MONITORING DAN OTOMATISASI PEMBERIAN NUTRISI TANAMAN MELON HIDROPONIK MENGGUNAKAN FUZZY MAMDANI BERBASIS INTERNET OF THINGS

SKRIPSI

Oleh:
MUHAMMAD SAIFU AINURROFIQ
NIM. 220605110031

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

MOTTO

"Usaha tanpa doa adalah kesombongan, doa tanpa usaha adalah kebohongan."

(K. H. Hasan Abdullah Sahal)

"Berpikiran Yahudi dan berjiwa Kyai."

(K. H. Hasan Abdullah Sahal)

"Ojo rumongso iso, tapi iso o rumongso."

(Penulis)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillahi rabbil alamin, segala puji bagi Allah Yang Maha Esa atas limpahan karunia dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat merampungkan tugas akhir ini. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad ﷺ, pembawa risalah kebenaran yang menuntun umat manusia dari kegelapan menuju cahaya Islam. Atas izin Allah ﷻ, karya yang menjadi bukti perjuangan dan langkah awal dalam menggapai cita-cita ini saya persembahkan setulus hati kepada:

Bapak dan Ibu

Atas doa, dukungan, sumber kekuatan, dan motivasi terbesar dalam hidup saya.

Teman, Sahabat, dan Orang Terdekat

Atas dukungan, motivasi, dan semangat saling menguatkan

Dosen,

Atas kesabaran, arahan, serta bimbingan ilmu yang teramat berharga hingga karya ini dapat rampung.

Keluarga Besar Infinity Teknik Informatika 2022,

Atas kenangan indah, perjuangan bersama, dan cerita manis yang kita ukir di tanah perantauan ini.

Dan untuk Diri Sendiri,

Terima kasih telah bertahan, tidak menyerah, dan mau berjuang sampai akhir.

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmaanirrahiim,

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur senantiasa terucapkan kehadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas limpahan nikmat sehingga skripsi yang berjudul "MONITORING DAN OTOMATISASI PEMBERIAN NUTRISI TANAMAN MELON HIDROPONIK MENGGUNAKAN FUZZY MAMDANI BERBASIS INTERNET OF THINGS" ini dapat diselesaikan sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad ﷺ. Semoga kelak mendapatkan syafaat beliau di *yaumul qiyamah*.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dorongan, semangat, bantuan dan ide-ide kreatif sehingga tahap demi tahap penyusunan skripsi ini telah selesai. Ucapan terima kasih tersebut secara khusus disampaikan kepada:

1. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nur Diana, M.Si, selaku Rektor Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. Agus Mulyono, M.Kes, selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Dr. Ir. Supriyono., S.Kom., M. Kom, selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Informatika UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Shoffin Nahwa Utama, M.T. selaku dosen pembimbing I dan Tri Mukti Lestari, M.Kom. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bantuan dan arahan kepada penulis, sehingga bisa menuntaskan skripsi ini.

5. Johan Ericka Wahyu Prakasa, M.Kom selaku dosen ketua penguji dan Ajib Hanani, M.T selaku dosen penguji I yang telah menguji serta memberikan masukan sehingga penulis dapat menuntaskan skripsi dengan baik.
6. Seluruh dosen dan Jajaran Staf Program Studi Teknik Informatika, atas ilmu, bimbingan, dan bantuan administratif yang telah diberikan selama penulis menempuh studi.
7. Kedua Orang Tua Tercinta, Bapak Moch. Zainal Arifin dan Ibu Umi Marzuqoh, yang merupakan pilar utama, sumber kekuatan, dan motivasi terbesar bagi penulis. Terima kasih yang tak terhingga atas setiap tetes keringat, doa yang tak pernah putus di setiap sepertiga malam, kasih sayang, serta pengorbanan moral maupun material yang luar biasa hingga penulis dapat berdiri di titik ini. Skripsi dan pencapaian ini penulis persembahkan sepenuhnya untuk Bapak dan Ibu.
8. Kakak ku Moch. Arfan Nur Kholidy, terima kasih atas segala bentuk dukungan moril, kebaikan, dan motivasi yang diberikan hingga skripsi ini selesai.
9. Teknik Informatika Angkatan 22 “INFINITY” yang sudah membersamai saya di perantauan ini. Terimakasih atas kebersamaan, semangat, dan kenangan yang tak terlupakan. See u on top guys!
10. Keluarga Besar organisasi Ikatan Mahasiswa Muhammadiyah (IMM) komisariat Revivalis Terima kasih atas segala proses, perjuangan, dan cerita luar biasa yang telah diukir bersama. Terima kasih telah menjadi wadah

tumbuh, belajar, dan berproses, serta memberikan dukungan yang tak ternilai selama perjalanan perkuliahan ini.

11. Sahabat dan Seperjuangan Muhammad Rizqi Diana Putra dan Ecofah Raditya Daniswara, Terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan panjang dan berwarna ini. terima kasih atas semangat, kebersamaan, dan bantuan yang saling menguatkan dalam melewati setiap tahap perkuliahan dan pengerjaan skripsi ini.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta berkontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di masa mendatang dan diterima sebagai amal ibadah di sisi Allah Subhanahu Wa Ta'ala

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Malang, 02 November 2026

Penulis

DAFTAR ISI

SKRIPSI ..... **ii**
HALAMAN PERSETUJUAN ..... **iii**
HALAMAN PENGESAHAN ..... **iv**
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN ..... **v**
MOTTO ..... **vi**
HALAMAN PERSEMBAHAN ..... **vii**
KATA PENGANTAR ..... **viii**
DAFTAR ISI ..... **xi**
DAFTAR GAMBAR ..... **xiii**
DAFTAR TABEL ..... **xiv**
ABSTRAK ..... **xv**
ABSTRACT ..... **xvi**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Pernyataan Masalah 5
1.3 Batasan Masalah 5
1.4 Tujuan Penelitian 6
1.5 Manfaat Penelitian 6
BAB II STUDI PUSTAKA **7**
2.1 Penelitian Terdahulu 7
2.2 Landasan Teori 11
2.2.1 Tanaman Melon 11
2.2.2 Set Point Nutrisi Tanaman Melon Hidroponik 14
2.3 Parameter Kepekatan Nutrisi TDS dan EC 14
2.3.1 *Total Dissolved Solids* (TDS) 15
2.3.2 *Electrical Conductivity* (EC) 15
2.3.3 Rumus Konversi TDS ke EC 16
2.4 Internet Of Things 17
2.5 Sistem Hidroponik 18
2.6 Logika Fuzzy 20
2.7 Metode Fuzzy Mamdani 23
2.7.1 Fuzzifikasi (*Fuzzification*) 24
2.7.2 Penerapan Aturan Fuzzy (*Rule Evaluation*) 25
2.7.3 Agregasi Hasil Aturan *(Aggregation)* 26
2.7.4 Defuzzifikasi (*Defuzzification*) 27
BAB III DESAIN DAN IMPLEMENTASI **29**
3.1 Desain Penelitian 30
3.2 Pengumpulan Data 30
3.2.1 Desain Sistem Transmisi Data Ke Internet 39
3.2.2 Kebutuhan Perangkat Keras 34
3.2.3 Kebutuhan Perangkat Lunak 37
3.3 Perancangan Logika Fuzzy 37
3.3.1 Variabel dan Fungsi Keanggotaan 39

3.3.2 Basis Aturan (Rule Base) & Inferensi..... 56
3.4 Perancangan Antarmuka *(User interface)*..... 62
3.5 Evaluasi Sistem..... 65
3.5.1 Pengujian Sistem Pewaktuan Berbasis Website *(Web-Based RTC)* 66
3.5.2 Pengujian Error Sistem Fuzzy Mamdani 67
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 70
4.1 Realisasi Perangkat Keras Dan Integrasi Sistem IoT..... 70
4.2 Hasil Pengujian Dan Kalibrasi Sensor..... 71
4.2.1 Pengujian Dan Kalibrasi Sensor TDS (Nilai EC)..... 71
4.2.2 Pengujian Dan Kalibrasi Sensor Ultrasonik (Ketinggian Air)..... 74
4.3 Pengujian Sistem Pewaktuan Berbasis Website (*Web-Based RTC*) 76
4.4 Pengujian Respon Aktuator (Relay Dan Pompa)..... 78
4.5 Hasil Pengujian Uji Error Logika Fuzzy..... 79
4.6 Hasil Pengujian Integrasi Antarmuka Website (*IoT Dashboard*)..... 84
4.7 *User interface* Nutrisi Tanaman Melon Hidroponik..... 85
4.8 Analisis Dan Pembahasan..... 87
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 91
5.1 Kesimpulan 91
5.2 Saran..... 91
DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Desain Penelitian 31
Gambar 3.2 Desain Sistem Transmisi Data ke Internet 39
Gambar 3. 3 Skema Jalur Rangkaian Perangkat Keras Kontroler ESP32 35
Gambar 3. 4 Fungsi Keanggotaan EC Fase Vegetatif Awal 42
Gambar 3. 5 Fungsi Keanggotaan EC Fase Vegetatif Puncak 45
Gambar 3. 6 Fungsi Keanggotaan Ketinggian Air 48
Gambar 3. 7 Fungsi Keanggotaan Output Durasi Pompa 50
Gambar 3. 8 Fungsi Keanggotaan Output Durasi Pompa 54
Gambar 3. 9 *User interface* Nutrisi Tanaman Melon Hidroponik 62
Gambar 4.1 Realisasi Perangkat Keras Dan Integrasi Sistem IoT 70
Gambar 4.2 Pengujian Dan Kalibrasi Sensor TDS (Nilai EC) 72
Gambar 4.3 Grafik Pengujian Dan Kalibrasi Sensor Ultrasonik (Ketinggian Air)75
Gambar 4.4 Grafik Pengujian Sistem Pewaktuan Berbasis Website (Web-Based RTC)..... 78
Gambar 4.5 Hasil Pengujian Uji Error Logika Fuzzy 82
Gambar 4.6 User interface Nutrisi Tanaman Melon Hidroponik 86

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terkait 8
Tabel 2.2 Set Point Nutrisi 14
Tabel 3.1 Sampel Data Uji Sistem Kendali Nutrisi & Air Hidroponik Melon (Fase Vegetatif) 32
Tabel 3.2 Kebutuhan Perangkat Keras 34
Tabel 3.3 Detail Konfigurasi Penataan Pin (Pinout Mapping) Perangkat Keras .. 36
Tabel 3.4 Kebutuhan Perangkat Lunak 37
Tabel 3.5 Batasan Variabel Linguistik 38
Tabel 3.6 Nilai Pada Fungsi Keanggotaan EC Fase Vegetatif Awal 42
Tabel 3.7 Nilai Pada Fungsi Keanggotaan EC Fase Vegetatif Puncak 46
Tabel 3.8 Nilai Pada Fungsi Keanggotaan Ketinggian Air 48
Tabel 3.9 Nilai Pada Fungsi Keanggotaan Output Pompa Nutrisi 51
Tabel 3.10 Nilai Pada Fungsi Keanggotaan Output Pompa Air Bersih 54
Tabel 3.11 Basis Aturan (Rule Base) Fuzzy Mamdani 57
Tabel 3.12 Matriks Rencana Pengujian Validasi Logika Fuzzy ESP32 62
Tabel 3.13 Rencana Pengujian Sinkronisasi Waktu Sistem (Web-Based RTC) .. 66
Tabel 3.14 Rencana Uji Eror Logika Fuzzy 68
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Eror Pembacaan Nilai EC pada Sensor TDS 72
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Eror Jarak Sensor Ultrasonik HC-SR04 74
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Sinkronisasi Waktu Sistem (Web-Based RTC) 77
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Respons dan Debit Aktuator Pompa 79
Tabel 4.5 Hasil Uji Eror Logika Fuzzy 81
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Fungsionalitas Antarmuka Dashboard Website IoT ... 85

ABSTRAK

Ainurrofiq, Muhammad Saifu. 2026. Monitoring Dan Otomatisasi Pemberian Nutrisi Tanaman Melon Hidroponik Menggunakan Fuzzy Mamdani Berbasis Internet Of Things. Program Studi Teknik Informatika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Shoffin Nahwa Utama, M.T (II) Tri Mukti Lestari, M.Kom

Kata Kunci: Melon Hidroponik, Fuzzy Mamdani, *Internet Of Things*, *Electrical Conductivity*, ESP32.

Penelitian ini berangkat dari dua permasalahan utama pada budidaya melon hidroponik. Pertama, pemantauan dan pengaturan nutrisi secara manual membutuhkan ketelitian tinggi serta berisiko menyebabkan ketidakseimbangan konsentrasi nutrisi yang berdampak pada penurunan kualitas panen. Kedua, penerapan logika konvensional (Boolean) pada pengontrolan otomatis menghasilkan respons yang kaku terhadap fluktuasi data sensor, sehingga diperlukan pendekatan logika Fuzzy Mamdani untuk menentukan durasi pemberian nutrisi secara lebih halus dan adaptif. Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan sistem kendali tertanam (*closed-loop*) berbasis mikrokontroler ESP32 dan *Internet of Things* untuk memantau nilai kepekatan nutrisi (*Electrical Conductivity*/EC),Ketinggian Air, dan Hari Setelah Tanam (HST) secara *real-time*, serta menganalisis kinerja algoritma Fuzzy Mamdani dalam mengendalikan durasi aktif pompa nutrisi AB Mix (P_1) dan pompa air bersih (P_2). Proses pengujian dilakukan pada skala prototipe bak penampungan sistem sumbu berkapasitas 6 Liter dengan pembagian dua fase pertumbuhan vegetatif, yaitu Fase Vegetatif Awal (1–14 HST, target setpoint EC 1,3 mS/cm) dan Fase Vegetatif Puncak (15–30 HST, target setpoint EC 1,7 mS/cm). Sistem terintegrasi dengan sensor TDS untuk kepekatan larutan, sensor ultrasonik HC-SR04 untuk ketinggian air, modul *Web-Based RTC* via server database untuk sinkronisasi umur tanaman, serta *dashboard website* sebagai antarmuka pemantauan jarak jauh. Hasil kalibrasi instrumen menunjukkan tingkat galat (*error*) pembacaan sensor ultrasonik sebesar 0,47% dan sensor TDS sebesar 12,55%. Pengujian sinkronisasi waktu *Web-Based RTC* menghasilkan rata-rata selisih waktu 0,83 detik. Evaluasi kinerja algoritma Fuzzy Mamdani pada memori ESP32 mencatatkan rata-rata *error* logika sebesar 0,27% untuk Pompa Nutrisi (P_1) dan 0,08% untuk Pompa Air Bersih (P_2) dibandingkan dengan perhitungan teoritis. Pengujian mekanis aktuator mencatatkan *error* waktu pemicuan *relay* sebesar 0,49% dengan debit aliran stabil rata-rata 5,96 mL/detik. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pengintegrasian algoritma Fuzzy Mamdani berbasis IoT pada ESP32 mampu mengontrol pemberian nutrisi tanaman melon hidroponik secara presisi, akurat, dan adaptif sesuai fase pertumbuhan vegetatif tanaman.

ABSTRACT

Ainurrofiq, Muhammad Saifu. 2026. Monitoring and Automation of Hydroponic Melon Plant Nutrition Using Fuzzy Mamdani Based on the Internet of Things. Informatics Engineering Study Program, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University, Malang. Supervisor: (I) Shoffin Nahwa Utama, M.T (II) Tri Mukti Lestari, M.Kom

Key words: Hydroponic Melons, Fuzzy Mamdani, *Internet of Things*, *Electrical Conductivity*, ESP32.

This study addresses two major issues in hydroponic melon cultivation. First, manual monitoring and regulation of nutrients require a high degree of precision and carry the risk of causing imbalances in nutrient concentrations, which can lead to a decline in crop quality. Second, the application of conventional (Boolean) logic in automated control results in a rigid response to fluctuations in sensor data; therefore, a Mamdani fuzzy logic approach is needed to determine the duration of nutrient delivery in a more refined and adaptive manner. This study aims to implement a closed-loop embedded control system based on the ESP32 *microcontroller* and the Internet of Things to monitor nutrient concentration (Electrical Conductivity/EC), water level, and days after planting (DAP) in real time, as well as to analyze the performance of the Mamdani fuzzy logic algorithm in controlling the active duration of the AB Mix nutrient pump (P1) and the clean water pump (P2). Testing was conducted on a prototype 6-liter reservoir system with a wick setup, divided into two vegetative growth phases: the Early Vegetative Phase (1–14 DAP, target EC setpoint of 1.3 mS/cm) and the Peak Vegetative Phase (15–30 DAP, target EC setpoint of 1.7 mS/cm). The system is integrated with a TDS sensor for solution salinity, an HC-SR04 ultrasonic sensor for water level, a *Web-Based RTC* module via a database server for plant age synchronization, and a website dashboard as a remote monitoring interface. Instrument calibration results showed a reading error of 0.47% for the ultrasonic sensor and 12.55% for the TDS sensor. Testing of the *Web-Based RTC* time synchronization yielded an average time difference of 0.83 seconds. Performance evaluation of the Mamdani Fuzzy algorithm on the ESP32 memory recorded an average logical error of 0.27% for the Nutrient Pump (P1) and 0.08% for the Clean Water Pump (P2) compared to theoretical calculations. Mechanical testing of the actuator recorded a *relay* trigger time error of 0.49% with an average stable flow rate of 5.96 mL/second. This study concludes that the integration of the IoT-based Mamdani Fuzzy algorithm on the ESP32 is capable of controlling the nutrient supply for hydroponic melons precisely, accurately, and adaptively according to the plant's vegetative growth phase.

البحث مستخلص

أينوروفيق، محمد سيفو. 2026. مراقبة وأتمتة تغذية نباتات البطيخ المزروعة بطريقة الزراعة المائية باستخدام خوارزمية مامداني الضبابية القائمة على إنترنت الأشياء. برنامج دراسة هندسة المعلوماتية، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية، مالانج. المشرفان: (1) شوفين ناهوا أوتاما، ماجستير في الهندسة (2) تري موكتي ليستاري، ماجستير في علوم الحاسوب.

،الكلمات المفتاحية: البطيخ المزروع بطريقة الزراعة المائية، خوارزمية مامداني الضبابية، إنترنت الأشياء، الموصلية الكهربائية ESP32.

تنطلق هذه الدراسة من مشكلتين رئيسيتين في زراعة الشمام بالزراعة المائية. المشكلة الأولى هي أن مراقبة المغذيات وضبطها يدويا تتطلبان دقة عالية وتنطويان على خطر اختلال تركيز المغذيات، مما يؤثر سلبا على جودة المحصول. أما المشكلة الثانية فهي أن استخدام المنطق التقليدي في التحكم الآلي يؤدي إلى استجابة قاسية لتقلبات قراءات أجهزة الاستشعار، مما يتطلب استخدام منطق مماداني الضبابي لتحديد مدة ضخ المغذيات بشكل أكثر سلاسة وتكيفا.تهدف هذه الدراسة إلى تطبيق نظام تحكم مغلق يعتمد على متحكم ESP32 وشبكة إنترنت الأشياء لمراقبة تركيز المغذيات ومستوى الماء وعمر النبات بالقيم الحقيقية، إضافة إلى تحليل أداء منطق مماداني الضبابي في التحكم بمدة تشغيل مضخة المغذيات ومضخة الماء النقي.أجريت الاختبارات على نموذج أولي لخزان سعة 6 لترات مقسم على مرحلتين من النمو الخضري: مرحلة النمو الخضري المبكر (من اليوم 1 إلى 14، بقيمة مستهدفة لتركيز المغذيات تبلغ 1.3 ميكروسيمنز/سم) ومرحلة ذروة النمو الخضري (من اليوم 15 إلى 30، بقيمة مستهدفة تبلغ 1.7 ميكروسيمنز/سم). يتكامل النظام مع جهاز استشعار لتحديد تركيز المحلول، وجهاز استشعار موجات فوق صوتية لمستوى الماء، وحدة توقيت عبر الخادم لمزامنة عمر النبات، ولوحة تحكم عبر الموقع الإلكتروني للمراقبة عن بعد.أظهرت نتائج معايرة الأجهزة أن نسبة الخطأ في قراءة جهاز استشعار مستوى الماء بلغت 0.47% وفي جهاز استشعار تركيز المغذيات 12.55%. وسجلت مزامنة الوقت فارقا زمنيا بمعدل 0.83 ثانية. أظهر تقييم أداء المنطق الضبابي على ذاكرة ESP32 نسبة خطأ في المنطق بلغت 0.47% لمضخة المغذيات و0.08% لمضخة الماء النقي مقارنة بالحسابات النظرية. كما سجل اختبار تشغيل المضخات نسبة خطأ في وقت الاستجابة بلغت 0.49% مع تدفق مستقر بمعدل 5.96 مل/ثانية.تخلص الدراسة إلى أن دمج منطق مماداني الضبابي مع تقنية إنترنت الأشياء في متحكم ESP32 قادر على التحكم بتغذية نبات الشمام في الزراعة المائية بدقة عالية وتكيف مناسب وفق مراحل نموه.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan global akan produksi pangan berkelanjutan terus meningkat dalam beberapa dekade terakhir. Pertumbuhan populasi dunia yang diproyeksikan mencapai hampir 10 miliar jiwa pada tahun 2050 menuntut sistem pertanian mampu menghasilkan pangan dalam jumlah besar dengan tetap menjaga kelestarian lingkungan. Di tengah tantangan tersebut, pertanian modern mulai beralih pada pendekatan berkelanjutan, salah satunya melalui teknologi hidroponik. Hidroponik merupakan metode bercocok tanam tanpa tanah dengan memanfaatkan air yang diperkaya nutrisi sebagai media utama pertumbuhan tanaman. Metode ini terbukti mampu menghemat penggunaan air hingga 90% dibandingkan sistem pertanian konvensional serta memberikan hasil panen yang lebih optimal pada lahan terbatas (Shin et al., 2024) Hal ini sejalan dengan perintah Allah SWT dalam *QS. AL-Mulk* ayat 15 yang menegaskan pentingnya pengelolaan bumi secara bijaksana dan optimal. Allah SWT berfirman:

هُوَ الَّذِيْ جَعَلَ لَكُمُ الْاَرْضَ ذَلُوْلًا فَامْشُوْا فِيْ مَنَاكِبِهَا وَكُلُوْا مِنْ رِّزْقِهٖۗ وَاِلَيْهِ النُّشُوْرُ

“Dialah yang menjadikan bumi untuk kamu dalam keadaan mudah dimanfaatkan. Maka, jelajahilah segala penjurunya dan makanlah Sebagian dari rezeki-Nya. Hanya kepada-Nya kamu (Kembali setelah) dibangkitkan.” (QS. AlMulk: 15).

