. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy ini dapat digunakan untuk mengontrol fertigasi pada tanaman dengan sistem hidroponik.



Gambar 10. Status kelembaban media tanam

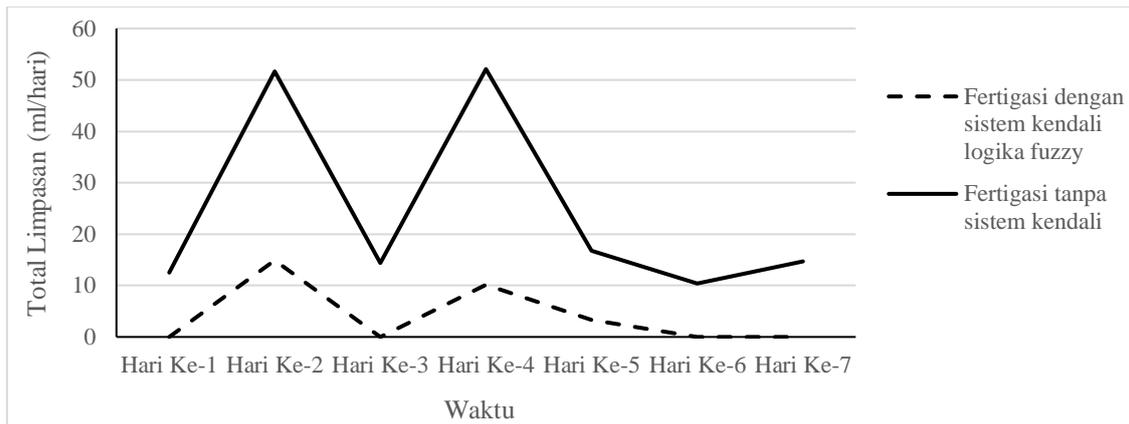
Salah satu cara yang bisa digunakan untuk menentukan volume fertigasi harian yaitu dengan menghitung nilai evapotranspirasi (Amalia et al., 2020). Berdasarkan hasil pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa waktu dan frekuensi pemberian fertigasi berbeda-beda di setiap hari pengujian. Hal ini tergantung pada nilai evapotranspirasi dan status kelembaban media tanam terkini. Selama pengujian total volume fertigasi yang diberikan oleh sistem kendali fertigasi ini berkisar antara 132 - 308,4 ml/hari. Hasil ini sesuai dengan yang dilakukan oleh Aulia et al. (2022), dimana pada kondisi jenis rumah tanaman untuk daerah tropis, kebutuhan fertigasi berdasarkan nilai evapotranspirasi harian berkisar antara 82 - 507 ml/hari. Tentu nilai lamanya durasi dan volume fertigasi ini berbeda setiap harinya, karena hal ini dipengaruhi oleh kondisi iklim lingkungan di dalam rumah tanaman yang berpengaruh langsung terhadap nilai evapotranspirasi dan kelembaban media tanam. Variasi cuaca ekstrim seperti suhu udara yang sangat tinggi pada musim kemarau masih mampu diantisipasi oleh sistem kendali ini. Hal tersebut dikarenakan pada proses simulasi data evapotranspirasi yang digunakan berasal dari data cuaca harian selama lima tahun terakhir (2018 - 2022). Oleh karena itu logika fuzzy yang telah dirancang melalui proses simulasi telah mewakili untuk segala kondisi cuaca.

Nilai fertigasi yang diberikan melalui sistem kendali logika fuzzy juga sedikit melebihi nilai evapotranspirasi standar. Menurut Mahjoor et al. (2016), perbedaan jenis media tanam yang digunakan dalam kegiatan budidaya dapat mengakibatkan perbedaan nilai evapotranspirasi tanaman. Jika dibandingkan dengan media tanam lainnya, evapotranspirasi tanaman yang dihasilkan dengan media *cocopeat* cukup tinggi. Hal ini dikarenakan *cocopeat* termasuk media tanam yang mampu menyerap dan menyimpan air (Shafira et al., 2021). *Cocopeat* mempunyai keunggulan untuk mengikat dan menyimpan air yang sangat kuat melalui pori mikro yang dapat menghambat gerakan air sehingga membuat air tersedia menjadi lebih tinggi (Utami et al., 2023). Hal inilah yang menyebabkan volume fertigasi yang diberikan dapat lebih besar dibandingkan nilai evapotranspirasi yang terjadi.



