

Rancang Bangun Sistem Monitoring Hidroponik NFT Pada Tanaman Selada Menggunakan Fuzzy Mamdani

Hanif Azhar Ramadhan^{1*}, Mufti Ari Bianto¹, Bagus Dwi Saputra¹

¹Program Studi Teknik Komputer, Fakultas Sains Teknologi Pendidikan, Universitas Muhammadiyah Lamongan, Lamongan

*hanifazhar78@gmail.com

Abstrak— Budidaya tanaman selada pada sistem hidroponik *Nutrient Film Technique* memerlukan pengendalian kondisi larutan nutrisi secara tepat agar pertumbuhan tanaman berlangsung optimal. Parameter seperti derajat keasaman, konduktivitas listrik, total padatan terlarut, dan suhu air memiliki pengaruh langsung terhadap kemampuan tanaman dalam menyerap unsur hara. Perubahan nilai parameter tersebut dapat terjadi secara dinamis sehingga pemantauan manual dinilai kurang efektif untuk mendukung pengambilan keputusan secara cepat dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem *monitoring* kondisi hidroponik berbasis *Internet of Things* dengan menerapkan metode *Fuzzy Mamdani* untuk menganalisis kondisi larutan nutrisi dan memberikan rekomendasi tindakan secara adaptif. Sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler *ESP32*, sensor derajat keasaman, sensor konduktivitas listrik dan total padatan terlarut, sensor suhu air, *backend server*, *Firestore*, serta aplikasi bergerak berbasis *Flutter*. Sistem menganalisis empat parameter utama secara simultan, yaitu derajat keasaman, konduktivitas listrik, total padatan terlarut, dan suhu air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu membaca, memproses, dan mengirimkan data sensor secara *real-time* ke aplikasi pengguna dengan delay pengiriman data berkisar 1–3 detik. Hasil kalibrasi menunjukkan nilai *Mean Absolute Error sensor* derajat keasaman sebesar 0,050 dan sensor suhu sebesar 0,943. Pengujian pada lima skenario kondisi larutan menunjukkan bahwa metode *Fuzzy Mamdani* mampu menghasilkan rekomendasi tindakan yang sesuai terhadap perubahan parameter yang terjadi. Sistem yang dikembangkan dinilai mampu mendukung pemantauan kondisi hidroponik secara lebih efektif, adaptif, dan terintegrasi.

Kata Kunci— *ESP32*, *Flutter*, *Fuzzy Mamdani*, *hidroponik*, *Internet of Things*, *monitoring*, *selada*

DOI: 10.22441/jte.2026.v17i2.001

I. PENDAHULUAN

Budidaya tanaman selada memerlukan pengelolaan lingkungan tumbuh yang stabil agar pertumbuhan dan kualitas hasil panen tetap optimal. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah hidroponik *Nutrient Film Technique (NFT)*, yaitu sistem budidaya tanpa tanah yang memanfaatkan aliran tipis larutan nutrisi secara kontinu pada area perakaran [1], [2]. Sistem ini dinilai efisien dalam penggunaan air dan nutrisi serta sesuai diterapkan pada tanaman daun berumur pendek seperti selada [3]. Sensitivitas sistem *NFT* terhadap perubahan kondisi larutan nutrisi juga tergolong tinggi karena seluruh proses penyerapan unsur hara sangat bergantung pada kualitas air yang bersirkulasi di dalam sistem [4].

Parameter utama yang menentukan keberhasilan budidaya hidroponik *NFT* meliputi derajat keasaman, konduktivitas listrik, total padatan terlarut, dan suhu air [5]. Keempat parameter tersebut saling berkaitan dan berpengaruh langsung terhadap ketersediaan unsur hara, aktivitas fisiologis akar, serta kestabilan lingkungan perakaran. Ketidakseimbangan derajat keasaman dapat menghambat penyerapan unsur tertentu, nilai konduktivitas listrik dan total padatan terlarut yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat menyebabkan larutan nutrisi tidak sesuai kebutuhan tanaman, sedangkan suhu air yang tidak ideal dapat menurunkan kadar oksigen terlarut dan mengganggu metabolisme akar [6]. Kompleksitas hubungan antarparameter tersebut menjadikan proses pemantauan kondisi larutan nutrisi sebagai aspek yang sangat penting dalam sistem hidroponik *NFT* [7].

Pemantauan kondisi larutan nutrisi secara manual memiliki beberapa keterbatasan, terutama pada aspek kontinuitas, kecepatan *respons*, dan efisiensi operasional. Perubahan parameter dapat terjadi sewaktu-waktu akibat penguapan, penyerapan nutrisi oleh tanaman, perubahan suhu lingkungan, maupun sirkulasi larutan yang tidak stabil [8]. Kondisi tersebut menyebabkan pengguna perlu melakukan pengukuran secara berkala agar gangguan terhadap pertumbuhan tanaman dapat dideteksi lebih dini. Pendekatan manual sering kali kurang efektif karena membutuhkan kehadiran fisik pengguna di lokasi dan tidak selalu mampu memberikan *respons* cepat terhadap perubahan kondisi sistem [9]. Kebutuhan tersebut mendorong penerapan sistem *monitoring* berbasis *Internet of Things* yang mampu membaca data sensor secara kontinu, mengirimkan informasi melalui jaringan *internet*, dan menampilkan kondisi sistem secara *real-time* pada antarmuka pengguna [10].

Pengembangan sistem *monitoring* hidroponik berbasis *Internet of Things* telah banyak dilakukan, khususnya melalui pemanfaatan mikrokontroler *ESP32* yang memiliki kemampuan pemrosesan data dan konektivitas nirkabel terintegrasi [11]. Sistem semacam ini umumnya telah mampu melakukan pembacaan parameter lingkungan dan menampilkan data pada antarmuka jarak jauh [12]. Keterbatasan utama dari sebagian penelitian terdahulu terletak pada belum adanya mekanisme analisis cerdas yang mampu menerjemahkan data sensor menjadi rekomendasi tindakan yang adaptif [13]. Beberapa penelitian lain telah menerapkan logika *fuzzy mamdani* untuk pengendalian hidroponik, namun masih berfokus pada satu atau dua parameter, seperti suhu air, derajat keasaman, atau total padatan terlarut [14], [15]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa integrasi analisis simultan terhadap empat parameter utama dalam satu sistem *monitoring* dan rekomendasi masih belum banyak dikembangkan secara komprehensif [16].