Berdasarkan *Tafsir Al-Misbah* karya M. Quraish Shihab, ayat ini menjelaskan bahwa Allah SWT telah menundukkan bumi dan segala isinya sehingga mudah bagi manusia untuk mengolah, bercocok tanam, dan membangun peradaban di

atasnya. Perintah untuk berjalan dan menjelajahi segala penjurunya menunjukkan anjuran bagi manusia untuk berusaha mencari rezeki yang telah disediakan Allah. Dalam konteks perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi saat ini, perintah tersebut dapat dimaknai sebagai dorongan untuk melakukan eksplorasi dan inovasi, termasuk dalam pengembangan sistem pertanian yang efisien guna memakmurkan bumi secara optimal (Shihab, n.d.).

Di Indonesia, hidroponik menjadi salah satu solusi potensial untuk meningkatkan ketahanan pangan nasional, terutama pada wilayah perkotaan yang memiliki keterbatasan lahan. Pada komoditas tertentu seperti melon, sistem hidroponik memberikan peluang besar untuk menghasilkan buah berkualitas tinggi dengan nilai ekonomi yang kompetitif, baik untuk pasar domestik maupun ekspor. Namun demikian, keberhasilan sistem hidroponik sangat dipengaruhi oleh ketepatan pengelolaan nutrisi. Ketidakseimbangan konsentrasi nutrisi baik kekurangan maupun kelebihan unsur seperti nitrogen, fosfor, dan kalium dapat menurunkan kualitas dan kuantitas hasil panen. Mayoritas petani hidroponik masih melakukan pemantauan dan pengaturan nutrisi secara manual. Proses ini memerlukan ketelitian tinggi, waktu, serta pemahaman mendalam tentang standar nutrisi tanaman, sehingga metode manual sering kali tidak efisien dan berisiko menyebabkan pemborosan sumber daya.

Kombinasi teknologi *Internet of Things* dengan logika Fuzzy Mamdani dapat menjadi solusi strategis untuk menciptakan sistem otomatisasi pemberian nutrisi pada tanaman melon hidroponik yang akurat dan tidak boros.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi penerapan metode Fuzzy Mamdani dan IoT dalam sektor pertanian. Penelitian yang dilakukan oleh Rinaldi et al. (Rinaldi et al., 2023) menunjukkan keberhasilan dalam mendesain sistem otomatisasi dan pemupukan tanaman berbasis IoT menggunakan logika fuzzy Mamdani, yang secara signifikan meningkatkan efisiensi pengelolaan sumber daya air. Penelitian lain oleh Nuryudin et al. (Nuryudin et al., 2024) menyajikan sistem kontrol nutrisi hidroponik menggunakan teknik *Nutrient Film Technique* (NFT), namun hanya memfokuskan pada pertumbuhan tanaman umum tanpa studi spesifik pada jenis tanaman hasil panen bernilai tinggi seperti melon. Selain itu, studi oleh Cahyanto et al. (Cahyanto et al., 2024) membuktikan potensi Mamdani *fuzzy logic* dalam menilai kesesuaian lahan pertanian berbasis data sensor IoT.

Terdapat beberapa kekurangan yang belum terjawab dalam penelitian sebelumnya. Pertama, sebagian besar studi belum menyoroti kebutuhan spesifik tanaman melon hidroponik, yang memiliki karakteristik nutrisi lebih presisi dibandingkan tanaman lainnya. Kedua, integrasi IoT dan fuzzy Mamdani secara menyeluruh mulai dari *monitoring real-time* hingga otomatisasi pemberian nutrisi masih jarang dilakukan. Ketiga, penelitian terdahulu belum memanfaatkan data historis sebagai acuan pengembangan sistem yang adaptif sehingga optimasi nutrisi belum sepenuhnya tercapai (Waluyo et al., 2023).

Pemilihan metode Fuzzy Mamdani dalam sistem ini didasari oleh karakteristik parameter nutrisi hidroponik yang bersifat dinamis dan memiliki tingkat ketidakpastian yang tinggi. Penggunaan logika konvensional seperti *Boolean* (*IF*

THEN sederhana) sering kali menghasilkan respon sistem yang terlalu kaku dan tidak stabil saat menghadapi perubahan nilai sensor yang fluktuatif. Sebaliknya, logika Fuzzy Mamdani mampu menangani ambiguitas data dengan meniru logika berpikir manusia, sehingga memungkinkan sistem untuk menentukan durasi pemberian nutrisi secara lebih halus (*smooth*) dan presisi. Dengan memproses nilai EC, umur tanaman, dan ketinggian air melalui fungsi keanggotaan, sistem dapat menentukan durasi aktif pompa nutrisi maupun pompa air bersih secara otomatis sesuai kondisi riil di bak penampungan. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi relevan untuk dikembangkan sebagai upaya meningkatkan efisiensi pengelolaan nutrisi pada sistem hidroponik berbasis teknologi. Sistem otomatisasi pemberian nutrisi berbasis IoT dan logika fuzzy Mamdani pada tanaman melon hidroponik berpotensi meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, memperbaiki kualitas hasil panen, serta mendukung praktik pertanian presisi yang berkelanjutan. Selain memberikan dampak langsung pada produktivitas, penelitian ini juga berkontribusi pada penguatan teknologi agrikultur berbasis data di Indonesia (Untoro & Hidayah, 2022).

Pengembangan sistem ini diharapkan mampu menjawab kebutuhan akan model pertanian modern yang efisien, terjangkau, serta adaptif terhadap tantangan ketahanan pangan dan perubahan iklim. Urgensi penelitian ini terletak pada potensinya untuk menjadi solusi strategis dalam mendukung keberlanjutan sektor pertanian nasional berbasis teknologi (Ashir et al., 2022).

1.2 Pernyataan Masalah

Bagaimana performa fuzzy mamdani dalam mengendalikan pemberian nutrisi pada tanaman melon?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pengujian hanya dilakukan pada skala kecil/prototipe,bukan greenhouse besar.
2. Pengontrolan jarak jauh dilakukkan secara real-time melalui website berbasis *protocol* IoT.
3. Parameter masukan utama (input) yang digunakan dalam logika Fuzzy meliputi kepekatan nutrisi (TDS/EC) dengan set point fase vegetatif tanaman, umur pertumbuhan tanaman berdasarkan Hari Setelah Tanam (HST), serta ketinggian air larutan nutrisi di dalam bak penampungan yang dibaca menggunakan sensor ultrasonik.
4. Aktuator keluaran (output) yang dikontrol oleh system berupa durasi aktif pompa nutrisi (untuk meningkatkan kepekatan nutrisi) dan durasi aktif pompa air bersih (untuk mengencerkan larutan jika terlalu pekat atau melakukan pengisian ulang saat ketinggian air berkurang).
5. Penelitian ini tidak membahas faktor lingkungan luar seperti suhu udara, kelembapan udara, intensitas cahaya, maupun sistem proteksi hama.
6. Tidak membahas pertumbuhan tanaman melon.
7. Tidak membahas hasil panen.

1.4 Tujuan Penelitian

Mengimplementasi sistem pengendalian pemberian nutrisi pada tanaman melon hidroponik dengan menerapkan metode Fuzzy Mamdani.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah membantu petani dalam memantau parameter penting pada budidaya melon hidroponik, yaitu konsentrasi nutrisi yang dinyatakan dalam nilai Total Dissolved Solid (TDS) yang dikonversi menjadi nilai *Electrical Conductivity* (EC), secara real-time melalui sistem berbasis *Internet of Things*. Sistem yang dikembangkan memungkinkan proses monitoring dilakukan dengan lebih mudah dan efisien sehingga kondisi nutrisi tanaman dapat diketahui setiap saat.

Penelitian ini menyediakan sistem kontrol otomatis pemberian nutrisi menggunakan metode Fuzzy Mamdani yang mampu menyesuaikan kebutuhan nutrisi berdasarkan fase pertumbuhan tanaman yang direpresentasikan melalui umur tanaman atau Hari Setelah Tanam (HST). Dengan penerapan metode fuzzy, sistem dapat mengambil keputusan pengontrolan secara lebih fleksibel sesuai kondisi tanaman.

Adanya sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi proses budidaya melon hidroponik, mempermudah proses pengelolaan nutrisi, serta mengurangi kesalahan manusia dalam pengaturan pemberian nutrisi. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan teknologi pertanian cerdas berbasis IoT dan kecerdasan buatan pada sistem hidroponik.

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian (Insany, 2026) mengimplementasikan sistem *smart watering* berbasis *Internet of Things* dengan kontrol logika Fuzzy untuk pengelolaan kebutuhan air dan nutrisi pada budidaya melon hidroponik di dalam *greenhouse*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan kadar air dan kepekatan nutrisi larutan AB Mix secara *real-time* untuk mengoptimalkan pertumbuhan tanaman melon.

Penelitian oleh (Waluyo et al., 2023) mengimplementasikan sistem IoT berbasis metode Fuzzy Mamdani untuk monitoring kadar nutrisi secara real-time. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode fuzzy mampu membantu proses pengambilan keputusan dalam pengontrolan nutrisi secara otomatis berdasarkan kondisi larutan nutrisi yang terbaca oleh sensor.

Penelitian oleh (Sholihah et al., 2021) mengimplementasikan sistem kendali TDS nutrisi hidroponik berbasis *Internet of Things* menggunakan metode logika Fuzzy yang terintegrasi dengan penyimpanan awan untuk pemantauan secara *real-time*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem berhasil memonitor parameter pH dan TDS secara otomatis serta meningkatkan efisiensi pengelolaan nutrisi pada sistem hidroponik.

Penelitian terkait tanaman melon hidroponik juga dilakukan oleh (Putra et al., 2024) yang berfokus pada pengendalian parameter nutrisi agar tetap berada pada kondisi optimal. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan

mikrokontroler ESP32 dan teknologi IoT dapat membantu proses monitoring dan pengontrolan nutrisi secara otomatis.

Penelitian oleh (Golléty, 2024) dan (Vijaykumar et al., 2024) membahas efisiensi penggunaan sumber daya pada sistem hidroponik berbasis otomatisasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem kontrol otomatis dapat membantu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi pada budidaya hidroponik.

Penelitian ini memfokuskan pada implementasi metode Fuzzy Mamdani menggunakan parameter nilai Total Dissolved Solid (TDS) yang dikonversi menjadi *Electrical Conductivity* (EC), umur tanaman atau Hari Setelah Tanam (HST), serta ketinggian air nutrisi yang dibaca menggunakan sensor ultrasonik sebagai variabel input monitoring sistem. Ketiga parameter tersebut digunakan untuk membantu proses pengontrolan dan pemantauan nutrisi secara otomatis sesuai kebutuhan tanaman melon hidroponik.

Penulis merangkum hasil penelitian terdahulu ke dalam Tabel 2.1 sebagai bentuk perbandingan penelitian yang berkaitan dengan sistem kontrol nutrisi hidroponik berbasis IoT dan metode Fuzzy Mamdani.

Tabel 2.1 Penelitian Terkait

No	Peneliti Dan Judul	Metode	Hasil Penelitian	Perbedaan Peneliti
1.	Optimalisasi Smart Watering Berbasis IoT dengan Kontrol Fuzzy untuk Kebutuhan Air dan Nutrisi pada Budidaya Melon Hidroponik di Greenhouse (Insany, 2026)	Mengimplementasika sistem *Smart Watering* dan kontrol logika Fuzzy berbasis Internet of Things untuk pemantauan serta suplai otomatis.	Sistem mampu menjaga kestabilan kadar air dan kepekatan nutrisi larutan AB Mix di dalam *greenhouse* secara *real-time*.	berfokus pada sistem kendali umum di *greenhouse*
2.	*Smart farming* berbasis *fuzzy* dan efisiensi energi IoT.	Penerapan logika Fuzzy (*fuzzy logic*) berbasis	Sistem terbukti lebih hemat energi dan stabil dalam menjaga parameter	Menitikberatkan pada efisiensi energi IoT menggunakan metode *fuzzy logic.*

No	Peneliti Dan Judul	Metode	Hasil Penelitian	Perbedaan Peneliti
	(Waluyo et al., 2023)	IoT untuk efisiensi energi.	pH, TDS, dan EC dibanding metode konvensional.	
3.	Kendali TDS Nutrisi Hidroponik *Deep Flow Technique* Berbasis IoT menggunakan Fuzzy Logic (Sholihah et al., 2021)	Mengimplementasikan sistem kendali TDS nutrisi hidroponik berbasis *Internet of Things* dan logika Fuzzy yang terintegrasi dengan *cloud storage* untuk pemantauan secara *real-time*.	Sistem berhasil memonitor parameter pH dan TDS secara otomatis serta meningkatkan efisiensi pengelolaan nutrisi pada sistem hidroponik.	sistem kendali TDS berbasis IoT secara umum dengan metode *Deep Flow Technique*
4.	Stabilitas nutrisi pada tanaman melon spesifik. (Putra et al., 2024)	Pengujian dan pengondisian stabilitas nutrisi tanaman.	Mampu menjaga parameter nutrisi (pH dan TDS) tetap stabil pada rentang ±5% dari nilai ideal.	Menekankan pada akurasi kontrol stabilitas nutrisi yang sangat ketat (toleransi ±5%).
5.	Protokol Keamanan dan Efisiensi Hardware IoT. (Vijaykumar et al., 2024)	Penerapan protokol keamanan pada transmisi data berbasis ESP32.	Mengoptimalkan kinerja ESP32 dalam transmisi data sensor secara *real-time* dan aman.	Fokus pada enkripsi/keamanan data *hardware* IoT, bukan pada kontrol nutrisi tanaman.
6.	**Penelitian yang Diusulkan** Monitoring Dan Otomatisasi Pemberian Nutrisi Tanaman Melon Hidroponik Menggunakan Fuzzy Mamdani Berbasis IoT.	Sistem kontrol nutrisi melon hidroponik berbasis IoT menggunakan Fuzzy mamdani	Sistem mampu mengontrol durasi dan kerja pompa nutrisi secara otomatis berdasarkan parameter TDS/EC, umur tanaman (HST), dan ketinggian air.	Sistem mampu melakukan kontrol nutrisi, umur tanaman dan ketinggian air serta durasi pompa secara otomatis sesuai dengan kebutuhan tanaman.

Berdasarkan pemaparan serta matriks perbandingan pada Tabel 2.1, terdapat beberapa perbedaan mendasar dan kebaruan (*novelty*) yang membedakan penelitian ini dengan penelitian-penelitian terdahulu. Sebagian besar penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Sholihah et al. (2021) dan Waluyo et al. (2023), menerapkan sistem kendali nutrisi hidroponik secara umum atau terbatas pada tanaman sayuran daun tanpa mempertimbangkan fase spesifik pertumbuhan.

Penelitian ini secara khusus berfokus pada tanaman melon hidroponik (*Cucumis melo L.*) yang memiliki tingkat sensitivitas nutrisi tinggi. Sistem ini merancang skema pengaturan nilai *set point* EC (*Electrical Conductivity*) secara dinamis sesuai sub-fase pertumbuhan vegetatif, yakni Fase Vegetatif Awal (1–14 HST dengan target setpoint 1,3 mS/cm) dan Fase Vegetatif Puncak (15–30 HST dengan target setpoint 1,7 mS/cm).

Perbedaan mendasar lainnya terletak pada pengintegrasian multi-sensor serta penggunaan parameter ketinggian air sebagai proteksi sistem sumbu (*wick system*). Penelitian terdahulu seperti Putra et al. (2024) dan Insany (2026) umumnya hanya berfokus pada pemantauan dan kontrol kepekatan nutrisi semata. Di sisi lain, penelitian ini memasukkan tiga variabel masukan sekaligus ke dalam mesin logika Fuzzy Mamdani, yaitu kepekatan nutrisi (EC), umur tanaman (HST), dan ketinggian air larutan yang diukur menggunakan sensor ultrasonik. Kehadiran variable ketinggian air berperan penting dalam menjaga ketersediaan air tandon agar kapilaritas kain flanel tetap terendam, sekaligus mencegah bahaya kepekatan nutrisi berlebih (*nutrient burn*).

Aspek kebaruan juga ditunjukkan pada mekanisme sinkronisasi waktu umur tanaman berbasis Internet of Things (*Web-Based RTC*). Jika penelitian terdahulu mayoritas mengandalkan modul *Hardware RTC* lokal (DS3231) yang rentan mengalami *reset* waktu saat terjadi kegagalan daya, penelitian ini memanfaatkan transmisi *Web-Based RTC* dari *server database* website. Pendekatan ini menjamin bahwa data umur tanaman (HST) tersimpan secara aman di server *cloud*. Ketika mikrokontroler ESP32 mengalami pemutusan arus listrik (*power loss*), variabel

penanggalan HST tidak akan ter-reset ke angka nol saat alat menyala kembali, melainkan langsung melakukan sinkronisasi data terbaru secara presisi dari server.

Sistem kontrol ini mengimplementasikan skema *Dual-Actuator Fuzzy Control* yang mengendalikan dua unit pompa secara responsif. Jika penelitian konvensional umumnya hanya mengontrol satu pompa penambah nutrisi, hasil inferensi logika Fuzzy Mamdani pada penelitian ini secara simultan mengatur durasi aktif Pompa Nutrisi AB Mix (P_1) untuk meningkatkan kepekatan saat nilai EC rendah, serta Pompa Air Bersih (P_2) untuk melakukan pengenceran larutan saat nilai EC terlalu tinggi atau melakukan pengisian ulang saat ketinggian air menyusut di bawah 80%.

2.2 Landasan Teori

Landasan teori adalah suatu uraian yang memuat berbagai konsep dan teori yang relevan, yang berfungsi memberikan pemahaman mendalam serta dasar konseptual terkait topik penelitian yang sedang dikaji.

2.2.1 Tanaman Melon

Tanaman melon (*Cucumis melo* L.) merupakan salah satu komoditas hortikultura yang memiliki tingkat sensitivitas tinggi terhadap kondisi lingkungan mikronya, terutama pada ketersediaan hara dalam media tanam. Dalam sistem budidaya hidroponik, pemenuhan kebutuhan nutrisi harus dilakukan secara presisi guna menjamin kualitas buah yang dihasilkan. Pertumbuhan tanaman ini sangat bergantung pada keseimbangan konsentrasi larutan yang diberikan pada setiap tahapan usianya (Doni et al., 2023).

A. Pengertian Masa Vegetatif

Masa vegetatif adalah periode pertumbuhan awal tanaman di mana tanaman memfokuskan seluruh energinya untuk membentuk struktur vegetatif seperti akar, batang, dan daun, sebelum akhirnya memasuki fase generatif (pembentukan bunga dan buah). Pada masa ini, tanaman belum menghasilkan bunga maupun buah karena seluruh sumber daya dialokasikan untuk pertumbuhan organ-organ vegetatif.

Pada tanaman melon hidroponik, masa vegetatif berlangsung selama kurang lebih 30 hari setelah tanam (HST) , meskipun durasi ini dapat bervariasi tergantung pada varietas, kondisi lingkungan, dan sistem budidaya yang digunakan (Atikah et al., 2023) Pemahaman yang tepat tentang masa vegetatif sangat penting dalam budidaya hidroponik karena kebutuhan nutrisi (nilai EC) berbeda-beda pada setiap fase vegetatif.