Gambar 11. Perbandingan volume fertigasi yang dihasilkan sistem kendali logika fuzzy dengan perhitungan volume evapotranspirasi standar

Berdasarkan hasil pada Gambar 12, limpasan yang dihasilkan pada proses fertigasi menggunakan sistem kendali logika fuzzy berada jauh dibawah fertigasi yang dilakukan secara manual. Fertigasi manual dilakukan pada pagi hari (Pukul 07.00 WIB) dan sore hari (Pukul 17.00 WIB) Pemberian fertigasi manual pada pukul 17.00 WIB dilakukan untuk memenuhi kebutuhan air tanaman sebagai akibat dari proses evapotranspirasi dari pagi hingga sore hari. Sementara itu pemberian fertigasi manual pada pukul 07.00 WIB dilakukan untuk memenuhi kebutuhan air tanaman sebagai akibat dari proses transpirasi tanaman pada malam hari (Moreshet et al., 1999). Durasi penyiraman diberikan selama 4 menit dengan total volume fertigasi sebanyak 576 ml/hari. Limpasan yang dihasilkan pada fertigasi manual ini cukup tinggi, rata-rata sebesar 24,66 ml/hari. Hal ini dikarenakan fertigasi yang diberikan tidak menyesuaikan dengan kondisi lingkungan dan kelembaban media tanam. Berbeda dengan pemberian fertigasi dengan sistem kendali logika fuzzy, disini sistem penyiraman dapat beradaptasi menyesuaikan dengan kondisi lingkungan dan kelembaban media tanam, sehingga nilai limpasan rata-rata yang dihasilkan sangat kecil sebesar 4,04 ml/hari.



Gambar 12. Hasil pengukuran total limpasan fertigasi

4. Perbandingan biaya operasional pemberian fertigasi dengan sistem kendali presisi berbasis logika fuzzy dan tanpa sistem kendali

Berdasarkan hasil pengujian selama tujuh hari, rata-rata volume fertigasi yang diberikan oleh sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy per tanaman sebesar 243,6 ml/hari, sedangkan volume fertigasi tanpa sistem kendali sebesar 576 ml/hari. Hasil tersebut menunjukkan efisiensi penggunaan air dan pupuk yang cukup signifikan ketika sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy diterapkan ke tanaman. Berdasarkan hasil perhitungan biaya operasional pada Tabel 2, dapat dilihat bahwa sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy mampu menghemat biaya operasional hingga 50% dibandingkan tanpa menggunakan sistem kendali. Oleh karena itu sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy yang telah dirancang dapat direkomendasikan untuk digunakan dalam mengontrol pemberian fertigasi pada tanaman guna mengurangi biaya produksi.

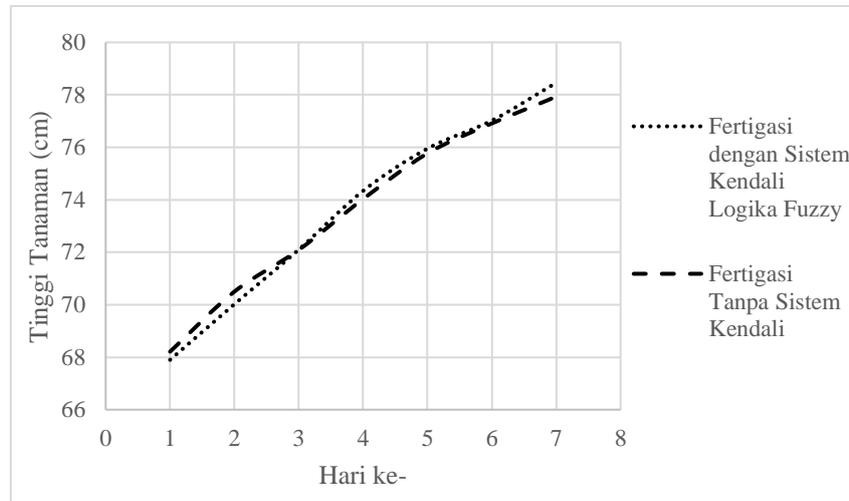
Tabel 2. Perbandingan biaya operasional pemberian fertigasi dengan sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy dan tanpa sistem kendali

No.	Parameter	Fertigasi dengan Sistem Kendali Berbasis Logika Fuzzy	Fertigasi Tanpa Sistem Kendali
1	Rerata durasi nyala pompa fertigasi (detik/hari)	203	480
2	Rerata total volume fertigasi per tanaman (liter/hari)	0.2436	0.576
3	Rerata total volume fertigasi satu unit greenhouse kapasitas 400 tanaman (liter/hari)	97.44	230.4
4	Rerata harga kebutuhan pupuk per hari	Rp7,795	Rp18,432
5	Rerata harga kebutuhan air per hari	Rp487	Rp1,152
6	Rerata total biaya fertigasi per hari	Rp8,282	Rp19,584