Metode *Fuzzy Mamdani* dipandang sesuai untuk diterapkan pada sistem hidroponik karena mampu menangani kondisi yang bersifat dinamis, bertahap, dan tidak selalu dapat direpresentasikan secara tegas melalui batas tetap [17]. Pendekatan ini memungkinkan nilai numerik *sensor* diterjemahkan ke dalam variabel linguistik sehingga sistem dapat menghasilkan rekomendasi tindakan yang lebih fleksibel dan mendekati cara pengambilan keputusan manusia [18]. Penerapan metode tersebut menjadi relevan pada budidaya hidroponik *NFT* karena perubahan kondisi larutan nutrisi tidak selalu terjadi secara ekstrem, tetapi sering kali berupa fluktuasi bertahap yang tetap memerlukan tindakan korektif [19]. Integrasi antara *sensor multiparameter*, mikrokontroler *ESP32*, komunikasi data berbasis *internet*, dan metode *Fuzzy Mamdani* berpotensi menghasilkan sistem monitoring yang tidak hanya informatif, tetapi juga fungsional sebagai pendukung keputusan bagi pengguna [20].

Penelitian ini menawarkan kebaruan pada integrasi empat parameter utama, yaitu derajat keasaman, konduktivitas listrik, total padatan terlarut, dan suhu air, ke dalam satu sistem *monitoring* dan rekomendasi berbasis *Internet of Things*. Sistem dirancang menggunakan *ESP32*, *sensor multiparameter*, *backend server*, *Firebase*, dan aplikasi *mobile* berbasis *Flutter* untuk mendukung pemantauan kondisi larutan nutrisi secara real-time. Metode *Fuzzy Mamdani* diterapkan sebagai sistem rekomendasi untuk menganalisis kondisi larutan dan memberikan tindakan korektif yang sesuai terhadap perubahan parameter yang terjadi. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem *monitoring* hidroponik *NFT* tanaman selada serta mengimplementasikan metode *Fuzzy Mamdani* untuk menghasilkan rekomendasi tindakan yang adaptif dan terintegrasi.

II. METODE PENELITIAN

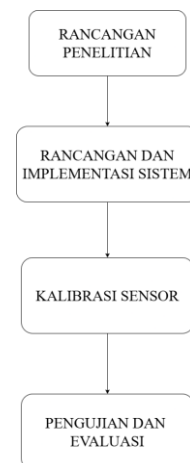
A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan rancangan eksperimental terapan (*applied experimental design*) dengan pendekatan rancang bangun sistem. Rancangan ini digunakan untuk mengembangkan, mengimplementasikan, dan menguji sistem *monitoring* kondisi larutan nutrisi pada hidroponik *Nutrient Film Technique* tanaman selada berbasis *Internet of Things* dengan penerapan metode *Fuzzy Mamdani*. Fokus penelitian diarahkan pada kemampuan sistem dalam membaca parameter lingkungan, mengirimkan data secara *real-time*, serta menghasilkan rekomendasi tindakan berdasarkan kondisi larutan nutrisi.

Prosedur penelitian secara keseluruhan diilustrasikan pada Gambar 1, yang menggambarkan urutan kegiatan mulai dari rancangan penelitian, perancangan sistem, kalibrasi *sensor*, pengujian sistem serta evaluasi sistem.

Pendekatan ini dipilih karena sesuai untuk menghasilkan sistem *monitoring* yang tidak hanya berfungsi secara teknis, tetapi juga dapat dievaluasi performanya berdasarkan data hasil pengujian. Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data hasil pembacaan *sensor* dan data evaluasi sistem. Data hasil pembacaan *sensor* meliputi derajat keasaman, konduktivitas listrik, total padatan terlarut, dan suhu air. Data evaluasi meliputi akurasi *sensor*, delay pengiriman data, stabilitas *parameter*,

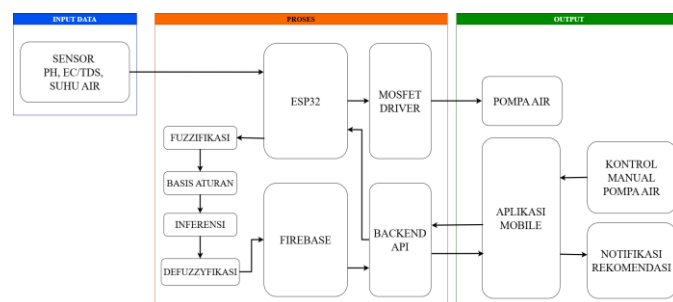
serta kesesuaian keluaran metode *Fuzzy Mamdani* terhadap kondisi larutan nutrisi.



Gambar 1. Alur Prosedur Penelitian

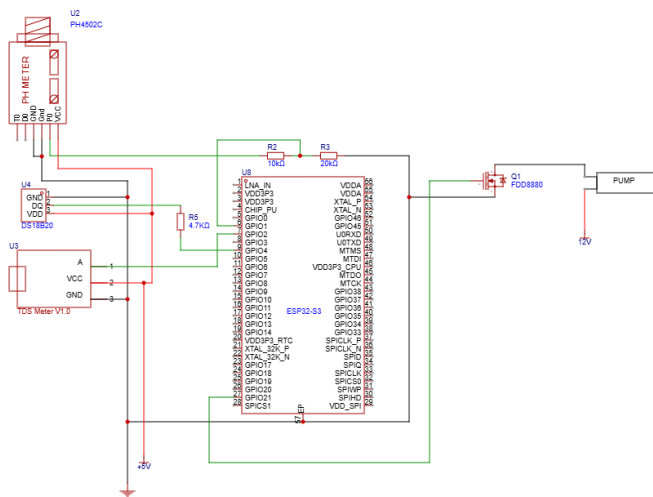
B. Perancangan dan Implementasi Sistem

Rancangan sistem dilakukan pada aspek perangkat keras, perangkat lunak. Sistem dirancang untuk memantau empat *parameter* utama pada hidroponik *NFT*, yaitu derajat keasaman, konduktivitas listrik, total padatan terlarut, dan suhu air. Parameter tersebut dipilih karena berpengaruh langsung terhadap kualitas larutan nutrisi dan pertumbuhan tanaman selada.