B. Pembagian Fase Masa Vegetatif Tanaman Melon

Berdasarkan karakteristik pertumbuhannya, masa vegetatif tanaman melon dapat dibagi menjadi dua sub-fase yang masing-masing memiliki ciri dan kebutuhan nutrisi yang berbeda:

1. Fase Vegetatif Awal (1-14 Hari Setelah Tanam)

Tanaman baru berkecambah dan mulai membentuk daun pertama serta sistem perakaran. Proses perkecambahan biji umumnya terjadi pada 3-5 HST, diikuti dengan munculnya daun kotiledon (daun pertama) pada 5-7 HST. Daun sejati pertama mulai muncul pada 10-14 HST.

Karakteristik fase vegetatif awal:

- Sistem perakaran masih muda dan belum berkembang sempurna
- Daun masih sedikit (2-4 helai) dan belum membentuk kanopi yang rapat
- Laju fotosintesis masih rendah
- Tanaman masih sangat rentan terhadap kelebihan nutrisi (stres osmotik)
- Set point target EC: 1,3 mS/cm
- Rentang toleransi EC: 1,2 - 1,6 mS/cm

2. Fase Vegetatif Puncak (15-30 Hari Setelah Tanam)

   Tanaman mengalami pertumbuhan batang dan daun yang paling pesat. Tanaman melon mulai merambat, jumlah daun bertambah banyak (10-15 helai), dan kanopi mulai menutup. Laju fotosintesis dan serapan nutrisi mencapai puncaknya pada fase ini.

   Karakteristik fase vegetatif puncak:

   - Pertumbuhan batang dan daun sangat cepat
   - Jumlah daun bertambah signifikan (10-15 helai)
   - Kanopi mulai rapat dan menutup
   - Laju transpirasi dan serapan air tinggi
   - Kebutuhan nutrisi paling tinggi dibanding fase lainnya
   - Set point target EC: 1,7 mS/cm
   - Rentang toleransi EC: 1,6 - 2,0 mS/cm

Penetapan nilai *set point* EC sebesar 1,3 mS/cm pada fase vegetatif awal (1–14 HST) disesuaikan dengan kondisi akar bibit melon yang masih muda dan peka

terhadap tekanan osmotik larutan. Pada masa awal pertumbuhan dari perkecambahan hingga munculnya daun sejati, sistem perakaran tanaman belum berkembang sempurna sehingga membutuhkan asupan nutrisi dengan tingkat kepekatan yang rendah. Konsentrasi 1,3 mS/cm dipilih sebagai batas ideal larutan AB Mix agar tanaman dapat menyerap unsur hara makro maupun mikro secara maksimal, sekaligus mencegah risiko penumpukan garam yang berpotensi merusak sel akar atau memicu keracunan nutrisi (*nutrient burn*) (Asaduzzaman et al., 2021).

2.2.2 Set Point Nutrisi Tanaman Melon Hidroponik

Set point merupakan nilai target yang ingin dicapai oleh sistem kontrol dalam menjaga kestabilan nutrisi larutan hidroponik. Pada penelitian ini, set point dinyatakan dalam nilai *Electrical Conductivity* (EC) yang menjadi acuan sistem Fuzzy Mamdani dalam menentukan durasi pemberian nutrisi. Berdasarkan fase pertumbuhan vegetatif, nilai set point EC dibagi menjadi dua tahap sebagai berikut:

Tabel 2.2 Set Point Nutrisi

Fase Vegetatif	Hari Setelah Tanam (HST)	Set Point EC (mS/cm)
Awal	1 - 14 HST	1,3
Puncak	15 - 30 HST	1,7

Sistem kontrol akan berusaha mempertahankan nilai EC pada rentang set point tersebut. Apabila nilai EC berada di bawah set point (rendah), sistem akan menambah nutrisi. Apabila nilai EC berada di atas set point (tinggi), sistem akan menambah air bersih atau menghentikan pemberian nutrisi.

2.3 Parameter Kepekatan Nutrisi TDS dan EC

Keberhasilan pertumbuhan tanaman sangat ditentukan oleh tingkat kepekatan larutan nutrisi yang tersedia bagi tanaman. Kepekatan larutan tersebut umumnya

diukur menggunakan dua parameter utama, yaitu *Total Dissolved Solids (TDS) dan Electrical Conductivity (EC).*

2.3.1 *Total Dissolved Solids* (TDS)

Total Dissolved Solids (TDS) merupakan parameter yang merepresentasikan jumlah total padatan terlarut dalam suatu larutan, yang mencakup mineral, garam, serta logam. Dalam konteks hidroponik, nilai TDS digunakan untuk mengidentifikasi konsentrasi akumulatif dari nutrisi AB Mix yang tersedia di dalam air. Satuan yang umum digunakan dalam pengukuran ini adalah PPM (*Parts Per Million*), yang setara dengan satu miligram zat terlarut dalam satu liter air (mg/L) (Frasetiawan et al., 2023).

2.3.2 *Electrical Conductivity* (EC)

Electrical Conductivity (EC) atau daya hantar listrik merupakan ukuran kemampuan suatu larutan untuk menghantarkan arus listrik. Prinsip kerja parameter ini didasarkan pada keberadaan ion-ion terlarut dalam air nutrisi, semakin tinggi konsentrasi ion (nutrisi), semakin besar pula nilai hantar listriknya. Satuan standar internasional yang digunakan untuk parameter ini adalah *milliSiemens per centimeter* (mS/cm). Dalam budidaya tanaman melon, para ahli agronom lebih cenderung menggunakan satuan EC sebagai standar acuan dibandingkan TDS (Visco et al., 2023). Hal ini dikarenakan nilai EC lebih stabil terhadap perubahan suhu dan memberikan korelasi yang lebih akurat terhadap ketersediaan unsur hara yang siap diserap oleh tanaman. Ketepatan dalam menjaga nilai EC sangat krusial, nilai EC yang terlalu rendah akan menghambat

pertumbuhan tanaman, sementara nilai EC yang terlalu tinggi dapat menyebabkan tekanan osmotik yang merusak sel-sel akar (Hung et al., 2025).

2.3.3 Rumus Konversi TDS ke EC

Total Dissolved Solids (TDS) dan *Electrical Conductivity* (EC) memiliki korelasi linear dalam larutan nutrisi hidroponik. TDS mengukur berat partikel terlarut dalam satuan PPM (*Parts Per Million*), sedangkan EC mengukur kemampuan larutan menghantarkan listrik dalam satuan mS/cm (*miliSiemens per centimeter*). Konversi ini penting karena standar kebutuhan nutrisi tanaman melon seringkali dinyatakan dalam satuan EC (Sadiyoko et al., 2023).

Persamaan yang digunakan secara umum dalam sensor TDS analog untuk mendapatkan nilai EC adalah sebagai berikut (Feng et al., 2025):

$$EC = \frac{TDS}{Factor} \tag{2.1}$$

Keterangan:
EC : *Electrical Conductivity* (Daya Hantar Listrik larutan nutrisi), dinyatakan dalam satuan mS/cm atau µS/cm.
TDS : *Total Dissolved Solids* (Total Padatan Terlarut dalam air), dinyatakan dalam satuan ppm (*parts per million*).
Factor : Faktor konversi nilai larutan (konstanta), biasanya bernilai antara 0,5 hingga 0,7 tergantung standar sensor yang digunakan.

Di mana nilai *Factor* yang digunakan untuk larutan nutrisi standar adalah 500 (atau 0.5 jika dalam satuan mS/cm). Maka rumusnya menjadi (Zhai et al., 2024):

$$EC(mS/cm) = \frac{PPM}{500} \tag{2.2}$$

Keterangan:
EC (mS/cm) : *Electrical Conductivity* (Daya Hantar Listrik larutan nutrisi) yang dinyatakan dalam satuan miliSiemens per sentimeter (mS/cm).
PPM : *Parts Per Million*, yaitu satuan untuk nilai TDS (*Total Dissolved Solids* atau Total Padatan Terlarut dalam larutan).

500 : Faktor konversi konstanta (berasal dari nilai standar faktor 0,5 yang dikalikan untuk penyesuaian satuan dari \(\mu \)S/cm ke mS/cm, umumnya merujuk pada standar kurva NaCl).

Nilai hasil konversi inilah yang nantinya digunakan sebagai variabel masukan (*input*) dalam mesin inferensi fuzzy Mamdani pada sistem ini.

2.4 Internet Of Things

Internet of Things merupakan suatu konsep yang menggambarkan keterhubungan berbagai perangkat fisik secara berkelanjutan melalui jaringan internet. Perangkat-perangkat tersebut mencakup sensor, aktuator, perangkat lunak, serta teknologi pendukung lainnya yang memungkinkan proses pengumpulan, pengolahan, dan pertukaran data antarperangkat maupun dengan sistem yang lebih luas melalui konektivitas internet (Dubey & Yadav, 2024).

Istilah IoT pertama kali diperkenalkan oleh Kevin Ashton pada tahun 1999 ketika terlibat dalam pengembangan sistem berbasis *Radio Frequency Identification* (RFID) *di Auto-ID Cente*r, *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Penerapan IoT bergantung pada koneksi internet sebagai media utama untuk membangun komunikasi antarperangkat dalam satu ekosistem. Melalui pemanfaatan IoT, berbagai aktivitas manusia dan proses operasional dapat dijalankan secara lebih efisien, cepat, serta memungkinkan pengendalian otomatis yang lebih terstruktur (Guo et al., 2021).

Internet of Things dimanfaatkan untuk melakukan pemantauan dan pengendalian kondisi lingkungan secara *real-time*, sehingga kegiatan budidaya dapat dilaksanakan secara lebih efisien dan presisi.

2.5 Sistem Hidroponik

Hidroponik merupakan metode budidaya tanaman yang memanfaatkan larutan nutrisi berbasis air sebagai sumber utama mineral esensial yang dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman. Dalam sistem ini, akar tanaman dapat bersentuhan langsung dengan larutan nutrisi atau ditopang oleh media tanam inert, seperti *rockwool*, *perlite*, dan *cocopeat*, yang berfungsi sebagai penyangga fisik kapilaritas tanpa memberikan unsur hara tambahan. Sistem hidroponik dikenal memiliki sejumlah keunggulan, antara lain efisiensi penggunaan air, tingkat pengendalian nutrisi yang lebih akurat, serta fleksibilitas penerapan pada lahan terbatas atau kondisi tanah yang kurang subur, seperti di kawasan perkotaan maupun wilayah dengan degradasi tanah (Ali Al Meselmani, 2023).

Ada beberapa jenis sistem hidroponik yang umum digunakan, di antaranya *Nutrient Film Technique* (NFT), yang mengalirkan lapisan tipis larutan nutrisi secara terus-menerus di sekitar akar tanaman; *Deep Water Culture* (DWC) atau sistem rakit apung, di mana akar tanaman terendam langsung di dalam larutan nutrisi; dan sistem sumbu (*wick system*). Sistem sumbu merupakan jenis hidroponik pasif yang paling sederhana, di mana larutan nutrisi ditarik ke dalam media tanam dari bak penampung utama menggunakan bantuan kain flanel yang bertindak sebagai sumbu melalui prinsip kapilaritas zat cair. Masing-masing sistem ini dirancang untuk memberikan oksigen, air, dan nutrisi yang optimal kepada tanaman, sehingga memberikan hasil panen yang lebih tinggi dan waktu pertumbuhan lebih singkat dibandingkan metode tradisional berbasis tanah (Efendi & Syahminan, 2024).

Penelitian ini secara khusus mengimplementasikan perpaduan karakteristik sistem rakit apung dan sistem sumbu (*wick system*), di mana tanaman melon diletakkan langsung di atas penutup bak utama berkapasitas 6 Liter. Penggunaan kain flanel sangat krusial pada fase vegetatif awal untuk menjembatani serapan nutrisi ke akar bibit yang masih pendek, sebelum nantinya akar tumbuh memanjang dan terendam secara mandiri di dalam cairan tandon. Metode ini sangat ramah lingkungan dan efisien karena memanfaatkan ketinggian air di dalam satu wadah statis tanpa membutuhkan instalasi sirkulasi pipa yang rumit.

Meskipun menawarkan berbagai keunggulan, hidroponik juga menghadapi sejumlah tantangan, antara lain tingginya kebutuhan investasi awal untuk pengadaan peralatan dan infrastruktur teknologi, seperti pompa, sensor, dan sistem kendali otomatis, serta tuntutan terhadap pemahaman teknis yang memadai dalam pengelolaan sistem. Namun demikian, perkembangan teknologi, termasuk integrasi *Internet of Things* dan kecerdasan buatan (*AI*), semakin meningkatkan kemampuan pemantauan dan optimasi sistem hidroponik, sehingga dapat menekan beban operasional dan meningkatkan efisiensi secara keseluruhan (Verma et al., 2023).

Integrasi ini memberikan solusi berkelanjutan untuk mengatasi tantangan global dalam bidang pertanian, seperti erosi tanah, kebutuhan pangan meningkat, dan keterbatasan lahan produktif melalui pemanfaatan sistem kontrol otomatis yang presisi. (Singh et al., 2023).

2.6 Logika Fuzzy

Logika Fuzzy merupakan salah satu cabang dalam ilmu komputer dan matematika yang dikembangkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965 sebagai pendekatan untuk mengatasi ketidakpastian serta informasi yang bersifat tidak presisi. Berbeda dengan logika klasik yang hanya mengenal nilai kebenaran biner, yaitu benar (1) dan salah (0), logika Fuzzy mengakomodasi derajat keanggotaan yang bernilai kontinu antara 0 hingga 1 untuk merepresentasikan tingkat kebenaran tertentu. Pendekatan ini didasarkan pada konsep himpunan *fuzzy*, di mana setiap elemen tidak dibatasi oleh keanggotaan bersifat mutlak, melainkan ditentukan melalui fungsi keanggotaan yang memungkinkan pemodelan kondisi dunia nyata secara lebih fleksibel (Ganaie et al., 2023).

Salah satu fungsi keanggotaan yang sering digunakan adalah fungsi keanggotaan segitiga (*triangular membership function*), yang dirumuskan sebagai berikut (L. Wang et al., 2025):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \tag{2.3}$$

Rumus ini digunakan untuk menentukan derajat keanggotaan suatu nilai x terhadap himpunan fuzzy A

Dimana:
a = Batas bawah (nilai mulai naik).
b = Titik puncak (nilai keanggotaan = 1).
c = Batas atas (nilaimenurun ke 0).

Maka:
Jika nilai x masih di bawah a maka bukan anggota fuzzy (0).
Jika berada antara a dan b maka kenggotaannya meningkat secara linier.

Jika berada antara b dan c maka keanggotaannya menurun secara linier. Jika di atas c maka bukan anggota (0).

Persamaan (2.3) menggambarkan pemodelan derajat keanggotaan $\mu_A(x)$ untuk variabel terukur x. Nilai a merepresentasikan ambang batas bawah di mana derajat keanggotaan mulai naik dari 0, b adalah titik puncak mutlak (*modal point/apex*) dengan derajat keanggotaan penuh $\mu_A(x) = 1$, dan c merupakan ambang batas atas di mana derajat keanggotaan kembali turun menjadi 0. Dalam implementasi sistem ini, rumus ini digunakan untuk mengukur seberapa besar tingkat kepastian suatu nilai sensor (seperti EC) berada dalam rentang himpunan Normal.

Dimana a, b, dan c merupakan parameter penentu bentuk kurva segitiga yang mewakili konsep linguistik seperti *rendah*, *sedang*, atau *tinggi*.

Dalam proses inferensi *fuzzy*, operasi dasar seperti AND dan OR juga diperlukan untuk menggabungkan beberapa premis dalam aturan. Operator ini dirumuskan sebagai berikut (Saatchi et al., 2024):

1. Operator AND (minimum):

$$\mu A \cap B(x) = min\big(\mu A(x), \mu B(x)\big) \tag{2.4}$$

Dimana:
μ_(A∩B)(x) : Derajat keanggotaan hasil gabungan fuzzy A AND B.
min(μ_A(x), μ_B(x)) : Mengambil nilai *terkecil* dari keduanya

Pada Persamaan (2.4), operasi implikasi Minimum (MIN) digunakan saat dua masukan sensor dihubungkan dengan operator logika AND. Sistem memilih derajat keanggotaan terkecil sebagai nilai kekuatan aturan (α-

predikat) untuk memastikan bahwa keputusan yang diambil didasarkan pada kondisi terkritis dari variabel masukan.

Rumus ini menentukan nilai keanggotaan gabungan dua premis *fuzzy* dengan memilih nilai terkecil dari kedua derajat keanggotaan. Operator minimum digunakan untuk merepresentasikan kondisi "A dan B" dalam aturan *fuzzy*.

2. Operator OR (maximum):

$$\mu A \cup B(x) = max\big(\mu A(x), \mu B(x)\big) \tag{2.5}$$

Dimana:
μA(x) : Derajat keanggotaan x pada himpunan *fuzzy* A
μB(x) : Derajat keanggotaan x pada himpunan *fuzzy* B
Maka, $\mu_{A\cup B}(x)$: Derajat keanggotaan x pada himpunan *fuzzy* gabungan A OR B.

Persamaan (2.5) dengan operator Maximum (MAX) mengagregasi seluruh aturan yang aktif dengan mengambil nilai keyakinan tertinggi untuk membentuk kurva output fuzzy gabungan.

Operator ini mengambil nilai terbesar dari dua derajat keanggotaan untuk menggambarkan kondisi "A atau B". Dengan mengambil nilai maksimum, sistem mempertahankan tingkat keyakinan tertinggi terhadap kondisi yang dianggap paling relevan. Kedua operator ini merupakan inti dari mekanisme inferensi *fuzzy*, karena seluruh aturan *IF–THEN* akan dinilai berdasarkan tingkat kebenaran dari premis yang digabungkan melalui *AND* dan *OR*.

Setelah itu, setiap aturan yang aktif menghasilkan keluaran *fuzzy* yang kemudian diproses pada tahap defuzzifikasi.

Dengan karakteristik yang mampu menyelesaikan data ambigu, tidak pasti, dan non linear, logika Fuzzy banyak digunakan dalam bidang kontrol, otomasi, dan pengambilan keputusan. Dalam konteks penelitian ini, logika Fuzzy berperan penting dalam merumuskan keputusan tingkat pemberian nutrisi berdasarkan input sensor seperti Umur Tanaman (Hari) dan *Electrical Conductivity* (EC) yang bersifat dinamis dan tidak selalu presisi. Pendekatan *fuzzy* memungkinkan sistem untuk mengatur nutrisi tanaman melon hidroponik secara adaptif sesuai kondisi aktual di lapangan (Chrysafiadi et al., 2023).

2.7 Metode Fuzzy Mamdani

Fuzzy Mamdani, yang dikenal sebagai Mamdani *Fuzzy Inference System* (FIS), merupakan salah satu metode dalam logika Fuzzy yang banyak digunakan untuk keperluan pengambilan keputusan maupun sistem kendali berbasis aturan. Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975 dan hingga saat ini masih menjadi pendekatan yang umum diterapkan dalam berbagai bidang, seperti sistem kontrol, peramalan, manajemen risiko, serta pengenalan pola.

Terdapat proses dalam fuzzy Mamdani melibatkan 4 tahapan-tahapan diantaranya:

2.7.1 Fuzzifikasi (*Fuzzification*)

Nilai masukan yang bersifat *crisp* atau bernilai pasti dari lingkungan nyata selanjutnya ditransformasikan ke dalam bentuk nilai fuzzy melalui proses fuzzifikasi. Proses ini menggunakan fungsi keanggotaan (membership function) yang telah ditetapkan sebelumnya untuk menentukan derajat keanggotaan suatu nilai terhadap kategori tertentu. Fungsi keanggotaan tersebut umumnya direpresentasikan dalam bentuk kurva segitiga, trapesium, atau bentuk lainnya yang menggambarkan tingkat keterkaitan nilai input dengan suatu himpunan fuzzy, seperti kategori EC rendah, normal, dan tinggi atau fase umur tanaman awal, tengah, dan akhir.

Fungsi keanggotaan linier naik dan turun dapat dirumuskan sebagai berikut (Malyszko, 2021):

1. Linear Naik

   Rumus ini digunakan untuk kategori yang nilainya semakin besar semakin kuat, misalnya pada kategori EC tinggi atau umur tanaman akhir.

$$\mu_{Sedang}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 10 \text{ atau } x \geq 20 \\ \frac{x-10}{15-10} & 10 < x \leq 15 \\ \frac{20-x}{20-15} & 15 < x < 20 \end{cases} \tag{2.6}$$

Keterangan:
a : Titik awal dimana nilai mulai dianggap masuk ke dalam kategori(derajat keanggotaan 0).
b : Titik dimana nilai sudah dianggap masuk sepenuhnya ke dalam kategori (derajat keanggotaan 1).
Jika nilai x telah melewati titik b, maka derajat keanggotaannya bernilai 1.