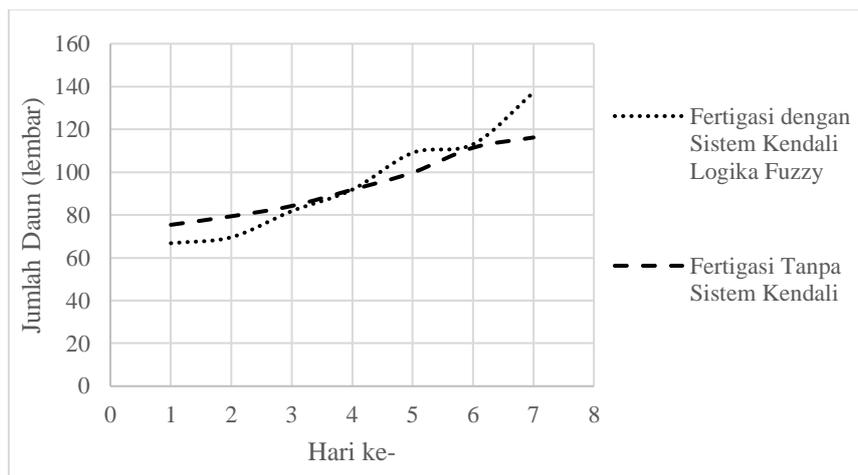
5. Pertumbuhan Fisiologi Tanaman

Berdasarkan hasil pada Gambar 13 dan 14 dapat dilihat bahwa penggunaan sistem kendali logika fuzzy untuk proses fertigasi mampu menambah tinggi tanaman dan jumlah daun tanaman cabai lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan sistem kendali. Selain itu pertumbuhan tinggi tanaman dan jumlah daun tanaman cabai selama observasi menunjukkan laju yang lebih tinggi pada perlakuan dengan menggunakan sistem kendali fertigasi berbasis logika fuzzy, dibandingkan tanpa sistem kendali. Hasil tersebut juga sama dengan yang dilakukan oleh Pezol et al. (2020), dimana tanaman cabai yang diberi fertigasi

otomasi berbasis logika fuzzy mampu memiliki pertumbuhan vegetatif yang lebih baik dibandingkan pemberian fertigasi secara tradisional. Selain itu laju pertumbuhan tinggi tanaman juga lebih besar ketika fertigasi dilakukan dengan sistem kendali, hal ini karena pemberian air dan nutrisi dilakukan sesuai dengan kebutuhan tanaman (Pezol et al., 2020).

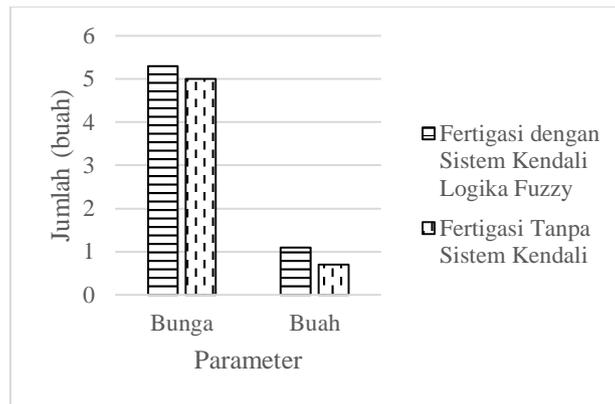


Gambar 13. Perbandingan tinggi tanaman cabai antara menggunakan sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy dengan tanpa sistem kendali



Gambar 14. Perbandingan jumlah daun tanaman cabai antara menggunakan sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy dengan tanpa sistem kendali

Jumlah bunga dan buah menjadi parameter lain yang diukur untuk melihat kinerja sistem kendali dalam memberikan fertigasi pada tanaman. Hal ini karena jumlah buah akan berpengaruh langsung terhadap produksi tanaman. Menurut Virga et al. (2020) pertumbuhan jumlah buah sebanding dengan pertumbuhan tinggi tanaman cabai. Berdasarkan hasil pada Gambar 15, jumlah bunga dan buah yang dihasilkan ketika fertigasi dilakukan menggunakan sistem kendali logika fuzzy sedikit lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan sistem kendali. Hasil ini juga berkorelasi dengan pertumbuhan tinggi tanaman pada Gambar 13, dimana tinggi tanaman pada pemberian fertigasi sedikit lebih besar dibandingkan tanpa sistem kendali. Berdasarkan hasil pengukuran fisiologi tanaman, dapat dikatakan bahwa aplikasi sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy mampu meningkatkan pertumbuhan dan jumlah buah tanaman cabai dibandingkan dengan pemberian fertigasi secara konvensional. Sehingga penggunaan sistem kendali fertigasi presisi tidak hanya mampu meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan air, namun juga dapat meningkatkan produksi tanaman cabai.