Gambar 2. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem pada Gambar 2 disusun dalam tiga bagian utama, yaitu *input*, *proses*, dan *output*. Bagian *input* terdiri atas *sensor* derajat keasaman (*pH*), konduktivitas listrik atau total padatan terlarut (*EC/TDS*), dan suhu air yang berfungsi membaca kondisi aktual larutan nutrisi pada sistem hidroponik *NFT*. Data hasil pembacaan *sensor* selanjutnya diproses oleh mikrokontroler *ESP32* melalui tahapan metode *Fuzzy Mamdani* yang meliputi fuzzifikasi, basis aturan, inferensi, dan defuzzifikasi untuk menghasilkan keputusan atau rekomendasi tindakan. Pada tahap pemrosesan, sistem juga terintegrasi dengan *Firebase* dan *backend API* untuk mendukung pengiriman, penyimpanan, dan sinkronisasi data secara *real-time*. Bagian *output* sistem berupa pengendalian pompa air melalui modul *MOSFET driver*, tampilan data *monitoring* pada aplikasi *mobile flutter*, fitur kontrol manual pompa air, serta notifikasi rekomendasi kepada pengguna berdasarkan kondisi larutan nutrisi yang terdeteksi. Gambar 3 menunjukkan detail lengkap untuk koneksi *pin-to-pin* antar komponen perangkat keras.



Gambar 3. Diagram Pengkabelan Perangkat Keras

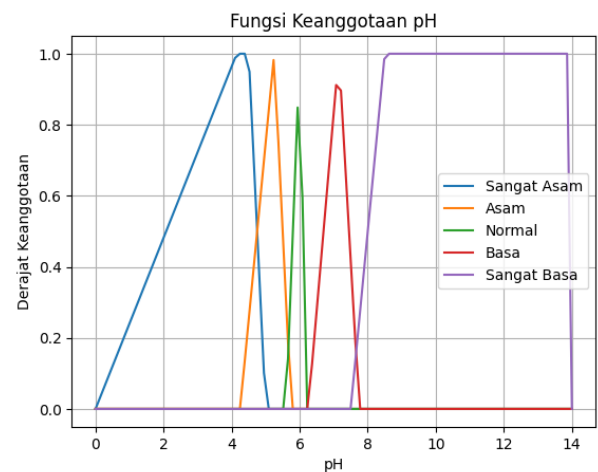
Gambar 3 menunjukkan diagram pengkabelan perangkat keras sistem *monitoring* hidroponik *NFT* yang terdiri atas *ESP32*, *sensor* derajat keasaman, *sensor* konduktivitas listrik dan total padatan terlarut, *sensor* suhu air, modul *MOSFET driver*, dan pompa air *DC*. *ESP32* berfungsi sebagai pusat kendali untuk membaca data *sensor*, memproses data awal, serta mengirimkannya ke sistem *backend* dan aplikasi *mobile* melalui jaringan internet. *Sensor* derajat keasaman, *sensor* konduktivitas listrik/total padatan terlarut dan *sensor* suhu air *DS18B20* dihubungkan ke pin *analog*. Modul *MOSFET driver* digunakan untuk mengendalikan pompa air secara aman sebagai bagian dari sistem sirkulasi larutan nutrisi. Konfigurasi ini memungkinkan proses *monitoring* dan pengendalian dasar sistem dilakukan secara terintegrasi.

Perangkat lunak sistem terdiri atas logika *fuzzy* *mamdani*, *backend server* untuk pengelolaan dan penyimpanan data, *Firestore* untuk sinkronisasi data, serta *Flutter* sebagai *platform* pengembangan aplikasi *mobile*. Metode *Fuzzy Mamdani* diterapkan untuk mengolah *parameter* hidroponik dan menghasilkan rekomendasi adaptif.

Alur *Fuzzy mamdani* dimulai dengan fuzzifikasi, basis aturan, inferensi dan defuzzifikasi. Tahap pertama ialah fuzzifikasi merupakan proses konversi nilai *input crisp* menjadi derajat keanggotaan dalam himpunan *fuzzy*. Pada penelitian ini, setiap *parameter input* direpresentasikan dalam bentuk fungsi keanggotaan berbasis triangular dan *trapezoidal* (1).

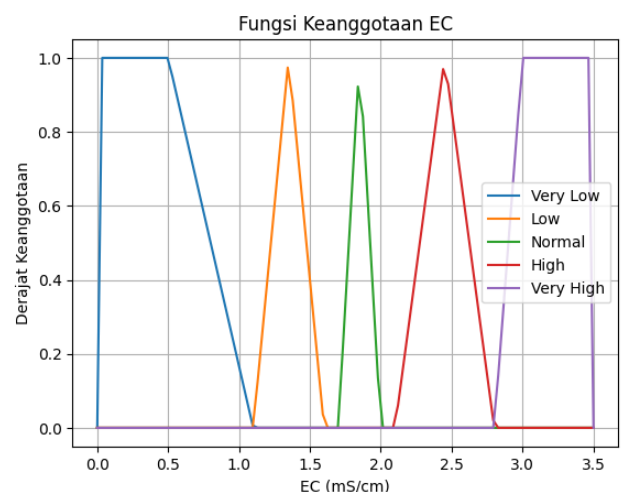
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x < d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (1)$$