2. Linear Turun

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x < a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (2.7)$$

Keterangan:
x : Nilai input yang terbaca dari sensor atau parameter sistem, misalnya nilai EC atau umur tanaman.
a : Titik dimana nilai mulai mengalami penurunan derajat keanggotaan.
b : Titik dimana nilai keanggotaan menjadi nol.
Jika nilai x berada di antara a dan b, maka nilai derajat keanggotaan dihitun secara linier. Apabila nilai x lebih besar dari b, maka nilai keanggotaannya menjadi 0

2.7.2 Penerapan Aturan Fuzzy (*Rule Evaluation*)

Aturan fuzzy (*IF–THEN rules*) merupakan inti dari sistem logika Fuzzy yang menghubungkan parameter masukan (*input*) dengan aksi keluaran (*output*) sistem. Dalam penelitian ini, aturan fuzzy dibentuk berdasarkan hubungan antara fase pertumbuhan tanaman melon (yang ditransmisikan secara *real-time* via website) dan nilai kepekatan nutrisi *Electrical Conductivity* (EC) aktual untuk menentukan durasi pemicuan kerja pompa nutrisi AB Mix (P1) maupun pompa air bersih (P2) secara otomatis. Setiap aturan dalam sistem ini direpresentasikan dalam bentuk klausa logika implikasi, contohnya:

- IF Fase Tanaman Awal AND EC Rendah THEN Pompa Nutrisi Lama AND Pompa Air Bersih Mati
- IF Fase Tanaman Awal AND EC Normal THEN Pompa Nutrisi Mati AND Pompa Air Bersih Mati
- IF Fase Tanaman Puncak AND EC Tinggi THEN Pompa Nutrisi Mati AND Pompa Air Bersih Lama

Proses evaluasi aturan pada metode Fuzzy Mamdani menggunakan operator MIN (Minimum) sebagai fungsi implikasi. Operator AND ini bertugas mencari

nilai derajat keanggotaan terkecil dari kedua variabel *input* yang saling terhubung untuk menetapkan nilai kekuatan Aturan (*Firing Strength*) pemicuan dari setiap aturan yang aktif. Rumus umum implikasi minimum yang digunakan adalah sebagai berikut (Nair et al., 2026):

$$\alpha_n = \min(\mu_{Umur}(x), \mu_{EC}(y))) \quad (2.8)$$

Keterangan:

α (Alpha Predikat)	: Nilai hasil dari aturan ke-n dengan rentang 0 sampai 1. Semakin mendekati 1, maka aturan tersebut semakin berpengaruh terhadap hasil keputusan.
min(Fungsi Minimum)	: Digunakan ketika dua input dihubungkan dengan operator logika AND. Sistem fuzzy Mamdani akan mengambil nilai keanggotaan terkecil sebagai hasil evaluasi aturan.
μUmur[x]	: Derajat keanggotaan variabel umur tanaman.
μEC[y]	: Derajat keanggotaan variabel EC (Nutrisi)

2.7.3 Agregasi Hasil Aturan *(Aggregation)*

Output dari setiap aturan fuzzy yang telah diaktivasi pada tahap inferensi selanjutnya digabungkan menjadi satu himpunan fuzzy keluaran. Proses ini disebut sebagai agregasi hasil aturan. Agregasi dilakukan dengan mengombinasikan seluruh hasil keluaran dari aturan-aturan fuzzy yang aktif sehingga diperoleh satu fungsi keanggotaan output yang merepresentasikan keputusan sistem secara keseluruhan.

Pada metode Fuzzy Mamdani, proses agregasi umumnya menggunakan operator maksimum *(MAX)* yang berfungsi untuk mengambil nilai derajat keanggotaan terbesar dari seluruh aturan yang diaktifkan. Operator ini merepresentasikan proses penggabungan *(union)* dari setiap keluaran aturan fuzzy. Dengan demikian, hasil agregasi merupakan kombinasi dari seluruh aturan yang berkontribusi dalam proses pengambilan keputusan sistem.

Fungsi agregasi menggunakan metode MAX dapat dirumuskan sebagai berikut (Albares & Estévez, 2021):

$$\mu_{output}(z) = \max(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n) \quad (2.9)$$

Keterangan:

$\mu\{output\}[z]$	: Fungsi keanggotaan keluaran hasil agregasi dari seluruh aturan fuzzy.
$\mu_1(z), \mu_2(z), \dots, \mu_n(z)$	: Fungsi keanggotaan keluaran dari masing-masing aturan fuzzy yang aktif.
Max	: Operator maksimum yang digunakan untuk mengambil nilai terbesar dari seluruh keluaran aturan fuzzy.

2.7.4 Defuzzifikasi (*Defuzzification*)

Hasil keluaran dari proses agregasi masih berupa nilai fuzzy yang belum dapat digunakan secara langsung dalam sistem nyata. Oleh karena itu, diperlukan proses defuzzifikasi untuk mengubah nilai fuzzy tersebut menjadi nilai tegas (crisp value) yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam sistem.

Defuzzifikasi merupakan tahap akhir dalam sistem logika Fuzzy yang bertujuan untuk menentukan nilai keluaran numerik berdasarkan fungsi keanggotaan hasil agregasi. Beberapa metode defuzzifikasi yang umum digunakan antara lain *Centroid* Method (metode pusat gravitasi), Mean of Maximum (MoM), dan Bisector Method.

Metode *centroid* dapat dirumuskan sebagai berikut (Arora et al., 2022) :

$$z^* = \frac{\int z\mu(z)dz}{\int \mu(z)dz} \quad (2.10)$$

Keterangan:

Z^*	: Nilai keluaran crisp hasil proses defuzzifikasi.
$\mu(z)$	: Fungsi keanggotaan hasil agregasi dari seluruh aturan fuzzy.
z	: Variabel keluaran sistem.
$\int$	: Simbol integral yang menunjukkan perhitungan luas area pada kurva fungsi keanggotaan.

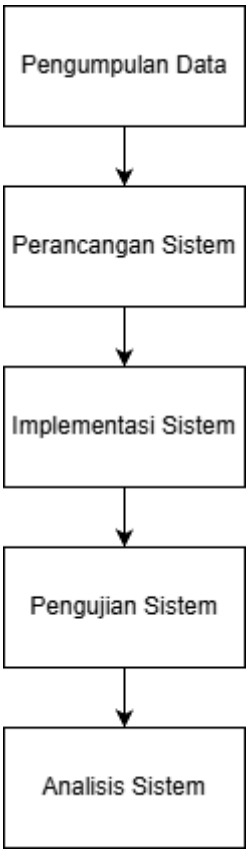
Sistem ini mengadopsi konsep variabel linguistik. Variabel linguistik merupakan suatu konsep dalam logika Fuzzy di mana nilai dari suatu parameter tidak dinyatakan melalui representasi angka mutlak, melainkan diekspresikan menggunakan terminologi atau kosakata bahasa manusia. Penggunaan variabel linguistik ini berfungsi untuk menerjemahkan data mentah sensor yang bersifat kaku menjadi kategori deskriptif agar sirkuit keputusan *mikrokontroler* dapat mengolah fluktuasi data lingkungan secara lebih fleksibel, adaptif, dan menyerupai pola pertimbangan logis seorang pakar pertanian.

BAB III

DESAIN DAN IMPLEMENTASI

3.1 Desain Penelitian

Penelitian berjalan secara teratur dan sistematis, penelitian ini dirancang menggunakan pendekatan kuantitatif. Seluruh parameter dan data yang diperoleh dapat diukur secara presisi untuk mempermudah proses analisis. Berikut ini *flowchart* alur penelitiannya:



Gambar 3. 1 Desain Penelitian

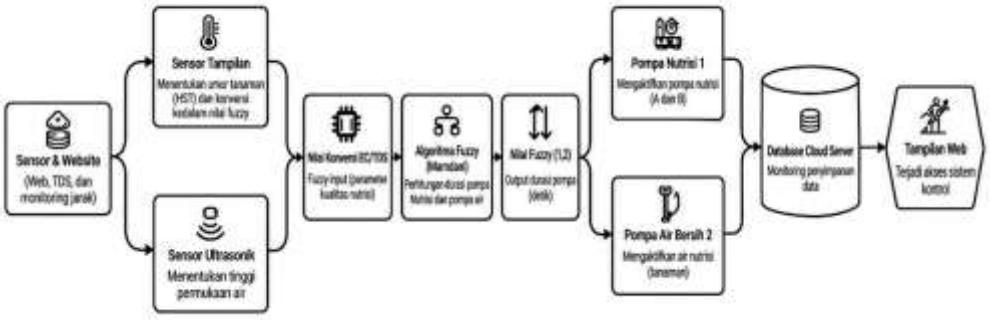
3.2 Prosedur Penelitian

Desain alur sistem pada penelitian ini menggambarkan mekanisme kerja sistem dalam melakukan pengontrolan nutrisi pada tanaman melon hidroponik secara otomatis. Sistem menggunakan sensor TDS untuk mengukur kandungan padatan terlarut pada larutan nutrisi yang kemudian dikonversi menjadi nilai EC (*Electrical Conductivity*) sebagai parameter pengontrolan nutrisi tanaman melon hidroponik.

Data dari masing-masing sensor kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan metode Fuzzy Mamdani. Proses tersebut dilakukan untuk menentukan keputusan pengontrolan berupa durasi kerja pompa nutrisi dan pompa air sesuai kondisi larutan nutrisi dan kebutuhan tanaman.

Hasil pengolahan data digunakan sebagai dasar pengendalian aktuator pada sistem hidroponik sehingga proses pemberian nutrisi dapat dilakukan secara otomatis dan lebih terkontrol.

Prosedur Penelitian Gambar 3.2, alur kerja arsitektur sistem kendali tertanam (*embedded system*) dirancang menggunakan sistem loop tertutup (*closed-loop system*). Sensor TDS analog dan sensor ultrasonik bertindak sebagai instrumen masukan (*input*) yang terpasang di dalam bak penampungan utama berkapasitas 6 Liter untuk membaca parameter kepekatan cairan (EC) serta ketinggian air secara *real-time*.



Gambar 3.2 Prosedur Penelitian

Data mentah tersebut dikirimkan menuju pusat pemroses data yaitu mikrokontroler ESP32. Secara simultan, ESP32 juga melakukan sinkronisasi data dengan server website (*Web-Based RTC*) untuk mengidentifikasi status variabel Hari Setelah Tanam (HST) guna menetapkan target *setpoint* fase pertumbuhan berjalan secara otomatis.

Setelah seluruh parameter diidentifikasi, data diproses menggunakan metode Logika Fuzzy Mamdani melalui tahapan *fuzzifikasi*, *rule evaluation* berbasis 6 aturan utama, dan *defuzzifikasi Centroid* diskrit. Hasil konversi akhir berupa nilai tegas durasi detik diinstruksikan langsung kepada modul *relay* dua channel sebagai saklar aktuasi.

Relay 1 bertugas memicu Pompa Nutrisi (P1) untuk menyuntikkan biang pupuk pekat dari wadah cadangan apabila nilai EC drop di bawah toleransi. Sementara itu, *relay* 2 bertugas mengaktifkan Pompa Air Bersih (P2) untuk menambahkan air murni ketika ketinggian air menyusut di bawah 80% atau saat larutan mengalami kepekatan berlebih (overdosis). Proses ini bertujuan untuk menjaga kestabilan kualitas air di dalam bak utama sistem sumbu agar kain flanel

tetap basah, sehingga akar tanaman melon dapat menyerap nutrisi secara optimal, higienis, dan terhindar dari risiko meluapnya air tandon.

3.3 Pengumpulan Data

Pada tahap pengumpulan beberapa data di penelitian ini, diperoleh dari sumber data berikut:

a. Data Primer

Data primer merupakan data yang diperoleh secara langsung oleh peneliti melalui proses pengamatan dan pengukuran pada objek penelitian. Pada penelitian ini data primer yang dikumpulkan meliputi nilai kepekatan nutrisi larutan yang diukur menggunakan sensor TDS serta data umur tanaman yang diperoleh dari *Web-Based RTC*. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai input dalam proses pengolahan data menggunakan metode Fuzzy Mamdani.

Tabel 3.1 sampel data uji sistem kendali nutrisi dan air hidroponik melon (fase vegetaatif) yang akan diinput ke dalam sistem *fuzzy*:

Tabel 3.1 Sampel Data Uji Sistem Kendali Nutrisi & Air Hidroponik Melon (Fase Vegetatif)

No	**Tanaman Melon (HST)**	**Fase Vegetatif**	**Kepekatan Terbaca (PPM)**	**Konversi ke Nilai EC (mS/cm)**	**Ketinggian Permukaan Air (%)**	**Skenario Kondisi Fisik & Aksi Sistem**
1	5 HST	Awal (1–14 HST)	400	0,80	90%	Nutrisi Rendah, Air Tinggi: Sistem mendeteksi PPM di bawah standar fase awal (< 1,2). Pompa AB Mix akan aktif untuk menaikkan kepekatan.

No	Tanaman Melon (HST)	Fase Vegetatif	Kepekatan Terbaca (PPM)	Konversi ke Nilai EC (mS/cm)	Ketinggian Permukaan Air (%)	Skenario Kondisi Fisik & Aksi Sistem
2	10 HST	Awal (1–14 HST)	650	1,30	92%	Nutrisi Normal, Air Tinggi: Kepekatan berada di kisaran optimal fase awal (1,2 - 1,6). Tidak ada aktuator penambah nutrisi yang aktif.
3	12 HST	Awal (1–14 HST)	900	1,80	85%	Nutrisi Tinggi, Air Tinggi: Kepekatan melampaui batas normal fase awal (> 1,6). Sistem memicu penambahan air baku untuk menurunkan EC.
4	18 HST	Puncak (15–30 HST)	1.100	2,20	50%	Nutrisi Tinggi, Air Sedang: Memasuki fase vegetatif puncak, nilai EC ini tergolong tinggi dari target optimal (1,6 - 2,0). Perlu pengenceran.
5	22 HST	Puncak (15–30 HST)	820	1,64	77%	Nutrisi Normal, Air Sedang: Nilai EC berada tepat di batas normal target fase puncak (1,6 - 2,0). Kondisi stabil.

No	Tanaman Melon (HST)	Fase Vegetatif	Kepekatan Terbaca (PPM)	Konversi ke Nilai EC (mS/cm)	Ketinggian Permukaan Air (%)	Skenario Kondisi Fisik & Aksi Sistem
6	26 HST	Puncak (15–30 HST)	1.175	2,35	35%	Nutrisi Tinggi, Air Kritis: ketinggian air tandon mendekati batas minimum (< 30%) dan nutrisi di atas rata-rata. Pompa air baku menyala untuk mengisi air sekaligus menyeimbangkan kepekatan.

Sampel data uji terdiri dari Tanaman Melon Hari Setelah Tanam(HST), Fase Vegetatif, Kepekatan Terbaca (PPM) Konversi ke Nilai EC (mS/cm), Ketinggian Permukaan Air (%) , Skenario Kondisi Fisik & Aksi Sistem.

3.3.1 Kebutuhan Perangkat Keras

Daftar perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam Tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3.2 Kebutuhan Perangkat Keras

No	Perangkat	Spesifikasi / Fungsi
1	ESP32 DevKit V1	Mikrokontroler utama untuk mengolah data sensor dan modul WiFi pengiriman data.
2	Sensor TDS	Alat untuk mengukur kepekatan nutrisi atau Total Dissolved Solids (PPM).
3	Relay 2 Channel	Saklar elektronik yang menghubungkan beban listrik dari ESP32 ke pompa air.
4	Pompa Air DC	Aktuator untuk mengalirkan larutan nutrisi ke tandon air sistem hidroponik.
5	Sensor Ultrasonik	Mengukur jarak atau ketinggian suatu objek

Untuk memperjelas implementasi integrasi perangkat keras di lapangan, skema pemetaan interkoneksi jalur kabel antar komponen (*wiring diagram*) dirancang secara terpusat menuju pin mikrokontroler ESP32. Gambar 3.3 menunjukkan visualisasi arsitektur rangkaian kelistrikan perangkat keras,



(a) box pelindung alat (b) isi box pelindung alat

Gambar 3. 3 Skema Jalur Rangkaian Perangkat Keras Kontroler ESP32

Gambar 3.3 memperlihatkan implementasi fisik sistem yang ditempatkan di dalam panel boks pelindung (*box enclosure*). Di dalam boks terdapat mikrokontroler ESP32, modul *dual relay*, serta dua unit pompa DC. Sisi luar boks dilengkapi dengan layar LCD I2C 16x2 untuk penayangan status lokal secara langsung, sensor TDS analog yang terhubung dengan probe larutan, serta sensor ultrasonik HC-SR04 di atas tandon air. sedangkan detail konfigurasi penataan pin (*pinout mapping*) dijabarkan secara rinci melalui Tabel 3.3 di bawah ini.

Tabel 3.3 Detail Konfigurasi Penataan Pin (Pinout Mapping) Perangkat Keras

No	Komponen Sumber	Nama Pin Komponen	Target Pin ESP32	Fungsi
1.	Sensor TDS Analog	• VCC (Merah) • GND (Hitam) • Analog Out (Hijau)	• 3V3 • GND • GPIO 34 (ADC1)	• Jalur daya referensi stabil 3.3V. • Gnd penyearah sistem (*common ground*). • Input analog pembacaan kepekatan larutan EC.
2.	Sensor Ultrasonik	• VCC • GND • Trig • Echo	• VIN / 5V • GND • GPIO 5 (Digital) • GPIO 18 (Digital)	• Jalur daya utama sensor gelombang. • Gnd penyearah sistem (*common ground*). • Trigger pemicu pulsa ultrasonik dari ESP32. • Echo masukan pantulan pulsa waktu jarak air.
3.	Antarmuka LCD I2C	• VCC • GND • SDA • SCL	• VIN / 5V • GND • GPIO 21 (I2C) • GPIO 22 (I2C)	• Jalur daya penyuplai lampu latar (*backlight*). • Gnd penyearah sistem (*common ground*). • Jalur transmisi data serial komunikasi LCD. • Jalur sinyal detak (*clock*) serial komunikasi LCD.
4.	Modul Dual Relay	• VCC • GND • IN1 (Relay 1) • IN2 (Relay 2)	• VIN / 5V • GND • GPIO 26 (Digital) • GPIO 25 (Digital)	• Jalur daya pemicu koil mekanis saklar. • Gnd penyearah sistem (*common ground*). • Aksi kontrol aktuasi durasi Pompa Nutrisi P1. • Aksi kontrol aktuasi durasi Pompa Air Bersih P2.

3.3.2 Kebutuhan Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang digunakan untuk mendukung pengembangan sistem ini disajikan dalam Tabel 3.4 sebagai berikut:

Tabel 3.4 Kebutuhan Perangkat Lunak

No	Nama Software	Kegunaan
1	Arduino IDE	Software untuk menulis kode program dan mengunggahnya ke ESP32.
2	VS Code	Editor untuk membangun antarmuka website (HTML, CSS, JavaScript).
3	Laragon & MySQL	Server lokal dan database untuk menyimpan riwayat data sensor secara terorganisir.
4	Fuzzy Logic Library	Pustaka khusus untuk menjalankan perhitungan algoritma Mamdani di dalam ESP32.

3.4 Perancangan Sistem

Pada penelitian ini, variabel EC (Electrical Conductivity) digunakan sebagai parameter utama untuk menentukan tingkat kepekatan nutrisi larutan hidroponik. Nilai EC diperoleh dari hasil konversi pembacaan sensor TDS sehingga dapat digunakan sebagai masukan dalam proses inferensi Fuzzy Mamdani.

Perancangan logika Fuzzy pada sistem ini menggunakan metode Fuzzy Mamdani dengan tiga variabel masukan (input) dan dua variabel keluaran (output). Variabel input terdiri atas umur tanaman, kepekatan nutrisi larutan (EC), dan ketinggian air, sedangkan variabel output berupa durasi kerja pompa nutrisi dan durasi kerja pompa air bersih.

Variabel umur tanaman digunakan untuk merepresentasikan fase pertumbuhan tanaman melon hidroponik. Variabel EC digunakan untuk menunjukkan tingkat kepekatan nutrisi pada larutan hidroponik, sedangkan

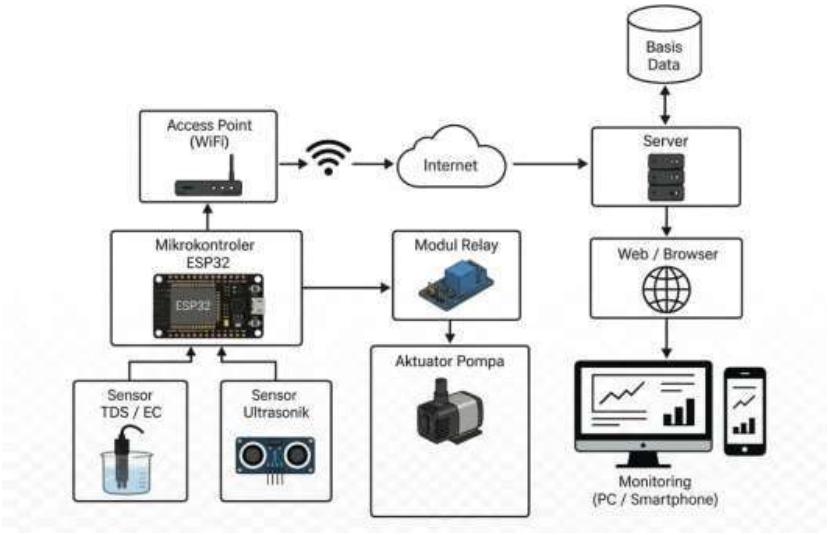
variabel ketinggian air digunakan untuk mengetahui kondisi ketersediaan air pada tangki nutrisi yang dibaca menggunakan sensor ultrasonik.