Gambar 15. Perbandingan jumlah bunga dan buah tanaman cabai antara menggunakan sistem kendali fertigasi berbasis logika fuzzy dengan tanpa sistem kendali

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Perancangan sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy telah berhasil dilakukan dan memenuhi semua kriteria desain yang telah ditetapkan. Kriteria desain pertama yang berhasil dipenuhi yaitu sistem kendali ini dapat mempertahankan status kelembaban media tanam berada di zona air tersedia, dengan nilai MAPE sebesar 1,98%. Nilai *error* ini mengindikasikan bahwa ketika 7 hari pengujian, selama 3,32 jam kondisi kelembaban media tanam berada di atas kapasitas lapang. Kondisi ini berpotensi untuk terjadinya limpasan yang berdampak pada terbuangnya sumberdaya air dan nutrisi. Kemudian kriteria desain kedua yang berhasil dipenuhi yaitu limpasan yang didapat ketika menggunakan sistem kendali logika fuzzy lebih rendah dibandingkan tanpa menggunakan sistem kendali, dengan rata-rata selisih volume limpasan sebesar 20,61 ml/hari. Hasil simulasi menunjukkan ketika kelembaban media tanam berada pada rentang 26 - 31%, durasi fertigasi bervariasi menyesuaikan nilai evapotranspirasi. Kemudian ketika kelembaban media tanam lebih dari 32% maka proses fertigasi tidak akan terjadi pada berbagai nilai evapotranspirasi. Simulasi tersebut juga menghasilkan tingkat akurasi sebesar 99,84% terhadap target durasi yang diharapkan. Selanjutnya total volume fertigasi yang diberikan oleh sistem kendali fertigasi selama pengujian berkisar antara 132 - 308,4 ml/hari. Lamanya durasi dan volume fertigasi ini berbeda setiap harinya, karena hal ini dipengaruhi oleh kondisi iklim lingkungan di dalam rumah tanaman yang berpengaruh langsung terhadap nilai evapotranspirasi dan kelembaban media tanam. Hasil pengukuran fisiologi tanaman berupa jumlah daun, tinggi tanaman, jumlah buah, dan jumlah bunga menunjukkan jumlah yang lebih banyak dan laju pertumbuhan yang lebih besar ketika fertigasi diberikan dengan sistem kendali logika fuzzy dibandingkan tanpa sistem kendali. Laju pertumbuhan tinggi tanaman dan jumlah daun yang besar akan mendukung pertumbuhan jumlah bunga dan buah yang lebih banyak. Hal ini akan memberikan dampak ekonomi yang baik bagi petani karena potensi produksi akan lebih tinggi. Secara keseluruhan, berdasarkan hasil yang didapat sistem kendali fertigasi presisi berbasis logika fuzzy yang telah dirancang mampu memberikan air dan nutrisi sesuai dengan kondisi lingkungan dan kebutuhan tanaman terkini, khususnya untuk budidaya tanaman dengan sistem hidroponik.

Saran

Hasil pengukuran fisiologi tanaman berupa jumlah daun, tinggi tanaman, jumlah buah, dan jumlah bunga menunjukkan jumlah yang lebih banyak dan laju pertumbuhan yang lebih besar ketika fertigasi diberikan dengan sistem kendali logika fuzzy dibandingkan tanpa sistem kendali, namun nilai yang didapat tidak terlalu signifikan. Hal ini disebabkan

pengujian sistem kendali dan pengukuran fisiologi tanaman hanya dilakukan selama tujuh hari. Oleh karena itu untuk mengetahui pengaruh perkembangan fisiologis tanaman atas pemberian fertigasi dengan sistem kendali berbasis logika fuzzy, maka pengujian dapat dilakukan dari awal masa tanam hingga panen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor yang telah memfasilitasi pelaksanaan penelitian ini.

PENDANAAN

Penelitian ini didanai oleh Lembaga Pengelola Dana Pendidikan Kementerian Keuangan RI melalui program pendanaan Riset Inovatif Produktif (RISPRO) Tahun 2023.