Sistem ini menggunakan empat variabel masukan: *pH*, konduktivitas listrik (*EC*) atau total padatan terlarut (*TDS*), dan suhu, serta lima variabel *output*: Sangat kurang, Kurang, Ideal, Tinggi, Sangat tinggi. Berikut ini adalah derajat keanggotaan pada keempat *input parameter* dan kelima *output* tersebut:



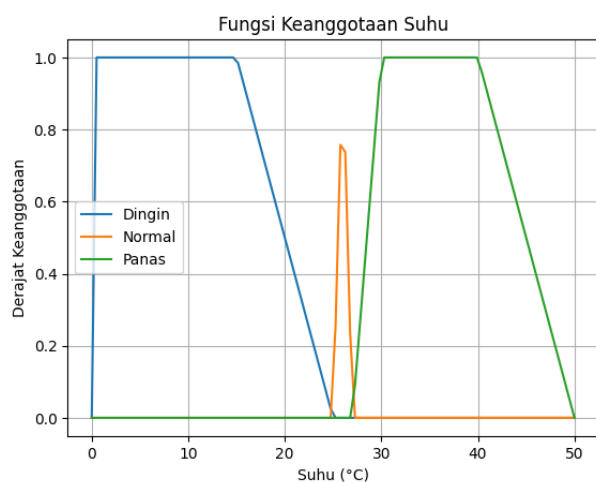
Gambar 4. Grafik Keanggotaan Fuzzy Parameter pH

Gambar 4 menunjukkan grafik keanggotaan fuzzyfikasi pada *parameter pH* dengan rentang ideal berkisar (5.6-6.2): Sangat Asam (0.0, 4.15, 4.50, 5.0), Asam (4.25, 5.25, 5.75), Normal (5.60, 6.00, 6.20), Basa (6.25, 7.15, 7.75), Sangat Basa (7.50, 8.50, 14.0, 14.0) [18].



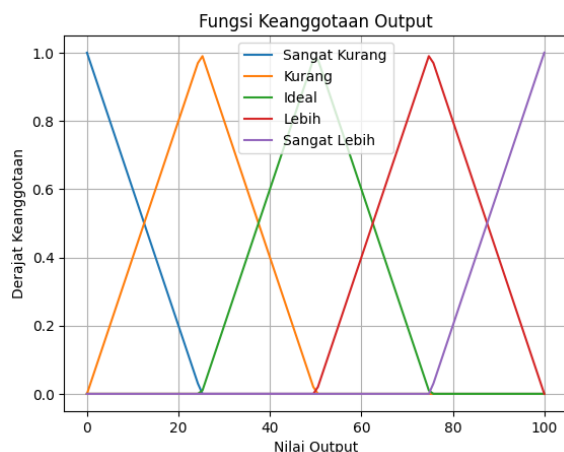
Gambar 5. Grafik Keanggotaan Fuzzy Parameter EC

Gambar 5 tersebut adalah grafik dari *parameter EC* dengan rentang ideal berkisar (1.7-2.4): Sangat Rendah (0, 0, 0.5, 1.1), Rendah (1.1, 1.35, 1.6), Normal (1.7, 1.85, 2.0), Tinggi 2.1, 2.45, 2.8), Sangat Tinggi (2.8, 3.0, 3.5, 3.5) [21].



Gambar 6. Grafik Keanggotaan Fuzzy Parameter Suhu Air

Grafik derajat keanggotaan *fuzzy* pada Gambar 6 pada parameter suhu, rentang idealnya berkisar (25-27): Dingin (0, 0, 15, 25), Ideal (25, 26, 27), Panas (27, 30, 40, 50) [14].



Gambar 7. Grafik Himpunan Segitiga Fuzzy Output

Gambar 7 menunjukkan grafik himpunan segitiga dari *output*: Sangat Kurang (-25, 0, 25), Kurang (0, 25, 50), Ideal (25, 50, 75), Lebih (50, 75, 100), Sangat Lebih (75, 100, 125).

Tahap kedua adalah penentuan basis aturan, penelitian ini memakai basis aturan sebanyak 22 aturan yang dirumuskan berdasarkan pengetahuan para ahli. Secara umum, kondisi normal dari semua parameter menghasilkan keluaran yang ideal, sedangkan kondisi ekstrem (misalnya, *pH* atau *EC* yang sangat rendah/tinggi) menghasilkan rekomendasi yang sangat rendah atau sangat tinggi. Tabel 1 menunjukkan basis aturan *fuzzy*, antara lain:

Tabel 1. Basis aturan fuzzy

Nomor Aturan	Aturan
R1	IF pH Normal AND EC Normal AND TDS Optimal AND Suhu Normal THEN Kondisi Ideal
R2	IF pH Sangat Rendah THEN Kondisi Sangat Lebih

R3	IF pH Sangat Tinggi THEN Kondisi Sangat Kurang
R4	IF pH Rendah AND EC Normal THEN Kondisi Lebih
R5	IF pH Tinggi AND EC Normal THEN Kondisi Kurang
R6	IF EC Sangat Rendah THEN Kondisi Sangat Lebih
R7	IF EC Sangat Tinggi THEN Kondisi Sangat Kurang
R8	IF EC Rendah AND TDS Rendah THEN Kondisi Lebih
R9	IF EC Tinggi AND TDS Tinggi THEN Kondisi Kurang
R10	IF TDS Rendah AND EC Rendah THEN Kondisi Sangat Lebih
R11	IF TDS Tinggi AND EC Tinggi THEN Kondisi Sangat Kurang
R12	IF TDS Optimal AND EC Normal THEN Kondisi Ideal
R13	IF Suhu Panas AND EC Tinggi THEN Kondisi Sangat Kurang
R14	IF Suhu Dingin AND EC Rendah THEN Kondisi Lebih
R15	IF Suhu Panas AND pH Sangat Tinggi THEN Kondisi Sangat Kurang
R16	IF Suhu Dingin AND pH Sangat Rendah THEN Kondisi Sangat Lebih
R17	IF pH Rendah AND EC Rendah AND TDS Rendah THEN Kondisi Sangat Lebih
R18	IF pH Tinggi AND EC Tinggi AND TDS Tinggi THEN Kondisi Sangat Kurang
R19	IF pH Normal AND EC Rendah THEN Kondisi Lebih
R20	IF pH Normal AND EC Tinggi THEN Kondisi Kurang
R21	IF pH Normal AND TDS Optimal AND Suhu Normal THEN Kondisi Ideal
R22	IF pH Ekstrem AND EC Ekstrem THEN Kondisi Sangat Kurang