Berdasarkan ketiga variabel input tersebut, sistem logika Fuzzy Mamdani akan melakukan proses inferensi untuk menentukan durasi kerja pompa nutrisi AB Mix dan pompa air bersih secara otomatis sesuai dengan kondisi kebutuhan tanaman. Dengan penerapan metode fuzzy, sistem diharapkan mampu melakukan pengontrolan nutrisi secara lebih efektif dan sesuai dengan kondisi pertumbuhan tanaman melon hidroponik. Detail batasan variabel linguistik disajikan pada Tabel 3.5 berikut:

Tabel 3.5 Batasan Variabel Linguistik

Variabel	**Nama Himpunan**	**Rentang Nilai (Sesuai Fase)**	**Sumber**
EC (Electrical Conductivity Fase Awal (1 - 14 HST) Target: **1,3 mS/cm**	Rendah	< 1.2 mS/cm	(Indah et al., 2024); (Sun et al., 2023)
	Normal / Ideal	1.2 – 1.6 mS/cm	
	Tinggi	> 1. 6 mS/cm	
EC (Electrical Conductivity Fase Puncak (15 - 30 HST) Target: **1,7 mS/cm**	Rendah	< 1,6 mS/cm	
	Normal / Ideal	1,6 – 2,0 mS/cm	
	Tinggi	> 2,0 mS/cm	
Output	Sebentar / Lama	0 - n Detik	Pengujian Sistem

3.4.1 Desain Sistem Transmisi Data Ke Internet



Gambar 3.4 Desain Sistem Transmisi Data ke Internet

Gambar 3.4 sistem dimulai dari proses pembacaan data oleh sensor TDS dan sensor ultrasonik yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32. Sensor TDS digunakan untuk mengukur kandungan padatan terlarut (TDS) yang kemudian dikonversi menjadi nilai EC (*Electrical Conductivity*), sedangkan sensor ultrasonik digunakan untuk mendeteksi ketinggian air pada tangki nutrisi. Data hasil pembacaan sensor kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan metode Fuzzy Mamdani untuk menentukan durasi kerja pompa nutrisi dan pompa air bersih secara otomatis sesuai kondisi sistem hidroponik. Proses pengontrolan dilakukan secara lokal pada mikrokontroler sehingga sistem tetap dapat bekerja meskipun koneksi internet terputus.

Selain berfungsi sebagai pusat pengontrolan, ESP32 juga mengirimkan data hasil pembacaan sensor melalui jaringan WiFi menuju access point (AP) yang terhubung ke internet. Selanjutnya, data diteruskan ke server dan disimpan

ke dalam basis data sehingga informasi kondisi sistem dapat dikelola dan diakses kembali. Data tersebut kemudian ditampilkan melalui *web browser* dalam bentuk antarmuka monitoring yang dapat diakses menggunakan komputer maupun smartphone.

3.4.2 Variabel dan Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan digunakan untuk memetakan nilai input tegas (*crisp*) ke dalam himpunan fuzzy dengan rentang nilai keanggotaan antara 0 sampai 1. Pada penelitian ini, fungsi keanggotaan dibentuk menggunakan fungsi segitiga *triangular membership function*) dan fungsi bahu (*shoulder membership function*). Variabel yang digunakan dalam sistem logika Fuzzy terdiri atas tiga variabel input dan dua variabel output.

Variabel input meliputi umur tanaman, nilai kepekatan nutrisi (EC), dan ketinggian air. Variabel umur tanaman digunakan untuk merepresentasikan fase pertumbuhan tanaman melon hidroponik. Variabel EC digunakan untuk menunjukkan tingkat konsentrasi nutrisi dalam larutan hidroponik, sedangkan variabel ketinggian air digunakan untuk mengetahui kondisi ketersediaan air pada tangki nutrisi berdasarkan pembacaan sensor ultrasonik.

Variabel output terdiri atas durasi kerja pompa nutrisi dan durasi kerja pompa air bersih. Kedua variabel output tersebut digunakan sebagai dasar pengontrolan penambahan nutrisi dan air pada sistem hidroponik secara otomatis sesuai hasil proses inferensi Fuzzy Mamdani.

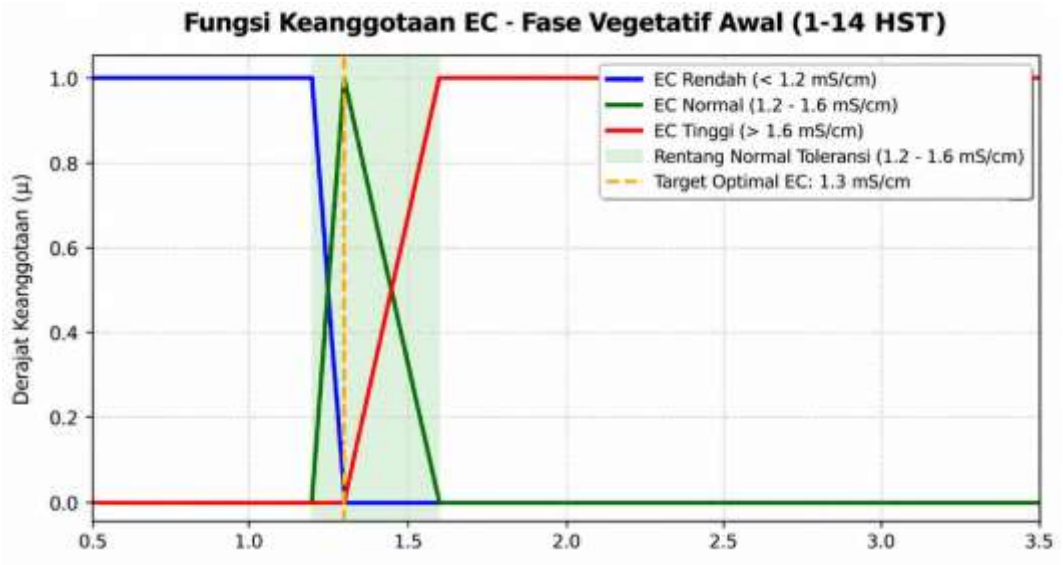
3.4.2.1 Fungsi Keanggotaan Fase Vegetatif Awal

Variabel *Electrical Conductivity* (EC) pada fase vegetatif awal digunakan untuk merepresentasikan tingkat kepekatan nutrisi larutan hidroponik yang dibutuhkan oleh tanaman melon pada fase awal pertumbuhan (1-14 HST). Variabel linguistic mempunyai rentang nilai EC pada fase ini ditetapkan antara 0,5 hingga 3,5 mS/cm, dengan target optimal sebesar 1,3 mS/cm dan rentang toleransi normal antara 1,2 - 1,6 mS/cm.

Berdasarkan target dan rentang toleransi tersebut, variabel EC pada fase vegetatif awal dibagi menjadi tiga himpunan linguistik dalam sistem fuzzy, yaitu:

- Rendah (< 1,2 mS/cm)
- Normal (1,2 - 1,6 mS/cm)
- Tinggi (> 1,6 mS/cm)

Berikut adalah gambar Berikut adalah gambar fungsi keanggotaan EC pada fase vegetatif awal (Atikah et al., 2023):



Gambar 3. 3 Fungsi Keanggotaan EC Fase Vegetatif Awal

Adapun tabel fungsi keanggotaan fase vegetatif awal sebagai berikut:

Tabel 3.6 Nilai Pada Fungsi Keanggotaan EC Fase Vegetatif Awal

No	Variabel Linguistik	Rentang EC (mS/cm)	Nilai pada Fungsi Keanggotaan
1.	Rendah	< 1,2	Bahu Kiri {0,5; 0,5; 1,2; 1,3}
2.	Normal	1,2 – 1,6	Segitiga {1,2; 1,3; 1,6}
3.	Tinggi	> 1,6	Bahu Kanan {1,3; 1,6; 3,5; 3,5}

Berdasarkan grafik fungsi keanggotaan yang ditunjukkan pada Gambar 3.5, derajat keanggotaan untuk setiap variabel linguistik EC dapat dihitung menggunakan fungsi linier naik dan linier turun.

Himpunan Rendah menggunakan fungsi bahu kiri (*left shoulder*). Nilai derajat keanggotaan bernilai maksimum ($\mu(x) = 1$) pada nilai EC ≤ 1,2 mS/cm, kemudian menurun secara linier hingga mencapai nilai 0 pada EC = 1,3 mS/cm.

Adapun persamaannya sebagai berikut (Carrasco-Garrido et al., 2025):

$$\mu_{\text{Rendah}}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 1{,}2 \\ \frac{1{,}3-x}{1{,}3-1{,}2}, & 1{,}2 < x < 1{,}3 \\ 0, & x \geq 1{,}3 \end{cases} \quad (3.1)$$

Himpunan fuzzy Normal direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga dengan titik batas bawah sebesar 1,2 mS/cm, titik puncak sebesar 1,3 mS/cm, dan titik batas atas sebesar 1,6 mS/cm. Derajat keanggotaan meningkat secara linier dari nilai 0 pada 1,2 mS/cm hingga mencapai nilai maksimum 1 pada 1,3 mS/cm. Selanjutnya, derajat keanggotaan menurun secara linier hingga kembali menjadi 0 pada 1,6 mS/cm. Nilai di luar rentang tersebut memiliki derajat keanggotaan sebesar 0.

Adapun persamaannya sebagai berikut (Yun, 2021):

$$\mu_{\text{Normal}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1.2 \text{ atau } x \geq 1.6 \\ \frac{x-1.2}{1.3-1.2}, & 1.2 < x \leq 1.3 \\ 1, & 1.3 < x < 1.6 \\ \frac{1.6-x}{1.6-1.3}, & 1.3 \leq x < 1.6 \end{cases} \quad (3.2)$$

Persamaan 3.2 mendefinisikan fungsi keanggotaan segitiga untuk himpunan EC Normal pada Fase Vegetatif Awal ($1{,}2 - 1{,}6$ mS/cm). Dari persamaan tersebut, apabila sensor membaca nilai $EC \leq 1{,}2$ mS/cm atau $EC \geq 1{,}6$ mS/cm, maka derajat keanggotaannya adalah 0 ($\mu_{\text{Normal}} = 0$). Jika nilai EC berada di antara 1,2 dan 1,3 mS/cm, derajat keanggotaannya dihitung menggunakan persamaan linier naik $\frac{x-1{,}2}{1{,}3-1{,}2}$. Ketika nilai EC mencapai tepat pada target setpoint 1,3 mS/cm, derajat keanggotaannya mencapai nilai maksimum

mutlak yaitu 1,0. Selanjutnya, jika EC berada di antara 1,3 dan 1,6 mS/cm, derajat keanggotaannya menurun secara linier melalui persamaan $\frac{1,6-x}{1,6-1,3}$.

Himpunan *Tinggi* menggunakan fungsi bahu kanan (*right shoulder*). Nilai derajat keanggotaan bernilai 0 pada nilai EC $\leq$ 1,3 mS/cm, kemudian meningkat secara linier dari nilai 0 pada 1,3 mS/cm hingga mencapai nilai maksimum 1 pada EC $=$ 1,6 mS/cm.

Adapun persamaannya sebagai berikut (Pancardo et al., 2021):

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1,3 \\ \frac{x-1,3}{1,6-1,3}, & 1,3 < x < 1,6 \\ 1, & x \geq 1,6 \end{cases} \quad (3.3)$$

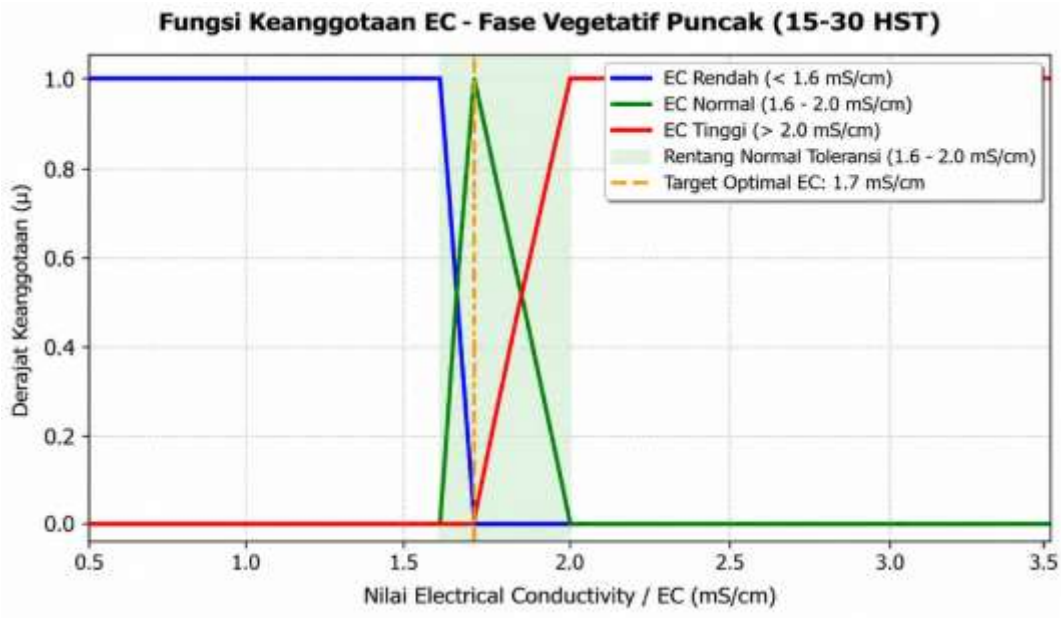
3.4.2.2 Fungsi Keanggotaan Fase Vegetatif Puncak

Variabel *Electrical Conductivity* (EC) pada fase vegetatif puncak digunakan untuk merepresentasikan tingkat kepekatan nutrisi larutan hidroponik yang dibutuhkan oleh tanaman melon pada fase pertumbuhan vegetatif puncak. Rentang nilai EC pada fase ini ditetapkan antara 0,5 hingga 3,2 mS/cm, dengan target optimal sebesar 1,7 mS/cm dan rentang toleransi normal antara 1,6–2,0 mS/cm.

Berdasarkan target dan rentang toleransi tersebut, variabel EC pada fase vegetatif puncak dibagi menjadi tiga himpunan linguistik dalam sistem fuzzy, yaitu:

- Rendah (< 1,6 mS/cm)
- Normal (1,6 – 2,0 mS/cm)
- Tinggi (> 2,0 mS/cm)

Berikut adalah gambar Berikut adalah gambar fungsi keanggotaan EC pada fase vegetatif puncak:



Gambar 3. 4 Fungsi Keanggotaan EC Fase Vegetatif Puncak

Adapun tabel fungsi keanggotaan fase vegetatif puncak sebagai berikut:

Tabel 3.7 Nilai Pada Fungsi Keanggotaan EC Fase Vegetatif Puncak

No	Variabel Linguistik	Rentang EC (mS/cm)	Nilai pada Fungsi Keanggotaan
1.	Rendah	< 1,6	Bahu Kiri {0,5; 0,5; 1,6; 1,7}
2.	Normal	1,6 – 2,0	Segitiga {1,6; 1,7; 2,0}
3.	Tinggi	> 2,0	Bahu Kanan {1,7; 2,0; 3,2; 3,2}

Himpunan Rendah menggunakan fungsi bahu kiri (*left shoulder*). Nilai derajat keanggotaan bernilai maksimum ($\mu(x) = 1$) pada nilai EC ≤ 1,6 mS/cm, kemudian menurun secara linier hingga mencapai nilai 0 pada EC = 1,7 mS/cm (Viaña et al., 2022).

Adapun persamaannya sebagai berikut:

$$\mu_{\text{Rendah}}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 1.6 \\ \frac{1.7-x}{1.7-1.6}, & 1.6 < x < 1.7 \\ 0, & x \geq 1.7 \end{cases} \quad (3.4)$$

Himpunan fuzzy Normal pada fase vegetatif puncak direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga dengan titik batas bawah sebesar 1,6 mS/cm, titik puncak sebesar 1,7 mS/cm, dan titik batas atas sebesar 2,0 mS/cm. Derajat keanggotaan meningkat secara linier dari nilai 0 pada 1,6 mS/cm hingga mencapai nilai maksimum 1 pada 1,7 mS/cm. Selanjutnya, derajat keanggotaan menurun secara linier hingga kembali menjadi 0 pada 2,0 mS/cm. Nilai di luar rentang tersebut memiliki derajat keanggotaan sebesar 0

Adapun persamaannya sebagai berikut:

$$\mu_{\text{Normal}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1.6 \text{ atau } x \geq 2.0 \\ \frac{x-1.6}{1.7-1.6}, & 1.6 < x \leq 1.7 \\ \frac{2.0-x}{2.0-1.7}, & 1.7 < x < 2.0 \end{cases} \quad (3.5)$$

Himpunan Tinggi pada fase vegetatif puncak menggunakan fungsi bahu kanan (*right shoulder*). Nilai derajat keanggotaan bernilai 0 pada nilai EC ≤ 1,7 mS/cm, kemudian meningkat secara linier dari nilai 0 pada 1,7 mS/cm hingga mencapai nilai maksimum 1 pada EC = 2,0 mS/cm.

Adapun persamaannya sebagai berikut:

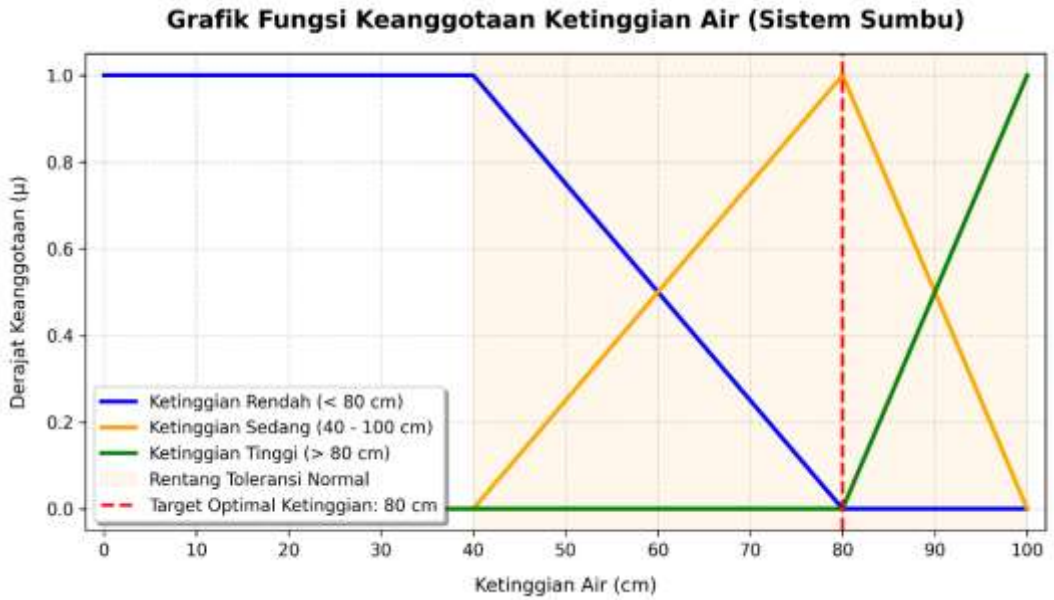
$$\mu_{\text{Tinggi}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1.7 \\ \frac{x-1.7}{2.0-1.7}, & 1.7 < x < 2.0 \\ 1, & x \geq 2.0 \end{cases} \quad (3.6)$$

3.4.2.3 Fungsi Keanggotaan Ketinggian Air

Variabel ketinggian air digunakan untuk mengetahui kondisi jumlah air pada tandon hidroponik sistem sumbu (*wick system*) yang diukur menggunakan sensor ultrasonik. Variabel ini berfungsi sebagai parameter tambahan dalam sistem fuzzy untuk membantu menjaga kestabilan ketinggian permukaan air agar kain flanel selalu terendam, sekaligus menjaga konsentrasi larutan nutrisi.

Rentang ketinggian air ditetapkan antara 0% hingga 100% kapasitas tandon (semesta pembicaraan). Berdasarkan kebutuhan kapilaritas kain flanel, target optimal ketinggian air ditetapkan sebesar 80% dengan rentang toleransi normal antara 40% – 100%. Variabel ketinggian air dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy, yaitu Rendah, Sedang, dan Tinggi.