CONFLICT OF INTEREST

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dengan pihak mana pun.

DAFTAR REFERENSI

- Abioye, E. A., Abidin, M. S. Z., Mahmud, M. S. A., Buyamin, S., Ishak, M. H. I., Rahman, M. K. I. A., Otuoze, A. O., Onotu, P., & Ramli, M. S. A. (2020). A Review on Monitoring and Advanced Control Strategies for Precision Irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105441>
- Alamouti, M. Y., Khafajeh, H., Javadi, A., & Dehghanisani, H. (2023). Design a solar system for fuzzy control of intelligent irrigation system. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 25(1), 14–26. <http://www.cigrjournal.org>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- Amalia, R., Waspodo, R. S. B., & Setiawan, B. I. (2020). The Design of Evaporative Irrigation System for Pepper Plants. *Jurnal Irigasi*, 15(1), 45–54. <https://doi.org/10.31028/ji.v15.i1.45-54>
- Andani, R., Rahmawati, M., & Hayati, M. (2020). Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Cabai (*Capsicum annum* L.) Akibat Perbedaan Jenis Media Tanam dan Varietas Secara Hidroponik Substrat. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 5(2), 1–10.
- Ariani, F., & Endra, R. Y. (2013). IMPLEMENTATION OF FUZZY INFERENCE SYSTEM WITH TSUKAMOTO METHOD FOR STUDY PROGRAMME SELECTION. 2nd International Conference on Engineering and Technology Development, 189–200.
- Aulia, A., Wardani, I. K., & Ichniarsyah, A. N. (2022). Calculation of Actual Evapotranspiration (ET_c) of Melon Plants on Vegetative Phase in the Greenhouse. *Jurnal Keteknikaan Pertanian Tropis Dan Biosistem*, 10(3), 170–180. <https://doi.org/10.21776/ub.jkptb.2022.010.03.01>
- Chen, R., Kang, S., Hao, X., Li, F., Du, T., Qiu, R., & Chen, J. (2015). Variations in tomato yield and quality in relation to soil properties and evapotranspiration under greenhouse condition. *Scientia Horticulturae*, 197, 318–328. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2015.09.047>
- Hermawan, W., & Yanuar, R. K. (2023). Design and Performance of an Automatic Laying Hen Feeding Machines in Cage-Type Cage. *Jurnal Keteknikaan Pertanian*, 11(3), 358–374. <https://doi.org/10.19028/jtep.011.3.358-374>
- Jaiswal, S., & Ballal, M. S. (2020). Fuzzy Inference Based Irrigation Controller for Agricultural Demand Side Management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105537>