Tahap ketiga merupakan proses inferensi menggunakan metode *fuzzy Mamdani*. Pada tahap ini, nilai *crisp* yang telah difuzzifikasi akan diproses berdasarkan basis aturan (*rule base*) yang telah ditentukan. Proses inferensi dilakukan melalui dua tahapan utama, yaitu implikasi dan agregasi. Pada tahap implikasi, setiap aturan *fuzzy* dievaluasi menggunakan operator minimum (*min*) untuk menentukan derajat kebenaran (α -predikat) dari masing-masing aturan. Nilai minimum ini merepresentasikan tingkat aktivasi dari aturan tersebut. Selanjutnya, pada tahap agregasi, seluruh keluaran dari aturan yang telah diimplikasikan digabungkan menggunakan operator maksimum (*max*) untuk menghasilkan satu himpunan *fuzzy* keluaran. Proses ini bertujuan untuk memperoleh kombinasi kontribusi dari seluruh aturan dalam menentukan *output* sistem.

Tahap terakhir adalah proses defuzzifikasi menggunakan metode *centroid (center of gravity)*, yaitu dengan menghitung titik pusat dari distribusi fungsi keanggotaan hasil agregasi.

Metode ini menghasilkan nilai *crisp* yang merepresentasikan keseimbangan kontribusi seluruh aturan fuzzy. Nilai tersebut kemudian digunakan sebagai tingkat rekomendasi dalam menentukan tindakan korektif guna menjaga kondisi sistem hidroponik tetap optimal.

C. Kalibrasi Sensor

Kalibrasi *sensor* dilakukan sebelum sistem diimplementasikan secara penuh untuk memastikan data yang diperoleh memiliki tingkat akurasi yang memadai. Proses ini penting karena kualitas analisis dan rekomendasi sistem sangat bergantung pada validitas data input yang diterima dari *sensor*.

Kalibrasi *sensor* derajat keasaman dilakukan menggunakan larutan buffer standar pada beberapa titik referensi, yaitu *pH* 4, *pH* 6,84, dan *pH* 9,14. Nilai hasil pembacaan *sensor* dibandingkan dengan nilai referensi untuk memperoleh persamaan koreksi yang digunakan dalam program mikrokontroler. Kalibrasi *sensor* konduktivitas listrik dan total padatan terlarut dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan *sensor* terhadap alat ukur referensi, kemudian dianalisis menggunakan pendekatan regresi untuk memperoleh hubungan korektif antara nilai *sensor* dan nilai aktual.

Kalibrasi *sensor* suhu air dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan *sensor* terhadap termometer referensi pada beberapa kondisi pengukuran. Data hasil kalibrasi dari seluruh *sensor* digunakan untuk memperbaiki akurasi pembacaan selama proses *monitoring* berlangsung. Tahap ini menjadi dasar penting dalam meningkatkan reliabilitas sistem *monitoring* dan kualitas data yang digunakan pada proses analisis *Fuzzy Mamdani*.

D. Pengujian dan Evaluasi Sistem

Pengujian dan evaluasi sistem dilakukan untuk menilai performa keseluruhan sistem *monitoring* hidroponik *NFT* yang telah dikembangkan, baik dari sisi fungsional perangkat keras, komunikasi data, maupun keluaran rekomendasi berbasis *Fuzzy Mamdani*. Tahap ini bertujuan memastikan bahwa sistem mampu bekerja sesuai rancangan dalam membaca parameter larutan nutrisi, mengirimkan data secara *real-time*, dan menghasilkan rekomendasi tindakan yang sesuai terhadap kondisi yang terdeteksi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perancangan dan Implementasi Sistem

Hasil perancangan dan implementasi sistem menunjukkan bahwa seluruh komponen utama telah berhasil direalisasikan menjadi satu sistem *monitoring* hidroponik *NFT* berbasis *Internet of Things* yang terintegrasi. Implementasi sistem mencakup dua bagian utama, yaitu perangkat keras dan perangkat lunak yang saling terhubung dalam proses akuisisi, pengolahan, dan penyajian data.

Implementasi perangkat keras sistem ditunjukkan pada Gambar 8, yang memperlihatkan integrasi seluruh komponen seperti *sensor*, mikrokontroler *ESP32*, modul *driver*, dan pompa air dalam satu rangkaian sistem.



Gambar 8. Hasil Implementasi Perangkat Keras

Rangkaian perangkat keras telah berhasil diintegrasikan dengan baik, sehingga mampu melakukan pembacaan parameter secara kontinu dan stabil. Koneksi antar komponen juga menunjukkan tidak adanya gangguan signifikan selama proses pengujian awal.

Implementasi perangkat lunak ditunjukkan pada Gambar 9, yang menampilkan antarmuka aplikasi *mobile* sebagai media *monitoring*.



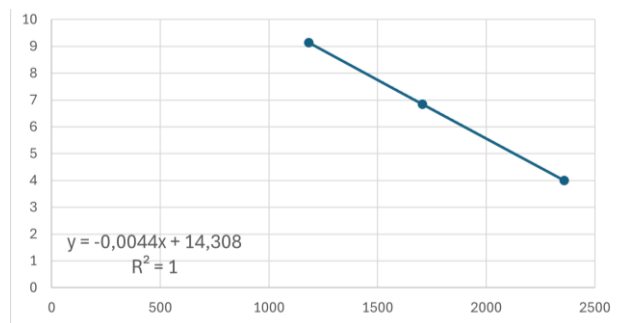
Gambar 9. Hasil Implementasi Perangkat Lunak

Aplikasi *mobile* mampu menampilkan data parameter *pH*, *EC*, *TDS*, dan suhu air secara *real-time*. Fitur lain yang tersedia meliputi histori data, kontrol manual pompa, serta notifikasi rekomendasi berdasarkan hasil analisis metode *Fuzzy Mamdani*. *Backend* sistem juga berhasil mengelola data dengan baik, sehingga komunikasi antara perangkat keras dan aplikasi berjalan secara sinkron.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem telah berjalan sesuai dengan perancangan, baik dari sisi akuisisi data, komunikasi, maupun penyajian informasi kepada pengguna. Integrasi ini menjadi dasar penting sebelum sistem memasuki tahap pengujian dan evaluasi kinerja secara menyeluruh.