Berikut adalah gambar fungsi keanggotaan ketinggian air:



Gambar 3. 5 Fungsi Keanggotaan Ketinggian Air

Adapun tabel nilai fungsi keanggotaan ketinggian air sebagai berikut:

Tabel 3.8 Nilai Pada Fungsi Keanggotaan Ketinggian Air

No	Variabel Linguistik	Rentang Ketinggian Air (%)	Nilai pada Fungsi Keanggotaan
1.	Rendah	< 80%	Bahu Kiri {0; 0; 40; 80}
2.	Sedang	40% – 100%	Segitiga {40; 80; 100}
3.	Tinggi	> 80%	Bahu Kanan {80; 100; 100; 100}

Berdasarkan grafik fungsi keanggotaan ketinggian air, derajat keanggotaan setiap himpunan fuzzy dihitung menggunakan fungsi linier naik dan linier turun.

Keanggotaan Rendah menggunakan fungsi bahu kiri. Nilai derajat keanggotaan bernilai maksimum $(\mu(x) = 1)$ pada ketinggian air $\leq$ 40% dan menurun secara linier hingga mencapai nilai 0 pada ketinggian air 80%.

Adapun bentuk persamaannya adalah sebagai berikut (Syahputri et al., 2022):

$$\mu_{\text{Rendah}}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 40 \\ \frac{80-x}{80-40}, & 40 < x < 80 \\ 0, & x \geq 80 \end{cases} \quad (3.7)$$

Himpunan fuzzy Sedang direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga dengan titik batas bawah sebesar 40%, titik puncak sebesar 80%, dan titik batas atas sebesar 100%. Derajat keanggotaan meningkat secara linier dari nilai 0 pada 40% hingga mencapai nilai maksimum 1 pada ketinggian air 80%. Selanjutnya, derajat keanggotaan menurun secara linier hingga kembali menjadi 0 pada ketinggian air 100%. Nilai di luar rentang tersebut memiliki derajat keanggotaan sebesar 0.

Adapun bentuk persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\mu_{\text{Sedang}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 40 \text{ atau } x \geq 100 \\ \frac{x-40}{80-40}, & 40 < x \leq 80 \\ \frac{100-x}{100-80}, & 80 < x < 100 \end{cases} \quad (3.8)$$

Himpunan Tinggi menggunakan fungsi bahu kanan (*right shoulder*). Nilai derajat keanggotaan bernilai 0 pada ketinggian air ≤80%, kemudian meningkat secara linier dari nilai 0 pada 80% hingga mencapai nilai maksimum 1 pada ketinggian air 100%.

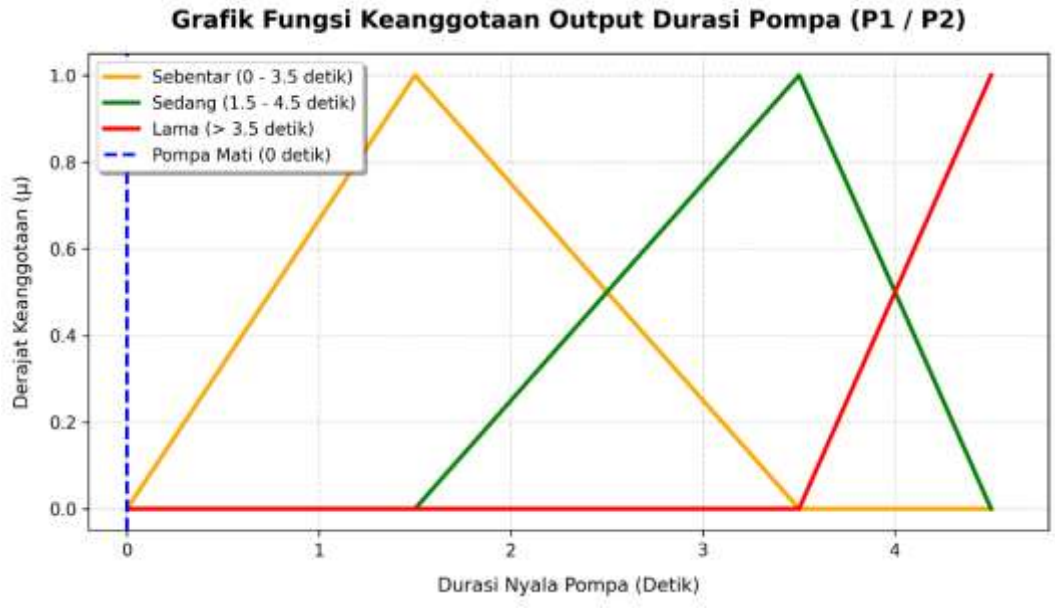
Adapun bentuk persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\mu_{\text{Tinggi}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 80 \\ \frac{x-80}{100-80}, & 80 < x < 100 \\ 1, & x \geq 100 \end{cases} \quad (3.9)$$

3.4.2.4 Fungsi Keanggotaan Output Pompa Nutrisi

Variabel *output* pada sistem ini adalah durasi kerja pompa nutrisi yang dinyatakan dalam satuan detik. Variabel ini digunakan untuk menentukan lama waktu pemberian nutrisi kepada tanaman melon hidroponik sistem sumbu berdasarkan hasil proses inferensi *Fuzzy Mamdani*. Hasil inferensi fuzzy berupa durasi aktif pompa nutrisi digunakan untuk mengontrol penambahan larutan nutrisi secara otomatis melalui *relay* sesuai kebutuhan tanaman.

Rentang nilai *output* durasi pompa nutrisi ditetapkan antara 0 hingga 4,5 detik (semesta pembicaraan). Berdasarkan rentang tersebut, variabel *output* dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy, yaitu Sebentar, Sedang, dan Lama. Fungsi keanggotaan *output* durasi pompa nutrisi terdiri atas fungsi segitiga untuk himpunan Sebentar dan Sedang, serta fungsi bahu kanan (*right shoulder*) untuk himpunan Lama. Berikut adalah gambar fungsi keanggotaan output pompa nutrisi:



Gambar 3. 6 Fungsi Keanggotaan Output Durasi Pompa

Adapun tabel nilai fungsi keanggotaan output pompa nutrisi sebagai berikut:

Tabel 3.9 Nilai Pada Fungsi Keanggotaan Output Pompa Nutrisi

No	Variabel Linguistik	Rentang Nilai (detik)	Nilai pada Fungsi Keanggotaan
1.	Sebentar	0 – 3,5	Bahu Kiri {0; 1,5; 3,5}
2.	Sedang	1,5 – 4,5	Segitiga {1,5; 3,5; 4,5}
3.	Lama	≥ 3,5	Bahu Kanan {3,5; 4,5; 4,5; 4,5}

Himpunan fuzzy Sebentar direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga dengan titik batas bawah sebesar 0 detik, titik puncak sebesar 1,5 detik, dan titik batas atas sebesar 3,5 detik. Derajat keanggotaan meningkat secara linier dari nilai 0 pada 0 detik hingga mencapai nilai maksimum 1 pada 1,5 detik, kemudian menurun secara linier hingga kembali menjadi 0 pada durasi 3,5 detik.

Adapun bentuk persamaannya adalah sebagai berikut (Kosheleva & Kreinovich, 2023):

$$\mu_{\text{Sebentar}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \text{ atau } x \geq 3.5 \\ \frac{x}{1.5}, & 0 < x \leq 1.5 \\ \frac{3.5-x}{3.5-1.5}, & 1.5 < x < 3.5 \end{cases} \quad (3.10)$$

Himpunan fuzzy Sedang direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga dengan titik batas bawah sebesar 1,5 detik, titik puncak sebesar 3,5 detik, dan titik batas atas sebesar 4,5 detik. Derajat keanggotaan meningkat secara linier dari nilai 0 pada 1,5 detik hingga mencapai nilai maksimum

1 pada 3,5 detik, kemudian menurun secara linier hingga kembali menjadi 0 pada durasi 4,5 detik.

Adapun bentuk persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\mu_{\text{Sedang}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1.5 \text{ atau } x \geq 4.5 \\ \frac{x-1.5}{3.5-1.5}, & 1.5 < x \leq 3.5 \\ \frac{4.5-x}{4.5-3.5}, & 3.5 < x < 4.5 \end{cases} \quad (3.11)$$

Himpunan *Lama* menggunakan fungsi bahu kanan (*right shoulder*). Nilai derajat keanggotaan bernilai 0 pada durasi pompa ≤ 3,5 detik, kemudian meningkat secara linier dari nilai 0 pada 3,5 detik hingga mencapai nilai maksimum 1 pada durasi 4,5 detik.

Adapun bentuk persamaannya adalah sebagai berikut:

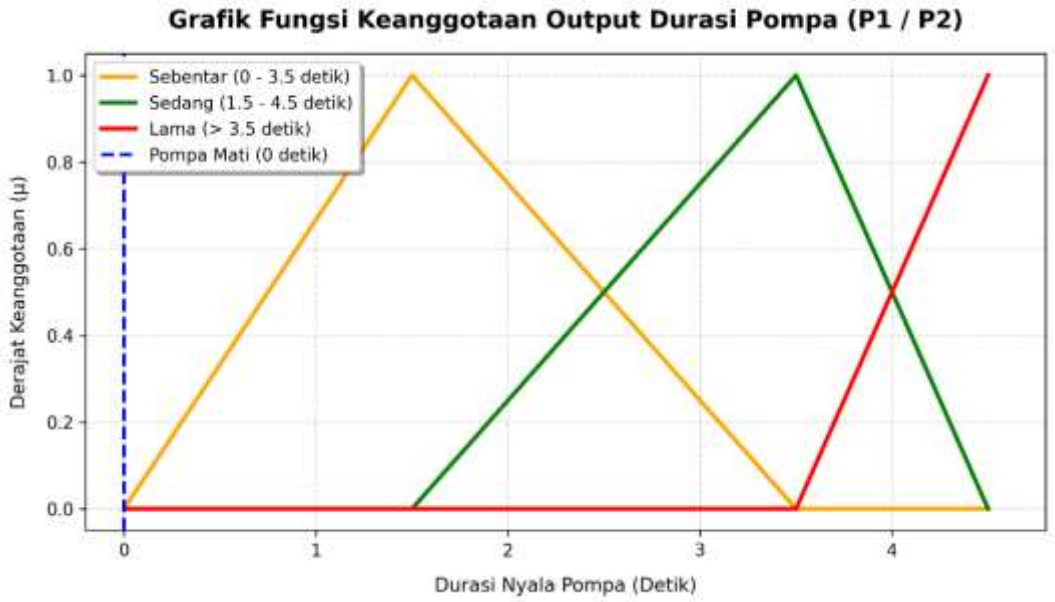
$$\mu_{Lama}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 3,5 \\ \frac{x-3,5}{4,5-3,5}, & 3,5 < x < 4,5 \\ 1, & x \geq 4,5 \end{cases} \quad (3.12)$$

3.4.2.5 Fungsi Keanggotaan Output Pompa Air Bersih

Variabel *output* pompa air bersih digunakan untuk menentukan durasi penambahan air bersih ke dalam tandon hidroponik berdasarkan hasil inferensi *Fuzzy Mamdani*. Penambahan air bersih dilakukan untuk membantu menjaga kestabilan volume larutan nutrisi agar kain flanel tetap terendam, serta menurunkan konsentrasi larutan apabila nilai EC berada di atas rentang optimal (kelebihan nutrisi). *Output* fuzzy ini menghasilkan durasi kerja pompa air bersih yang dinyatakan dalam satuan detik dan digunakan sebagai dasar pengendalian aktuator pada sistem hidroponik secara otomatis melalui modul *relay*.

Rentang nilai *output* pompa air bersih ditetapkan antara 0 hingga 4,5 detik (semesta pembicaraan). Berdasarkan rentang tersebut, variabel *output* dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy, yaitu Sebentar, Sedang, dan Lama. Fungsi keanggotaan *output* durasi pompa air bersih terdiri atas fungsi segitiga untuk himpunan Sebentar dan Sedang, serta fungsi bahu kanan (*right shoulder*) untuk himpunan Lama. Kondisi pompa tidak aktif atau mati direpresentasikan secara tegas (*crisp*) pada nilai mutlak 0 detik.

Himpunan Sebentar merepresentasikan kondisi pompa bekerja dalam durasi singkat untuk menambahkan air bersih dalam jumlah kecil ketika penyimpangan volume atau kepekatan nutrisi tergolong rendah. Himpunan Sedang merepresentasikan kondisi pompa bekerja dalam durasi menengah untuk menambahkan air dalam jumlah yang cukup. Sementara itu, himpunan Lama merepresentasikan kondisi pompa bekerja dalam durasi maksimal untuk menambahkan air dalam jumlah yang lebih banyak guna mengatasi penyusutan air tandon yang kritis atau mengencerkan larutan nutrisi yang mengalami overdosis pekat. Berikut adalah gambar fungsi keanggotaan output pompa air bersih:



Gambar 3. 7 Fungsi Keanggotaan Output Durasi Pompa

Adapun tabel nilai fungsi keanggotaan output pompa nutrisi sebagai berikut:

Tabel 3.10 Nilai Pada Fungsi Keanggotaan Output Pompa Air Bersih

No	Variabel Linguistik	Rentang Nilai (detik)	Nilai pada Fungsi Keanggotaan
1.	Sebentar	0 – 3,5	Bahu Kiri {0; 1,5; 3,5}
2.	Sedang	1,5 – 4,5	Segitiga {1,5; 3,5; 4,5}
3.	Lama	≥ 3,5	Bahu Kanan {3,5; 4,5; 4,5; 4,5}

Himpunan fuzzy Sebentar direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga dengan titik batas bawah sebesar 0 detik, titik puncak sebesar 1,5 detik, dan titik batas atas sebesar 3,5 detik. Derajat keanggotaan meningkat secara linier dari nilai 0 pada 0 detik hingga mencapai nilai maksimum 1 pada 1,5 detik, kemudian menurun secara linier hingga kembali

menjadi 0 pada durasi 3,5 detik. Adapun bentuk persamaannya adalah sebagai berikut (Kosheleva & Kreinovich, 2023):

$$\mu_{\text{Sebentar}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \text{ atau } x \geq 3.5 \\ \frac{x}{1.5}, & 0 < x \leq 1.5 \\ \frac{3.5-x}{3.5-1.5}, & 1.5 < x < 3.5 \end{cases} \quad (3.13)$$

Himpunan fuzzy Sedang direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga dengan titik batas bawah sebesar 1,5 detik, titik puncak sebesar 3,5 detik, dan titik batas atas sebesar 4,5 detik. Derajat keanggotaan meningkat secara linier dari nilai 0 pada 1,5 detik hingga mencapai nilai maksimum 1 pada 3,5 detik, kemudian menurun secara linier hingga kembali menjadi 0 pada durasi 4,5 detik.

Adapun bentuk persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\mu_{\text{Sedang}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1.5 \text{ atau } x \geq 4.5 \\ \frac{x-1.5}{3.5-1.5}, & 1.5 < x \leq 3.5 \\ \frac{4.5-x}{4.5-3.5}, & 3.5 < x < 4.5 \end{cases} \quad (3.14)$$

Himpunan Lama menggunakan fungsi bahu kanan (*right shoulder*). Nilai derajat keanggotaan bernilai 0 pada durasi pompa ≤3,5 detik, kemudian meningkat secara linier dari nilai 0 pada 3,5 detik hingga mencapai nilai maksimum 1 pada durasi 4,5 detik. Adapun bentuk persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\mu_{\text{Lama}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 3.5 \\ \frac{x-3.5}{4.5-3.5}, & 3.5 < x < 4.5 \\ 1, & x \geq 4.5 \end{cases} \quad (3.15)$$

3.4.3 Basis Aturan (Rule Base) & Inferensi.

Basis aturan (*rule base*) merupakan kumpulan aturan fuzzy yang digunakan untuk menghubungkan variabel masukan (*input*) dengan variabel keluaran (*output*) dalam sistem logika Fuzzy Mamdani. Pada penelitian ini, sistem fuzzy menggunakan parameter *input* berupa nilai *Electrical Conductivity* (EC) yang target sasarannya ditentukan secara dinamis berdasarkan instruksi waktu fase pertumbuhan tanaman (Hari Setelah Tanam/HST) dari website melalui komunikasi IoT (Web-RTC). Sedangkan variabel *output* terdiri atas durasi kerja pompa nutrisi AB Mix (P1) dan durasi kerja pompa air bersih (P2).

Aturan fuzzy disusun dalam bentuk pernyataan implikasi *IF–THEN* yang merepresentasikan hubungan logis antara fase tanaman dan nilai kepekatan EC saat itu terhadap respons durasi detik aktif pompa. Aturan ini dirancang untuk menjaga konsentrasi larutan nutrisi pada bak utama sistem sumbu (*wick system*) tetap berada pada batas aman pertumbuhan tanaman melon tanpa risiko kekurangan gizi (*stunting*) maupun kelebihan nutrisi (*nutrient burn*).

Ketika nilai EC dideteksi berada pada kondisi Rendah di bawah ambang batas toleransi fase berjalan, sistem akan memicu Pompa Nutrisi (P1) dengan durasi Lama (4,5 detik) untuk menyuntikkan biang pekat ke dalam bak utama. Sebaliknya, apabila nilai EC berada pada kondisi Normal, kedua pompa akan berada pada kondisi Mati (0 detik) demi mempertahankan kestabilan larutan. Jika nilai EC melonjak mencapai kondisi Tinggi, sirkuit logika akan mengaktifkan Pompa Air Bersih (P2) dengan durasi Lama (4,5 detik) untuk melakukan pengenceran larutan secara otomatis.

Selain basis aturan konduktivitas listrik di atas, terdapat satu aturan prioritas (*interrupt rule*) independen untuk parameter ketinggian air yang dibaca oleh sensor ultrasonik: IF ketinggian Air adalah Rendah (< 80%), THEN Output P2 (Air Bersih) adalah Lama (4,5 detik) dan Output P1 adalah Mati. Aturan pemotong ini bekerja secara mandiri untuk memastikan air di dalam bak utama selalu penuh sehingga sumbu kain flanel tetap terendam dan terhindar dari risiko kekeringan.

Melalui kombinasi parameter ini, sistem kendali fuzzy Mamdani berhasil diperingkas menjadi 6 basis aturan utama yang padat, responsif, dan bebas dari risiko tumpang tindih sirkuit logika aktuator. Adapun basis aturan (*rule base*) fuzzy Mamdani pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.11 berikut.

Tabel 3.11 Basis Aturan (Rule Base) Fuzzy Mamdani

Rule	**Fase Vegetatif Pada Tanaman**	**Kondisi EC (mS/cm)**	**Output P1 (Nutrisi)**	**Output P2 (Air)**
R1	Awal (1 - 14 HST)	Rendah (< 1,2)	Lama 4.5 detik	Mati
R2	Awal (1 - 14 HST)	Normal (1,2 - 1,6)	Mati	Mati
R3	Awal (1 - 14 HST)	Tinggi (> 1,6)	Mati	Lama 4,5 detik
R4	Puncak (15 - 30 HST)	Rendah (< 1,6)	Lama 4,5 detik	Mati
R5	Puncak (15 - 30 HST)	Normal (1,6 - 2,0)	Mati	Mati
R6	Puncak (15 - 30 HST)	Tinggi (> 2,0)	Mati	Lama 4,5 detik

3.4.3.1 Proses Inferensi

Proses inferensi merupakan tahapan penalaran logis untuk mengombinasikan derajat keanggotaan dari seluruh variabel masukan (*input*) yang aktif menggunakan basis aturan / *rule base* berformat *IF–THEN*. Penelitian ini, sirkuit logika inferensi mengevaluasi nilai konduktivitas listrik larutan (*Electrical Conductivity*/EC) secara dinamis sesuai dengan batas toleransi dari fase pertumbuhan tanaman melon (Fase Vegetatif Awal atau Fase Vegetatif Puncak).

Implementasi operator logika hubungan antar variabel menggunakan metode *MIN (Minimum)* untuk mencari nilai α -predikat (*firing strength*) pada setiap aturan yang terpenuhi. Adapun persamaan matematis untuk mencari nilai α predikat minimum pada setiap aturan *i* dirumuskan sebagai berikut (Almadiy et al., 2023):

$$\alpha\text{-predikat}_i = \min\left(\mu_{\text{Input1}}(x), \mu_{\text{Input2}}(y)\right)\right) \tag{3.16}$$

Setelah nilai α -predikat dari masing-masing aturan yang aktif diperoleh, sistem melakukan pemotongan (*clipping*) pada area kurva fungsi keanggotaan *output* durasi pompa (Sebentar, Sedang, atau Lama). Selanjutnya, hasil pemotongan dari seluruh aturan dikombinasikan melalui proses komposisi aturan (agregasi) menggunakan metode MAX (Maximum) sebelum masuk ke tahap defuzzifikasi.