- Krishnan, R. S., Julie, E. G., Robinson, Y. H., Raja, S., Kumar, R., Thong, P. H., & Son, L. H. (2020). Fuzzy Logic based Smart Irrigation System using Internet of Things. *Journal of Cleaner Production*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119902>
- Kusmali, Muh., Munir, A., & Faridah, S. N. (2015). Aplikasi Irigasi Tetes Pada Tanaman Cabe Merah di Kabupaten Enrekang. *Jurnal AgriTechno*, 8(2), 140-148.
- Mahjoor, F., Ghaemi, A. A., & Golabi, M. H. (2016). Interaction Effects of Water Salinity and Hydroponic Growth Medium on Eggplant Yield, Water-use Efficiency, and Evapotranspiration. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2), 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.04.001>
- Moreshet, S., Yao, C., Aloni, B., Karni, L., Fuchs, M., & Stanghellini, C. (1999). Environmental factors affecting the cracking of greenhouse-grown bell pepper fruit. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 74(1), 6-12. <https://doi.org/10.1080/14620316.1999.11511063>
- Navinkumar, T. M., Kumar, R. R., & Gokila, P. V. (2021). Application of Artificial Intelligence Techniques in Irrigation and Crop Health Management for Crop Yield Enhancement. *Materials Today: Proceedings*, 45, 2248-2253. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.227>
- Nugroho, C. A., & Setiawan, A. W. (2022). Pengaruh Frekuensi Penyiraman dan Volume Air Terhadap Pertumbuhan Sawi Pakcoy Pada Media Tanam Campuran Arang Sekam dan Pupuk Kandang. *Agrium*, 25(1), 12-23. <https://doi.org/10.30596/agrium.v25i1.8471>
- Nurlina, Swardji, & Kusnarta, I. (2023). Effect of Plant Media (Cocopeat and Vermicompos) on the Growth and Years of Porang (*Amorhophallus muelleri*) in Lombok Utara District. *Journal of Soil Quality and Management*. http://eprints.unram.ac.id/34790/2/JURNAL%20Nurlina_C1B018033.pdf
- Pezol, N. S., Adnan, R., & Tajjudin, M. (2020). Design of an Internet of Things (Iot) Based Smart Irrigation and Fertilization System Using Fuzzy Logic for Chili Plant. 2020 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems, 69-73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/I2CACIS49202.2020.9140199>
- Prastono, H. (2023). Sistem Kendali Fertigasi untuk Budidaya Tanaman Secara Hidroponik Dalam Rumah Tanaman [IPB University]. <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/133652>
- Prastono, H., Solahudin, M., & Supriyanto. (2023). Evaluation of Nutrient Dosing Methods for Hydroponic Crop Cultivation. *Jurnal Keteknikaan Pertanian*, 11(3), 279-293. <https://doi.org/10.19028/jtep.011.3.279-293>
- Radhika, C., & Parvathi, R. (2016). Intuitionistic fuzzification functions. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 12(2), 1211-1227. <http://www.ripublication.com/gjpam.htm>
- Setiowati, S., Wardhani, R. N., Riandini, Agustina Siregar, E. B., Saputra, R., & Sabrina, R. A. (2022). Fertigation Control System on Smart Aeroponics using Sugeno's Fuzzy Logic Method. *Proceedings - 2022 8th International Conference on Science and Technology, ICST 2022*. <https://doi.org/10.1109/ICST56971.2022.10136304>
- Shafira, W., Akbar, A. A., & Saziati, O. (2021). Penggunaan Cocopeat Sebagai Pengganti Topsoil Dalam Upaya Perbaikan Kualitas Lingkungan di Lahan Pascatambang di Desa Toba, Kabupaten Sanggau. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19(2), 432-443. <https://doi.org/10.14710/jil.19.2.432-443>
- Sharma, S., & Obaid, A. J. (2020). Mathematical modelling, analysis and design of fuzzy logic controller for the control of ventilation systems using MATLAB fuzzy logic toolbox. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 23(4), 843-849. <https://doi.org/10.1080/09720502.2020.1727611>

- Silalahi, L. M., Jatikusumo, D., Budiyanto, S., Silaban, F. A., Simanjuntak, I. U. V., & Rochendi, A. D. (2022). Internet of things implementation and analysis of fuzzy Tsukamoto in prototype irrigation of rice. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(6), 6022–6033. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i6.pp6022-6033>
- Sumarni, E., Soesanto, L., Farid, N., & Baroroh, H. N. (2019). Potensi Pertumbuhan Vegetatif Purwoceng Pada Budidaya Menggunakan Irigasi Tetes dan Nutrient Film Technique (NFT) Dalam Rangka Mempertahankan Bahan Baku Obat Khas Daerah. *Prosiding Seminar Nasional LPPM Unsoed*, 161–169. <http://www.jurnal.lppm.unsoed.ac.id/ojs/index.php/Prosiding/article/view/801>
- Touati, F., Al-Hitmi, M., Benhmed, K., & Tabish, R. (2013). A Fuzzy Logic Based Irrigation System Enhanced with Wireless Data Logging Applied to The State of Qatar. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98, 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.08.018>
- Ummah, I., Yannuansa, N., & Mufarrihah, I. (2021). Pengaruh Penentuan Domain, Fungsi Keanggotaan Dan Rule Dalam Membangun Sistem Fuzzy. *Tecnoscienza*, 6(1), 165–175. <https://ejournal.kahuripan.ac.id/index.php/TECNOSCIENZA/article/download/607/410/1705>
- Utami, D. N., Kusumastuti, E., Sudiana, N., Rahayu, B., Hidayat, N., Sulistiawan, I. N., Purnomo, A., Atang, & Sittadewi, E. H. (2023). Characteristics of Water Storage Capacity and Water Storage Efficiency of 'Biotextile' Growing Medium for Erosion Resistance. *Berkala Ilmiah Biologi*, 14(1), 38–47. <https://doi.org/10.22146/bib.v14i1.5891>
- Virga, G., Licata, M., Consentino, B. B., Tuttolomondo, T., Sabatino, L., Leto, C., & La Bella, S. (2020). Agro-morphological characterization of sicilian chili pepper accessions for ornamental purposes. *Plants*, 9(10), 1–14. <https://doi.org/10.3390/plants9101400>