B. Hasil Kalibrasi Sensor

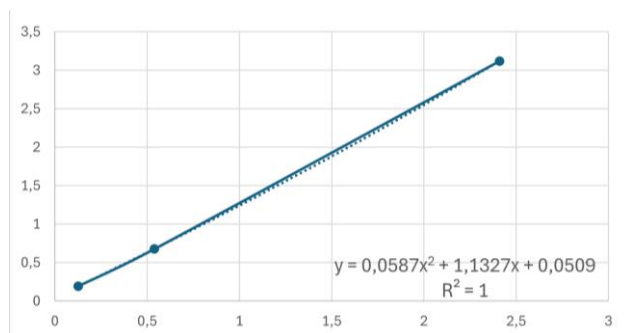
Kalibrasi *sensor* dilakukan untuk meningkatkan akurasi pembacaan dan memastikan kesesuaian antara nilai *sensor* dengan nilai referensi.



Gambar 10. Hasil Kalibrasi Sensor pH

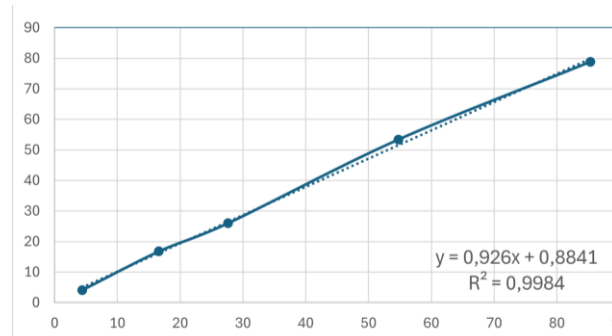
Hasil kalibrasi *sensor pH* yang ditunjukkan oleh Gambar 10 hubungan linear dengan nilai referensi, dengan nilai *Mean Absolute Error (MAE)* sebesar 0,050 yang menunjukkan tingkat akurasi sangat tinggi. Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 1 mengindikasikan bahwa model regresi mampu merepresentasikan data secara sempurna.

Hasil kalibrasi *sensor EC/TDS* pada Gambar 11 menunjukkan tingkat akurasi yang sangat baik dengan *error* mendekati nol dan nilai R^2 sebesar 1. Hal ini menunjukkan bahwa model kalibrasi mampu menghasilkan pembacaan yang sangat presisi.



Gambar 11. Hasil Kalibrasi Sensor EC/TDS

Hasil kalibrasi *Sensor* suhu air pada Gambar 12 memiliki nilai *MAE* sebesar 0,943, dengan hubungan linear yang kuat ($R^2 = 0,9984$). Meskipun terdapat deviasi pada suhu tinggi, *sensor* masih berada dalam batas toleransi untuk sistem *monitoring* lingkungan.



Gambar 12. Hasil Kalibrasi Sensor suhu

Hasil kalibrasi ini menunjukkan bahwa seluruh *sensor* layak digunakan sebagai *input* pada sistem *fuzzy*, karena kualitas data yang baik akan sangat memengaruhi akurasi rekomendasi yang dihasilkan.

C. Hasil Pengujian dan Evaluasi Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja keseluruhan sistem, baik dari aspek komunikasi, stabilitas, maupun akurasi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa data berhasil dikirim dari *ESP32* ke *server* dan ditampilkan pada aplikasi *mobile* secara *real-time*. Sistem komunikasi berjalan stabil dengan delay pengiriman data sekitar 1–3 detik. Pengujian kinerja metode *Fuzzy Mamdani* dilakukan dengan membandingkan nilai *input parameter* terhadap *output* defuzzifikasi serta rekomendasi yang dihasilkan sistem. Daftar hasil Pengujian pada Tabel 2 untuk memastikan bahwa sistem mampu menghasilkan keputusan yang konsisten dan sesuai dengan kondisi larutan nutrisi.

Tabel 2. Daftar pengujian sistem fuzzy

No	pH	EC (mS/cm)	TDS (ppm)	Suhu (°C)	Nilai Defuzzifikasi	Kategori	Rekomendasi Sistem
1	5.5	1.2	600	25	45.2	Normal	Tidak ada tindakan
2	6.8	0.8	500	27	62.7	Sedang	Penyesuaian pH
3	7.5	0.6	400	29	69.4	Lebih	Tambah nutrisi & pendinginan
4	5.0	1.5	800	24	38.6	Kurang	Penyesuaian nutrisi
5	6.0	1.0	550	26	50.3	Normal	Tidak ada tindakan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengolah kombinasi *parameter input* menjadi nilai defuzzifikasi yang merepresentasikan kondisi larutan secara akurat. Nilai *output* yang dihasilkan berada dalam rentang

kategori yang telah ditentukan dan menghasilkan rekomendasi yang sesuai dengan basis aturan *fuzzy*. Pada kondisi dengan nilai defuzzifikasi tinggi, sistem memberikan rekomendasi tindakan yang lebih intensif seperti penambahan nutrisi dan pengendalian

suhu, sedangkan pada kondisi normal sistem tidak memberikan tindakan. Hal ini menunjukkan bahwa metode *Fuzzy Mamdani* mampu bekerja secara adaptif dalam mendukung pengambilan keputusan pada sistem hidroponik *NFT*.

Hasil dari evaluasi analisis stabilitas sistem yang ditunjukkan pada Tabel 3 selama pengujian, kondisi larutan lebih sering berada di luar rentang ideal. Kondisi tersebut justru memperlihatkan bahwa sistem mampu mendeteksi ketidakseimbangan secara efektif.