Persamaan umum untuk proses komposisi aturan di dalam memori mikrokontroler ESP32 dirumuskan sebagai berikut (Lambat et al., 2021):

$$\mu_{\text{Agregasi}}(z) = \max\left(\mu_{\text{Output1}}(z), \mu_{\text{Output2}}(z), \dots, \mu_{\text{Outputn}}(z)\right)\right) \tag{3.17}$$

3.4.3.2 Defuzzifikasi (Surface & *Centroid*)

Defuzzifikasi merupakan tahap akhir pada sistem logika Fuzzy Mamdani yang berfungsi untuk mengubah keluaran fuzzy (himpunan) menjadi nilai tegas (*crisp*). Pada penelitian ini, proses defuzzifikasi digunakan untuk menentukan nilai durasi kerja pompa nutrisi (P1) dan pompa air bersih (P2) berdasarkan hasil inferensi fuzzy dari variabel input fase pertumbuhan tanaman (vegetatif awal atau vegetatif puncak) yang diterima dari website, serta nilai EC aktual.

Metode defuzzifikasi yang digunakan adalah metode *Centroid (Center of Area)* karena metode ini mampu menghasilkan nilai keluaran yang merepresentasikan keseluruhan daerah hasil agregasi fungsi keanggotaan *output*. Metode *centroid* dilakukan dengan menghitung titik pusat atau titik berat dari luas area gabungan fungsi keanggotaan *output* yang diperoleh dari proses inferensi fuzzy. Secara matematis, kalkulasi titik berat diskrit yang ditanamkan pada program mikrokontroler ESP32 dirumuskan melalui persamaan berikut (Lambat et al., 2021):

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^{n} z_j \cdot \mu_{\text{Agregasi}}(z_j)}{\sum_{j=1}^{n} \mu_{\text{Agregasi}}(z_j)} \tag{3.18}$$

Dimana:

Z*	= Nilai tegas (crisp output) hasil akhir berupa durasi kerja pompa (detik).
z_j	= Nilai durasi sampel pada semesta pembicaraan output (rentang 0 hingga 4,5 detik).
μ_Agregasi(z_j)	=Nilai derajat keanggotaan output hasil dari proses agregasi atau komposisi aturan fuzzy.

Persamaan 3.18 menerapkan metode Center of Area (*Centroid*) secara diskrit yang ditanamkan (embedded) pada memori mikrokontroler ESP32. Persamaan ini membagi total perkalian titik sampel durasi z_j dengan derajat keanggotaan agregasinya $\mu_{\text{Agregasi}}(z_j)$ terhadap jumlah keseluruhan derajat keanggotaannya. Kalkulasi komputasi diskrit ini menghasilkan satu nilai tegas (crisp value) berupa durasi detik aktif pemicuan *relay* pompa nutrisi (P_1) maupun pompa air bersih (P_2) secara otomatis.

3.4.3.3 Metode Defuzzifikasi *Centroid*

Metode *centroid* secara teoritis dirumuskan menggunakan persamaan integral kontinu sebagai berikut (Mitsuishi, 2022):

$$Z^* = \frac{\int z \cdot \mu(z)\, dz}{\int \mu(z)\, dz} \tag{3.19}$$

Dimana:
Z : nilai output tegas (durasi pompa nutrisi)
z : variabel output
$\mu(z)$: derajat keanggotaan output hasil agregasi
Nilai Z yang diperoleh merupakan nilai akhir yang digunakan untuk mengendalikan durasi kerja pompa nutrisi.

Persamaan 3.19 merupakan landasan matematis kontinu dari metode *Centroid*. Pada implementasi perangkat keras (*embedded hardware*), bentuk integral kontinu pada Persamaan 3.19 ditransformasikan menjadi bentuk penjumlahan diskrit pada Persamaan 3.18 agar dapat dieksekusi secara efisien oleh prosesor mikrokontroler ESP32 tanpa membebani kapasitas memori.

3.4.3.4 Rancangan Pengujian Algoritma pada Perangkat Keras

Rancangan pengujian algoritma dilakukan untuk mempersiapkan skenario validasi terhadap fungsionalitas komputasi logika Fuzzy Mamdani yang telah

ditanamkan ke dalam memori mikrokontroler ESP32. Karena penelitian ini menitikberatkan fokus pada keandalan sistem kendali perangkat keras (*hardware*), pengujian ini bertujuan untuk membuktikan bahwa durasi aktif *relay* pada Pompa Nutrisi (P1) dan Pompa Air Bersih (P2) yang dihasilkan oleh mesin program secara nyata (*real-time*) memiliki nilai yang akurat dan sinkron dengan perhitungan matematis teoritis yang telah dirancang.

Skenario pengujian dirancang menggunakan metode pengujian fungsional (*black-box testing*) dengan cara memberikan variasi nilai masukan (*input*) tiruan pada sensor TDS/EC dan tingkat ketinggian air di dalam program, kemudian mengamati durasi pemicuan waktu aktif pada pin *output relay*. Validasi sistem dilakukan dengan menganalisis nilai galat (*error*) antara durasi pemicuan fisik *relay* terhadap durasi target hasil perhitungan manual menggunakan rumus persentase *error* berikut (Erdani & Ramdani, 2024):

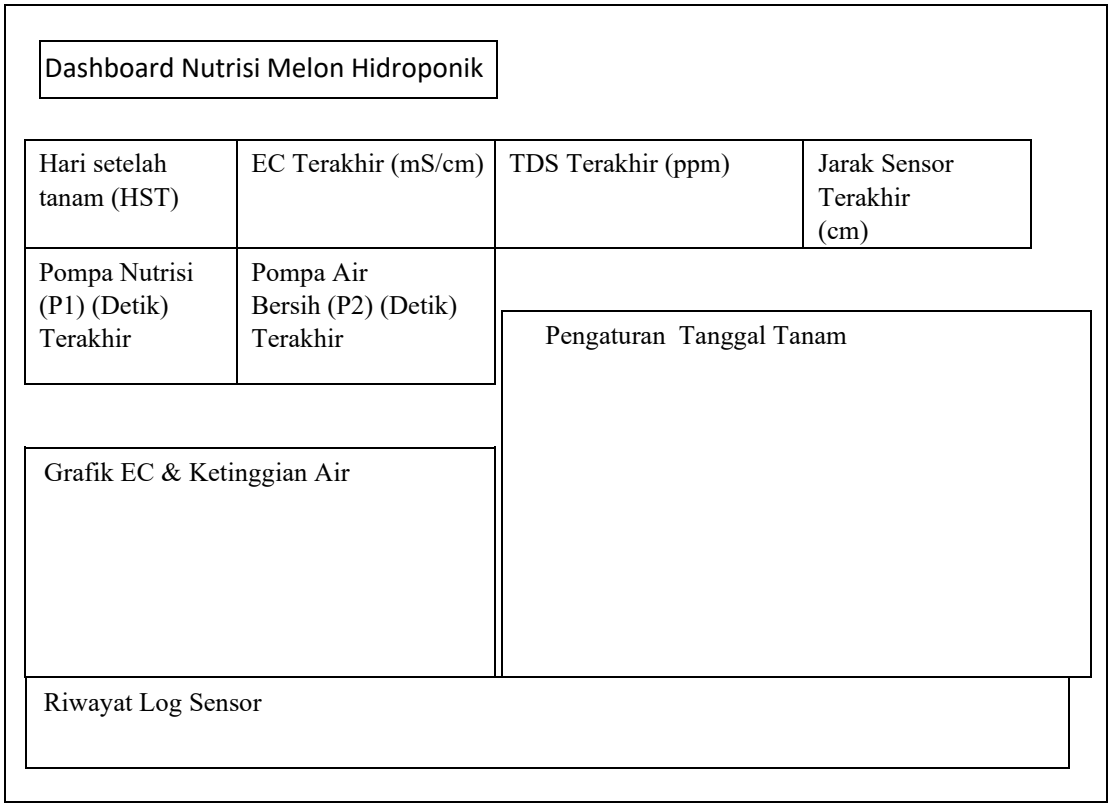
$$\text{Error } (\%) = \left|\frac{\text{Durasi Teori} - \text{Durasi Nyata Alat}}{\text{Durasi teori}}\right| \times 100\% \qquad (3.20)$$

Matriks rencana pengujian validasi logika Fuzzy dan analisis uji *error* pada perangkat keras pada Tabel 3.12 berikut:

Tabel 3.12 Matriks Rencana Pengujian Validasi Logika Fuzzy ESP32

Skenario Input Fase (Website)	**Simulasi Input Sensor EC (mS/cm)**	**Simulasi Input Ketinggian Air (%)**	**Aturan Aktif (*Rule*)**	**Output P1 Target (Teori Detik)**	**Output P2 Target (Teori Detik)**	**Target Error (%)**	**Status Eksekusi**
Vegetatif awal	0,8 Rendah	90% Tinggi	R1	4,50 detik	0,00 detik	0,00%	Belum Diuji
Vegetatif awal	1,3 Normal	92% Tinggi	R2	0,00 detik	0,00 detik	0,00%	Belum Diuji
Vegetatif awal	1,8 Tinggi	85% Tinggi	R3	0,00 detik	4,50 detik	0,00%	Belum Diuji
Vegetatif puncak	0,22Rendah	82,8% Tinggi	R4	4,20 detik	0,00 detik	0,00%	Belum Diuji
Vegetatif puncak	1,64 Normal	77,1% Sedang	R5	0,00 detik	0,00 detik	0,00%	Belum Diuji
Vegetatif puncak	2,35 Tinggi	82,8% Sedang	R6	0,00 detik	4,20 detik	0,00%	Belum Diuji

3.4.4 Perancangan Antarmuka *(User interface)*



Gambar 3. 8 *User interface* Nutrisi Tanaman Melon Hidroponik

Adanya *dashboard web* Gambar 3.10 bertujuan agar pengguna dapat memantau parameter kualitas air, ketersediaan nutrisi, dan kerja secara *realtime* dari mana pun dan kapan pun melalui peramban (*browser*). Pembangunan antarmuka ini dirancang dengan memperhatikan prinsip *User interface* (UI) dan *User Experience* (UX) melalui susunan *card widget*, grafik visual, serta tata letak yang bersih (*clean design*) agar pengguna merasa nyaman, dan dapat dengan cepat memahami kondisi terkini sistem tanaman melon hidroponik.

3.5 Implementasi Sistem

Tahap implementasi sistem merupakan proses merealisasikan seluruh hasil perancangan perangkat keras dan perangkat lunak ke dalam bentuk prototipe fisik yang siap dioperasikan. Implementasi ini mencakup integrasi antara sirkuit elektronik mikrokontroler ESP32, instrumen sensor, modul *relay*, aktuator pompa, hingga konektivitas ke *server cloud* dan antarmuka *dashboard website*. Secara umum, implementasi sistem dibagi menjadi tiga bagian utama:

1. Integrasi Perangkat Keras

   Penempatan Komponen Utama: Mikrokontroler ESP32, modul *dual-channel relay*, dan dua unit pompa DC (Pompa Nutrisi P1 dan Pompa Air Bersih P2) dirakit di dalam panel boks pelindung (*box enclosure*) guna melindungi sirkuit elektronik dari percikan air maupun kelembapan tinggi.

- Penginstalan Instrumen Sensor

  Sensor TDS analog dipasang di dalam bak penampungan utama berkapasitas 6 Liter untuk mencelupkan *probe* larutan, sedangkan sensor

ultrasonik HC-SR04 ditempatkan secara vertikal di bagian atas boks penampungan untuk mengukur jarak permukaan cairan tandon.

- Isolasi Catuan Daya Listrik

Untuk menjamin kestabilan pembacaan data sensor analog dari gangguan arus (*voltage spike*), mikrokontroler ESP32 dan instrumen sensor disuplai menggunakan *power bank* terisolasi. Sementara itu, beban arus besar pada aktuator kedua pompa disuplai secara terpisah menggunakan unit *power supply* DC.

2. Pengunggahan Kode Program

- Komputasi Logika Fuzzy Mamdani

Kode program yang berisi algoritma Fuzzy Mamdani (fuzzifikasi, evaluasi 6 basis aturan, dan defuzzifikasi *Centroid* diskrit) diunggah (*flash*) ke dalam memori flash ESP32 menggunakan *software* Arduino IDE.

- Konektivitas Nirkabel (Wi-Fi)

Mikrokontroler dihubungkan ke jaringan internet lokal melalui modul Wi-Fi internal ESP32 untuk mentransmisikan data log pembacaan sensor secara *real-time* ke basis data server *cloud*.

3. Integrasi Sistem Pewaktuan Berbasis Website (*Web-Based RTC*)

- Sinkronisasi Umur Tanaman (HST)

Berbeda dengan penggunaan modul *hardware* RTC fisik, sistem ini memanfaatkan skema *Web-Based RTC*. Mikrokontroler ESP32 melakukan *request*

data waktu dan Hari Setelah Tanam (HST) dari *database website* setiap kali dinyalakan.

- Otomatisasi Target Set Point

Hasil sinkronisasi nilai HST secara otomatis menentukan mode kontrol aktif pada memori ESP32, yaitu memicu Fase Vegetatif Awal (1–14 HST) dengan target *set point* 1,3 mS/cm atau Fase Vegetatif Puncak (15–30 HST) dengan targe*t set point* 1,7 mS/cm

3.6 Evaluasi Sistem

Tahap evaluasi dilakukan untuk memastikan seluruh komponen perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) pada sistem dapat bekerja secara sinkron sesuai dengan perancangan yang telah dilakukan. Pengujian difokuskan pada akurasi pembacaan sensor TDS dan sensor, kestabilan proses pengontrolan durasi aktif *relay* menggunakan metode Fuzzy Mamdani, serta respons sistem terhadap perubahan kondisi nutrisi dan ketinggian air pada bak penampungan utama sistem sumbu (*wick system*).

Evaluasi kinerja sistem dilakukan secara kuantitatif melalui metode analisis pengujian galat (*error testing*). Nilai persentase *error* didapatkan dengan membandingkan parameter hasil pembacaan nyata oleh perangkat keras di lapangan terhadap nilai target acuan teoritis maupun alat ukur manual standar pabrik. Hasil pengujian ini digunakan sebagai landasan utama untuk mengevaluasi keandalan sirkuit logika mikrokontroler ESP32 dalam melakukan pengontrolan nutrisi

tanaman melon secara otomatis, sehingga sistem dapat dibuktikan bekerja secara valid sesuai dengan kondisi yang telah dirancang.

3.6.1 Pengujian Sistem Pewaktuan Berbasis Website *(Web-Based RTC)*

Tujuan pengujian ini memastikan algoritma penanggalan (*Web-Based RTC*) pada sistem IoT dapat menghitung umur pertumbuhan tanaman melon (Hari Setelah Tanam/HST) secara otomatis melalui database website, serta memastikan data fase berjalan berhasil ditransmisikan ke mikrokontroler ESP32 secara akurat meskipun perangkat keras sempat mengalami putus koneksi atau mati daya.

Adapun rencana pengujian sistem pewaktuan berbasis website ditunjukkan pada Tabel 3.13 berikut.

Tabel 3.13 Rencana Pengujian Sinkronisasi Waktu Sistem (Web-Based RTC)

No	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Status
1.	Menyetel tanggal awal tanam (Hari ke-1) pada halaman *dashboard* website.	Database website menyimpan tanggal awal tanam dan memulai hitungan dengan benar.	Sesuai/Tidak Sesuai
2.	Memantau perubahan data umur tanaman pada website selama transisi 24 jam.	Nilai umur tanaman (HST) pada database bertambah 1 hari secara otomatis tepat pada pukul 00:00 WIB.	Sesuai/Tidak Sesuai
3.	Memutus koneksi internet atau mematikan daya ESP32, lalu menghidupkannya.	Begitu ESP32 kembali menyala dan terhubung ke internet, ia langsung mengambil data hari terbaru dari website tanpa ke angka nol.	Sesuai/Tidak Sesuai
4.	Mengubah umur tanaman dari hari ke-14 menjadi hari ke-15 pada database website.	ESP32 berhasil menangkap perubahan data dan otomatis menggeser mode dari Fase Vegetatif Awal ke Fase Vegetatif Puncak.	Sesuai/Tidak Sesuai

No	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Status
5.	Mematikan catu daya utama (*power supply*) pada boks alat saat hari ke-3, membiarkannya mati selama 2 jam, lalu menghidupkannya kembali.	Saat ESP32 menyala kembali, perangkat langsung mengambil data waktu terbaru dari server sehingga nilai HST tetap berada di angka 3 (tidak ter-*reset* ke nol).	Sesuai/Tidak Sesuai
6.	Mengubah parameter tanggal secara manual di halaman *dashboard website* dari hari ke-14 menjadi hari ke-15 untuk menyimulasikan pergantian fase pertumbuhan melon.	ESP32 berhasil menangkap perubahan parameter harian tersebut, layar LCD memperbarui tampilan teks menjadi "HST: 15", dan sirkuit logika Fuzzy otomatis menggeser mode target kontrol nutrisi dari Fase Vegetatif Awal menuju Fase Vegetatif Puncak.	Sesuai/Tidak Sesuai

3.6.2 Pengujian Error Sistem Fuzzy Mamdani

Untuk mengetahui perbedaan antara hasil perhitungan sistem fuzzy pada simulasi Google Colab dengan hasil implementasi pada alat, dilakukan perhitungan nilai error. Perhitungan error dilakukan dengan membandingkan nilai target durasi pompa yang dihasilkan oleh Google Colab dengan nilai realisasi durasi pompa pada alat. Rumus perhitungan error dapat dinyatakan sebagai berikut (Dhafir et al., 2026):

$$\text{Error}(\%) = \frac{|\text{Target} - \text{Realisasi}|}{\text{Target}} \times 100\% \qquad (3.21)$$

Keterangan:
Target = hasil perhitungan fuzzy Google Colab
Realisasi = hasil durasi pompa pada alat
Error = selisih keduanya dalam persen

Tabel 3.14 merupakan Rencana Uji Eror Logika Fuzzy:

Tabel 3.14 Rencana Uji Eror Logika Fuzzy

No	Skenario Input Fase (Website)	Simulasi Input Sensor EC (mS/cm)	Simulasi Input Ketinggian Air (%)	Output P1 Target (Teori Detik)	Realisasi Pompa P1 Alat (Detik)	Target Error P1 (%)	Target Pompa P2 Teori (Detik)	Realisasi Pompa P2 Alat (Detik)	Error P2 (%)	Nilai EC Setelah Fuzzy Bekerja (mS/cm)	Skenario Kondisi Akhir Larutan
1.	Vegetatif awal	Belum Diuji	%	4,50 detik	Belum Diuji	Belum Diuji	0,00 detik	Belum Diuji	Belum Diuji	Belum Diuji	Belum Diuji
2.	Vegetatif awal	Belum Diuji	%	0,00 detik	Belum Diuji	Belum Diuji	0,00 detik	Belum Diuji	Belum Diuji	Belum Diuji	Belum Diuji
3.	Vegetatif awal	Belum Diuji	%	0,00 detik	Belum Diuji	Belum Diuji	4,50 detik	Belum Diuji	Belum Diuji	Belum Diuji	Belum Diuji
4.	Vegetatif puncak	Belum Diuji	%	4,20 detik	Belum Diuji	Belum Diuji	0,00 detik	Belum Diuji	Belum Diuji	Belum Diuji	Belum Diuji
5.	Vegetatif puncak	Belum Diuji	%	0,00 detik	Belum Diuji	Belum Diuji	0,00 detik	Belum Diuji	Belum Diuji	Belum Diuji	Belum Diuji
6.	Vegetatif puncak	Belum Diuji	%	0,00 detik	Belum Diuji	Belum Diuji	4,20 detik	Belum Diuji	Belum Diuji	Belum Diuji	Belum Diuji
Rata-rata Error						Belum Diuji			Belum Diuji		

3.7 Analisis Sistem

Tahap analisis sistem merupakan tahapan akhir dari metodologi penelitian. Pada subbab ini dijelaskan teknik dan kriteria evaluasi yang digunakan untuk menganalisis data hasil pengujian. Analisis mencakup:

1. Analisis Akurasi Sensor

Mengukur tingkat keandalan pembacaan nilai kepekatan EC dari sensor TDS dan pembacaan jarak permukaan air dari sensor ultrasonik HC-SR04 dibandingkan dengan alat ukur acuan.

2. Analisis Kinerja Aktuator

Mengukur presisi waktu pemicuan saklar *relay* serta konsistensi debit aliran cairan (mL/detik) pada Pompa Nutrisi (P1) dan Pompa Air Bersih (P2).

3. Analisis Presisi Logika Fuzzy

Menilai sejauh mana algoritma Fuzzy Mamdani mampu memberikan kendali durasi pompa yang adaptif dan halus (*smooth*) sesuai dengan sub-fase pertumbuhan vegetatif tanaman melon.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Realisasi Perangkat Keras Dan Integrasi Sistem IoT

Realisasi perangkat keras pada Gambar 4.1 penelitian ini mencakup perakitan seluruh komponen elektronika menjadi satu kesatuan sistem, pengontrolan nutrisi hidroponik sistem sumbu (*wick system*) yang terintegrasi dengan *Internet of Things*. Pusat kendali sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 yang bertugas mengolah seluruh data masukan dari sensor.