Tabel 3. Analisis stabilitas

No	Parameter	Nilai
1	<i>pH</i>	0%
2	<i>EC</i>	40%
3	<i>TDS</i>	40%
4	Suhu Air	0%

Nilai analisis error yang diperoleh pada masing-masing *parameter* yang ditunjukkan Tabel 4 bahwa *parameter EC* memiliki performa paling stabil dibandingkan *parameter* lainnya. *Parameter pH*, *TDS*, dan suhu masih mengalami fluktuasi yang cukup signifikan terhadap nilai ideal.

Tabel 4. Analisis error sistem

No	Parameter	Nilai	Keterangan
1	<i>pH</i>	2,214	Devisiasi Tinggi
2	<i>EC</i>	0,686 mS/cm	Devisiasi Sedang
3	<i>TDS</i>	182,77 ppm	Devisiasi Tinggi
4	Suhu Air	2,952°C	Devisiasi Cukup Tinggi

Pengujian waktu respons dilakukan untuk mengukur kecepatan sistem dalam merespons perubahan kondisi *parameter* larutan nutrisi, mulai dari pembacaan *sensor* hingga informasi diterima oleh pengguna melalui aplikasi *mobile*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki variasi waktu respons yang dipengaruhi oleh dinamika perubahan *parameter* dan kondisi lingkungan.

Tabel 5. Analisis waktu respons

No	Skenario Pengujian	Nilai
1	Respon awal sistem	47 detik
2	Perubahan kondisi sedang	13 menit 23 detik
3	Perubahan bertahap	11 jam 33 menit 54 detik
4	Kondisi fluktuatif tinggi	21 jam 13 menit 07 detik

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5, sistem mampu memberikan respons cepat pada kondisi awal dengan waktu kurang dari satu menit. Peningkatan waktu respons terjadi seiring dengan kompleksitas perubahan *parameter* yang berlangsung secara bertahap dan kontinu. Meskipun demikian, sistem tetap mampu menyampaikan informasi secara *real-time* dari sisi komunikasi data, sehingga pengguna tetap memperoleh pembaruan kondisi secara akurat.

D. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *monitoring* hidroponik *NFT* berbasis *Internet of Things* mampu bekerja secara terintegrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak. Data *sensor pH*, *EC*, *TDS*, dan suhu air berhasil ditampilkan secara *real-time* dengan *delay* komunikasi rata-rata yang sangat singkat, yaitu berkisar 1–3 detik. Kinerja ini didukung oleh akurasi *sensor* yang baik berdasarkan hasil kalibrasi, di mana *sensor pH* memiliki nilai *MAE* sebesar 0,050, *sensor* suhu sebesar 0,943, serta *sensor EC/TDS* dengan *error* sangat kecil dan nilai koefisien determinasi mendekati 1. Tingkat keandalan data *input* yang tinggi tersebut memastikan bahwa informasi yang digunakan sebagai dasar analisis sistem memiliki validitas yang dapat dipertanggungjawabkan serta mendukung proses *monitoring* yang responsif dan berkelanjutan.

Penerapan metode *Fuzzy Mamdani* menghasilkan *output* defuzzifikasi sebesar 69,4 yang dikategorikan sebagai "lebih", sehingga sistem mampu menerjemahkan data numerik menjadi keputusan aplikatif berupa penyesuaian *pH*, penambahan nutrisi, dan pendinginan suhu. Meskipun pengujian stabilitas menunjukkan *parameter pH* dan suhu memiliki tingkat kestabilan 0% sementara *EC* dan *TDS* sebesar 40%, hal ini justru membuktikan efektivitas sistem dalam mendeteksi fluktuasi *parameter* yang berada di luar rentang ideal. Berdasarkan analisis *error* terhadap nilai ideal, ditemukan deviasi pada *pH* sebesar 2,214, *EC* sebesar 0,686 mS/cm, *TDS* sebesar 182,77 ppm, dan suhu sebesar 2,952°C, yang menunjukkan bahwa *parameter EC* memiliki performa paling stabil dibandingkan *parameter* lainnya.

Waktu respons sistem dalam menanggapi perubahan kondisi *parameter* larutan nutrisi menunjukkan variasi yang signifikan, mulai dari 47 detik hingga mencapai 21 jam 13 menit 07 detik. Variasi tersebut sangat dipengaruhi oleh dinamika perubahan *parameter* yang berlangsung secara bertahap di lingkungan hidroponik. Secara keseluruhan, integrasi teknologi *Internet of Things* dan metode *Fuzzy Mamdani* terbukti efektif untuk mendukung pemantauan dan pengambilan keputusan pada sistem hidroponik *NFT*, meskipun masih terdapat keterbatasan berupa belum adanya otomatisasi penuh dan ketergantungan terhadap stabilitas koneksi *internet*.

IV. KESIMPULAN

Sistem *monitoring* hidroponik *NFT* berbasis *Internet of Things* dengan metode *Fuzzy Mamdani* berhasil diimplementasikan sebagai alat pemantauan sekaligus pendukung keputusan dalam pengelolaan larutan nutrisi. Kinerja sistem menunjukkan komunikasi data *real-time* dengan *delay* rata-rata 1–3 detik serta akurasi *sensor* yang baik, ditunjukkan oleh nilai *MAE sensor pH* sebesar 0,050. Proses inferensi *fuzzy* menghasilkan *output* defuzzifikasi sebesar 69,4

yang mampu memberikan rekomendasi tindakan secara adaptif terhadap kondisi *parameter*.

Kinerja tersebut menunjukkan bahwa sistem efektif dalam mendeteksi perubahan kondisi dan mendukung pengambilan keputusan pada sistem hidroponik *NFT*. Pengembangan selanjutnya dapat diarahkan pada integrasi otomatisasi aktuator serta peningkatan stabilitas *parameter* agar sistem tidak hanya bersifat *monitoring*, tetapi juga mampu melakukan pengendalian secara mandiri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Çakmakçı, M. A. Salık, and S. Çakmakçı, "Assessment and Principles of Environmentally Sustainable Food and Agriculture Systems," *Agriculture*, vol. 13, no. 5, p. 1073, May 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture13051073>.
- [2] M. S. Dennison, P. S. Kumar, F. Wamyl, M. A. Meji, and T. Ganapathy, "The role of automation and robotics in transforming hydroponics and aquaponics to large scale," *Discover Sustainability*, vol. 6, no. 1, Feb. 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s43621-025-00908-4>.
- [3] A. K. Singh and X. Yang, "GREENBOX Horticulture, an Alternative Avenue of Urban Food Production," *Agricultural Sciences*, vol. 12, no. 12, pp. 1473–1489, 2021, doi: <https://doi.org/10.4236/as.2021.1212094>.
- [4] N. Athirah Mohd Hatipi et al., "IoT-Based Smart Vertical Hydroponic System for Chili Plant," *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 43, no. 2, pp. 124–133, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.37934/araset.43.2.124133>.
- [5] R. S. Rani, H. V. H. Kumar, A. Mani, B. S. Reddy, and Ch. S. Rao, "Soilless Cultivation Technique, Hydroponics- A Review," *Current Journal of Applied Science and Technology*, pp. 22–30, May 2022, doi: <https://doi.org/10.9734/cjast/2022/v41i1331711>.
- [6] M. Ali Al Meselmani, "Nutrient Solution for Hydroponics," *Soilless Culture [Working Title]*, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.101604>.
- [7] M. Dutta et al., "Internet of Things-Based Smart Precision Farming in Soilless Agriculture: Opportunities and Challenges for Global Food Security," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 34238–34268, 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2025.3540317>.
- [8] S. D. Putra, H. Heriansyah, E. F. Cahyadi, K. Anggriani, and M. H. Imron S Jaya, "Development of Smart Hydroponics System using AI-based Sensing," *JURNAL INFOTEL*, vol. 16, no. 3, Aug. 2024, doi: <https://doi.org/10.20895/infotel.v16i3.1190>.
- [9] I. N. Yarman, N. Nurjaya, and G. A. Mahendra, "Innovation of Smart Agricultural Control System in NFT Hydroponic based on Artificial Intelligence of Things," *Eduvest -Journal of Universal Studies*, vol. 2, no. 1, pp. 182–189, 2022, doi: <https://doi.org/10.59188/eduvest.v2i1.349>.
- [10] C. B. D. Kuncoro, M. B. Z. Asyikin, and A. Amaris, "Development of an Automation System for Nutrient Film Technique Hydroponic Environment," *Proceedings of the 2nd International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2021)*, 2021, doi: <https://doi.org/10.2991/aer.k.211106.069>.
- [11] A. Abu Sneineh and A. A. A. Shabaneh, "Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things," *MethodsX*, vol. 11, p. 102401, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102401>.
- [12] A. V. Hartanto, F. S. Kristiady, W. Atmadja, and J. Linggarjati, "Automatic hydroponic nutrient mixing for hydroponic NFT and fertigation," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 794, no. 1, p. 012128, Jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/794/1/012128>.
- [13] R. Lakshmanan, M. Djama, S. Perumal, and R. Abdulla, "Automated smart hydroponics system using internet of things," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 10, no. 6, p. 6389, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i6.pp6389-6398>.
- [14] Mohamad Nurkamal Fauzan and Nyi Mekar Saptarini, "Implementation of fuzzy logic controllers to maintain water temperature in hydroponics nft for lollo verde lettuce (*Lactuca sativa* L.)," *International Journal of Applied Pharmaceutics*, vol. 13, no. special issue 3, pp. 23–27, 2021, doi: <https://doi.org/10.22159/IJAP.2021.V13S3.04>.
- [15] I. Agustian, B. I. Prayoga, H. Santosa, N. Daratha, and R. Faurina, "NFT Hydroponic Control Using Mamdani Fuzzy Inference System," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 3, no. 3, pp. 374–385, May 2022, doi: <https://doi.org/10.18196/jrc.v3i3.14714>.
- [16] F. Fuentes-Peñailillo, K. Gutter, R. Vega, and G. C. Silva, "New Generation Sustainable Technologies for Soilless Vegetable Production," *Horticulturae*, vol. 10, no. 1, p. 49, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/horticulturae10010049>.
- [17] S. Jain and M. Kaur, "Design and implementation of an IoT-based automated EC and pH control system in an NFT-based hydroponic farm," *Engineering, Technology and Applied Science Research*, vol. 14, no. 1, pp. 13078–13081, Feb. 2024, doi: <https://doi.org/10.48084/etasr.6393>.
- [18] J. C. Escalante-Mamani et al., "Design and validation of an IoT-Integrated fuzzy logic controller for high-altitude NFT hydroponic systems: A case study in cusco, peru," *Electronics (Switzerland)*, vol. 14, no. 18, Sep. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics14183740>.
- [19] A. Kushawaha, D. Shah, D. Vora, N. Zade, and K. Iyer, "Urban small-scale hydroponics: A compact, smart home-based hydroponics system," *MethodsX*, vol. 13, p. 102998, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102998>.
- [20] R. Herrera-Arroyo, J. Martínez-Nolasco, E. Botello-Álvarez, Víctor Sámano-Ortega, C. Martínez-Nolasco, and C. Moreno-Aguilera, "Smart hydroponic cultivation system for lettuce (*lactuca sativa* L.) growth under different nutrient solution concentrations in a controlled environment," *Applied System Innovation*, vol. 8, no. 4, Aug. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/asi8040110>.
- [21] B. Frasetya, A. Taofik, and R. K. Firdaus, "Evaluasi variasi nilai electrical conductivity terhadap pertumbuhan tanaman selada (*Lactuca sativa* L.) pada sistem hidroponik NFT," *Jurnal AGRO*, vol. 5, no. 2, pp. 95–102, Dec. 2018, doi: <https://doi.org/10.15575/2966>.