Gambar 4.1 Realisasi Perangkat Keras Dan Integrasi Sistem IoT

Menjalankan algoritma *Fuzzy Mamdani*, melakukan sinkronisasi penanggalan berbasis website (*Web-Based RTC*), dan mengirimkan data pemantauan kembali ke server melalui koneksi nirkabel (Wi-Fi).

Integrasi sistem melibatkan dua instrumen sensor utama yang terpasang pada bak penampungan utama berkapasitas 6 Liter, yaitu sensor TDS untuk mengukur kepekatan nutrisi dalam satuan EC (*Electrical Conductivity*) serta sensor ultrasonik untuk mendeteksi ketersediaan volume larutan air. Perhitungan Hari Setelah Tanam

(HST) diproses secara cerdas dari sisi server website, lalu ditransmisikan ke ESP32 secara *real-time* untuk memicu perpindahan fase target kontrol secara otomatis.

Data hasil pengolahan komputasi dari ESP32 selanjutnya diinstruksikan kepada aktuator berupa modul *relay* dua channel yang mengatur sirkulasi daya listrik menuju pompa nutrisi AB Mix (P1) dan pompa air bersih (P2). Untuk menjamin stabilitas daya sirkuit dan menghindari fluktuasi tegangan induksi (*voltage spike*) yang dapat mengganggu akurasi pembacaan sensor analog, sistem mikrokontroler beserta sensor disuplai menggunakan *power bank* secara terisolasi. Sementara itu, beban arus besar pada aktuator kedua pompa disuplai secara terpisah menggunakan unit *switching power supply* melalui perantara modul *relay*. Seluruh data hasil pemantauan dan riwayat durasi pemicuan pompa tersebut kemudian divisualisasikan secara *real-time* melalui antarmuka *dashboard* website.

4.2 Hasil Pengujian Dan Kalibrasi Sensor

Tahap ini dilakukan untuk memvalidasi tingkat akurasi dan presisi pembacaan data sebelum diproses ke dalam mesin inferensi *fuzzy.*

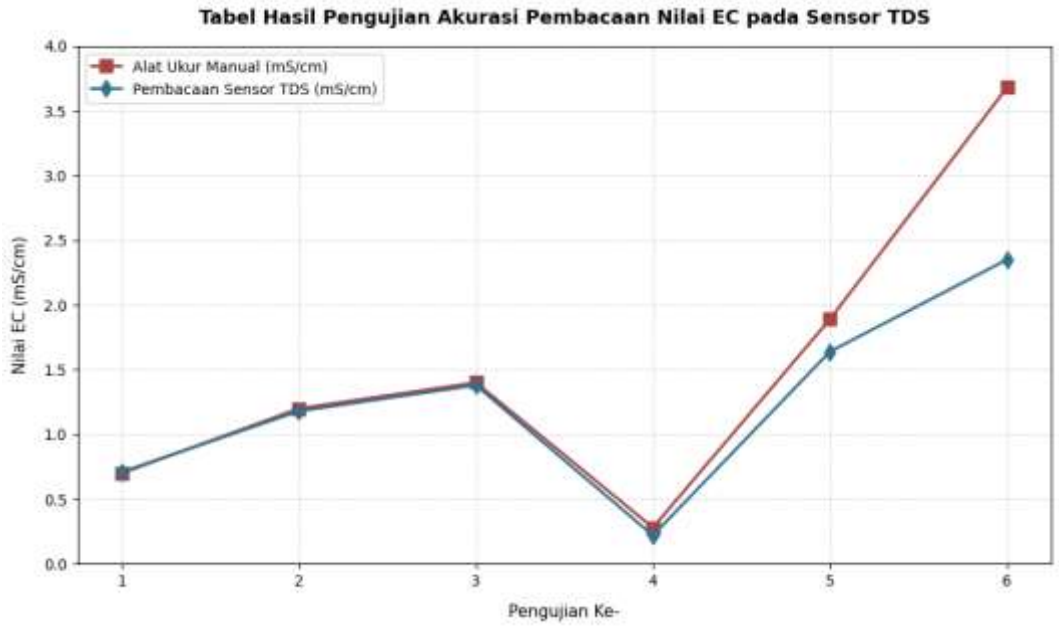
4.2.1 Pengujian Dan Kalibrasi Sensor TDS (Nilai EC)

Sensor TDS pada sistem ini berfungsi sebagai masukan sensor (*input sensor*) yang memantau tingkat kepekatan larutan dengan cara menentukan durasi nyala ataupun mati pompa nutrisi (P1) serta pompa air bersih (P2) sesuai dengan *setpoint* fase yang telah ditentukan. Pengujian dilakukan menggunakan larutan nutrisi dengan berbagai variasi tingkat kepekatan pada batas fase vegetatif tanaman melon pada bak penampungan utama sistem sumbu (*wick system*). Sebagai pembanding instrumen presisi, digunakan alat ukur EC Meter digital komersial yang telah

terkalibrasi pabrik. Data hasil eksperimen pengujian kalibrasi sensor TDS ditunjukkan pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Eror Pembacaan Nilai EC pada Sensor TDS

Pengujian Ke-	**Sensor TDS (mS/cm)**	**Alat Ukur Manual (mS/cm)**	**Selisih**	**Error (%)**
1	0,71	0,7	0,01	1,42
2	1,18	1,2	0,02	1,66
3	1,38	1,4	0,02	1,43
4	0,22	0,2	0,06	21,43
5	1,64	1,89	0,25	13,23
6	2,35	3,68	1,33	36,14
Rata – rata Error (%)				12,55



Gambar 4.2 Pengujian Dan Kalibrasi Sensor TDS (Nilai EC)

Data pada Tabel 4.1 merupakan hasil dari nilai *EC* (kepekatan nutrisi) yang berhasil dibaca oleh sensor TDS dan EC Meter digital manual. Pada Gambar 4.2

mempresentasikan perbedaan dari hasil pengujian kepekatan nutrisi. Kedua data tersebut selanjutnya akan dihitung persentase *error* dan nilai rata-rata *error*. *Error* didapatkan dengan melakukan perhitungan *relative error* pada kedua data tersebut. Berikut merupakan perhitungan *error* dengan nilai sebenarnya pada data pertama dari sensor TDS dan EC Meter digital manual (Zarkashie et al., 2022):

$$\text{Error} = \frac{|\text{EC Pembacaan Sensor} - \text{EC Alat Ukur Manual}|}{\text{EC Alat Ukur Manual}} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$\text{Error} = \frac{|0{,}71 - 0{,}70|}{0{,}70} \times 100\%$$

$$\text{Error} = 1{,}42\%$$

Hasil yang didapatkan pada perhitungan error menggunakan data yang pertama kepekatan nutrisi sensor TDS dengan EC Meter digital manual adalah 1,42%.

$$\text{Rata-rata error} = \frac{\sum \text{Error}}{\sum n} \quad (4.2)$$

$$\text{Rata-rata error} = \frac{75{,}31\%}{6}$$

$$\text{Rata-rata error} = 12{,}55\%$$

Hasil dari rata-rata perbandingan antara kepekatan nutrisi sensor TDS dengan EC Meter digital manual adalah sebesar 12,55%.

Berdasarkan Gambar 4.2 dan Tabel 4.1, grafik menunjukkan bahwa pembacaan sensor TDS memiliki pola linier yang presisi pada rentang rendah hingga sedang ($0{,}7 - 1{,}4$ mS/cm) dengan rata-rata error di bawah 1,7%. Namun, pada pengujian ke-6 (3,68 mS/cm), terjadi peningkatan error hingga 36,14%. Hal ini disebabkan oleh sifat fisik sensor TDS analog

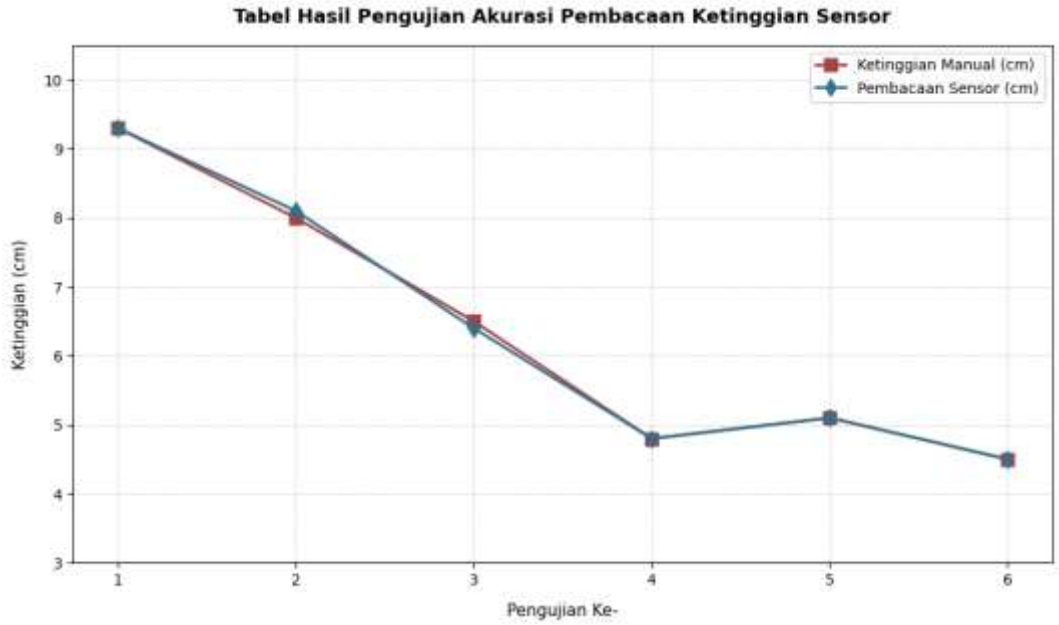
tipe resisitif/konduktif yang mengalami kejenuhan (saturation) ion pada konsentrasi larutan pekat di atas 2,5 mS/cm, serta adanya efek polarisasi pada probe sensor. Meskipun demikian, karena rentang operasional target sistem hanya berada pada kisaran $1{,}2 - 2{,}0$ mS/cm, deviasi pada konsentrasi tinggi tidak mengganggu performa utama kendali fuzzy.

4.2.2 Pengujian Dan Kalibrasi Sensor Ultrasonik (Ketinggian Air)

Sensor ultrasonik pada sistem ini digunakan untuk mendeteksi ketinggian level permukaan cairan di dalam bak utama penampungan sistem sumbu (*wick system*). Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai jarak vertikal pantulan gelombang sensor terhadap hasil pengukuran manual secara fisik menggunakan penggaris presisi. Selisih pembacaan dikonversi menjadi persentase galat guna mengevaluasi keandalan sensor dalam memantau penyusutan ketinggian air. Data hasil eksperimen pengujian kalibrasi sensor ultrasonik ditunjukkan pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Eror Jarak Sensor Ultrasonik HC-SR04

Pengujian Ke-	**Sensor Ultrasonik HC-SR04 (cm)**	**Penggaris (cm)**	**Selisih**	**Error (%)**
1	9,30	9,30	0,00	0,00
2	8,10	8,00	0,10	1,25
3	6,40	6,50	0,10	1,54
4	4,80	4,80	0,00	0,00
5	5,10	5,10	0,00	0,00
6	4,50	4,50	0,00	0,00
Rata – rata Error (%)				0,47



Gambar 4.3 Grafik Pengujian Dan Kalibrasi Sensor Ultrasonik (Ketinggian Air)

Data pada Tabel 4.2 merupakan hasil dari nilai jarak/ketinggian air yang berhasil dibaca oleh sensor ultrasonik HC-SR04 dan pengukuran manual menggunakan penggaris/meteran. Kedua data tersebut selanjutnya akan dihitung persentase *error* dan nilai rata-rata *error*. *Error* didapatkan dengan melakukan perhitungan *relative error* pada kedua data tersebut. Berikut merupakan perhitungan *error* dengan nilai sebenarnya pada data pertama dari sensor ultrasonic HC-SR04 dan pengukuran manual (Haq et al., 2026):

$$\text{Error} = \frac{|\text{Pembacaan Sensor} - \text{Ketinggian Manual}|}{\text{Ketinggian Manual}} \times 100\% \qquad (4.3)$$

$$\text{Error} = \frac{|9{,}30 - 9{,}30|}{9{,}30} \times 100\%$$

Hasil yang didapatkan pada perhitungan error menggunakan data yang pertama jarak sensor ultrasonik HC-SR04 dengan pengukuran manual adalah 0,00%.

$$\text{Rata-rata error} = \frac{\sum \text{Error}}{\sum n} \tag{4.4}$$

$$\text{Rata-rata error} = \frac{2{,}79\%}{6}$$

$$\text{Rata-rata error} = 0{,}47\%$$

Hasil dari rata-rata perbandingan antara pembacaan jarak sensor ultrasonik HC-SR04 dengan pengukuran manual adalah sebesar 0,47%.

4.3 Pengujian Sistem Pewaktuan Berbasis Website (*Web-Based RTC*)

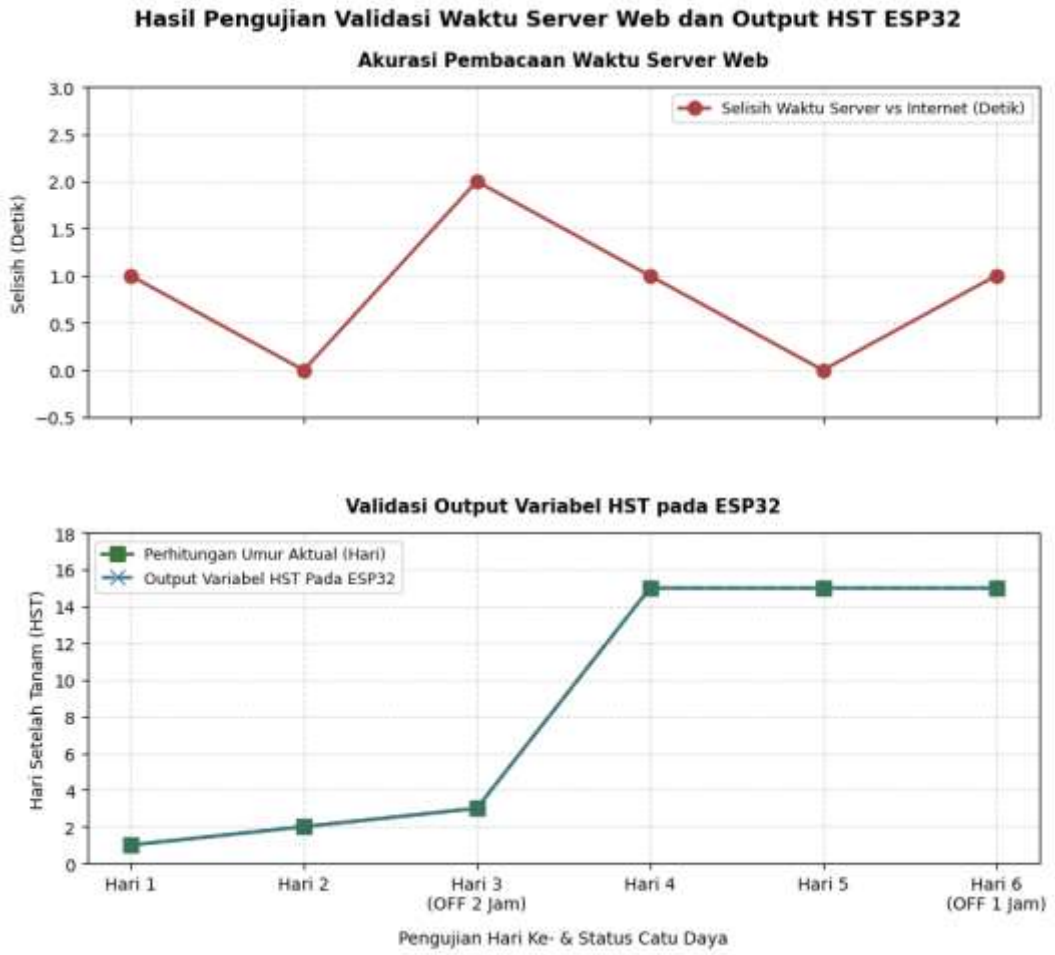
Pengujian sistem pewaktuan berbasis website (*Web-Based RTC*) dilakukan untuk memastikan keandalan pencatatan waktu nyata (*real-time*) yang digunakan sebagai dasar perhitungan umur pertumbuhan tanaman melon berdasarkan Hari Setelah Tanam (HST). Parameter HST ini sangat krusial karena menjadi salah satu variabel penentu target kebutuhan nutrisi tanaman dalam memicu perpindahan fase otomatis pada sistem kendali.

Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai tanggal, waktu, dan kalkulasi HST pada basis data server website terhadap waktu standar Waktu Indonesia Barat (WIB) melalui jaringan internet. Selain itu, pengujian juga dilakukan dengan skenario memutus catu daya utama (mematikan perangkat ESP32) selama beberapa jam untuk memastikan bahwa server website tetap menjaga kontinuitas data umur tanaman secara terpusat, sehingga saat ESP32 dinyalakan kembali, nilai variabel HST pada sistem tidak ter-reset ke angka nol.

Data hasil eksperimen pengujian sinkronisasi waktu berbasis website ditunjukkan pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Sinkronisasi Waktu Sistem (Web-Based RTC)

Hari Ke -	**Waktu Standar Internet (WIB)**	**Pembacaan Waktu Server Web**	**Selisih Waktu**	**Status Catu Daya ESP32**	**Perhitungan Umur Aktual**	**Output Variabel HST Pada ESP32**	**Status Validasi**
1	08:00:00	08:00:01	1 Detik	Normal (ON)	Hari 1	HST: 1	Valid
2	12:00:00	12:00:00	0 Detik	Normal (ON)	Hari 2	HST: 2	Valid
3	15:30:00	15:30:02	2 Detik	Dimatikan (OFF 2 Jam)	Hari 3	HST: 3	Valid
4	11:55:30	11:55:31	1 Detik	Normal (ON)	Hari 15	HST: 15	Valid
5	11:07:56	11:07:56	0 Detik	Normal (ON)	Hari 15	HST: 15	Valid
6	12:00:11	12:00:12	1 Detik	Dimatikan (OFF 1 Jam)	Hari 15	HST: 15	Valid
Rata-rata = 0,83 Detik							**100 % Valid**



Gambar 4.4 Grafik Pengujian Sistem Pewaktuan Berbasis Website (Web-Based RTC)

$$\text{Rata-rata Selisih} = \frac{1+0+2+1+0+1}{6} = \frac{5}{6} = 0{,}83 \text{ Detik}$$

4.4 Pengujian Respon Aktuator (Relay Dan Pompa)

Pengujian aktuator dilakukan untuk mengukur keandalan mekanis dan kecepatan respons dari modul *relay* serta dua unit pompa DC (Pompa Nutrisi P1 dan Pompa Air Bersih P2) saat menerima sinyal eksekusi digital dari mikrokontroler ESP32. Sesuai dengan batasan masalah, *output* dari algoritma *Fuzzy Mamdani* mengontrol durasi aktif pompa dalam satuan detik. Pengujian ini dibagi

menjadi dua fokus pengukuran kuantitatif, yaitu uji presisi pewaktuan otomatis menggunakan fungsi internal program melawan pengukuran manual *stopwatch*, serta uji konsistensi debit aliran cairan (mL/detik) menggunakan bantuan gelas ukur standar laboratorium melalui rumus debit (Huang et al., 2023):

$$Q = \frac{V}{t} \tag{4.5}$$

Dimana:
Q = Debit aliran cairan yang dikeluarkan pompa (mL/detik).
V = Volume total cairan hasil tampungan pompa (mL).
t = Durasi waktu pemicuan aktif saklar *relay* (detik).

Data hasil eksperimen pengujian fungsionalitas mekanis dan pewaktuan aktual kedua unit pompa dijabarkan secara rinci pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Respons dan Debit Aktuator Pompa

Jenis Aktuator	Target Durasi Perintah Sistem (Detik)	Durasi Aktual Stopwatch (Detik)	Selisih Waktu (Detik)	Persentase Error Waktu (%)	Volume Cairan Yang Keluar (mL)	Karakteristik Debit Aliran (mL/Detik)	Status Pengujian
Pompa 1 (Nutrisi)	4,50	4,52	0,02	0,44%	26,8	5,93 mL/s	Sukses
	3,50	3,51	0,01	0,29%	20,9	5,95 mL/s	Sukses
	1,50	1,51	0,01	0,67%	9,0	5,96 mL/s	Sukses
Pompa 2 (Air Baku)	4,50	4,51	0,01	0,22%	27,0	5,98 mL/s	Sukses
	3,50	3,50	0,00	0,00%	21,0	6,00 mL/s	Sukses
	1,50	1,52	0,02	1,31%	9,0	5,92 mL/s	Sukses
Rata-rata	3,17	3,18	0,01	0,49%	18,95	5,96 mL/detik	Sukses

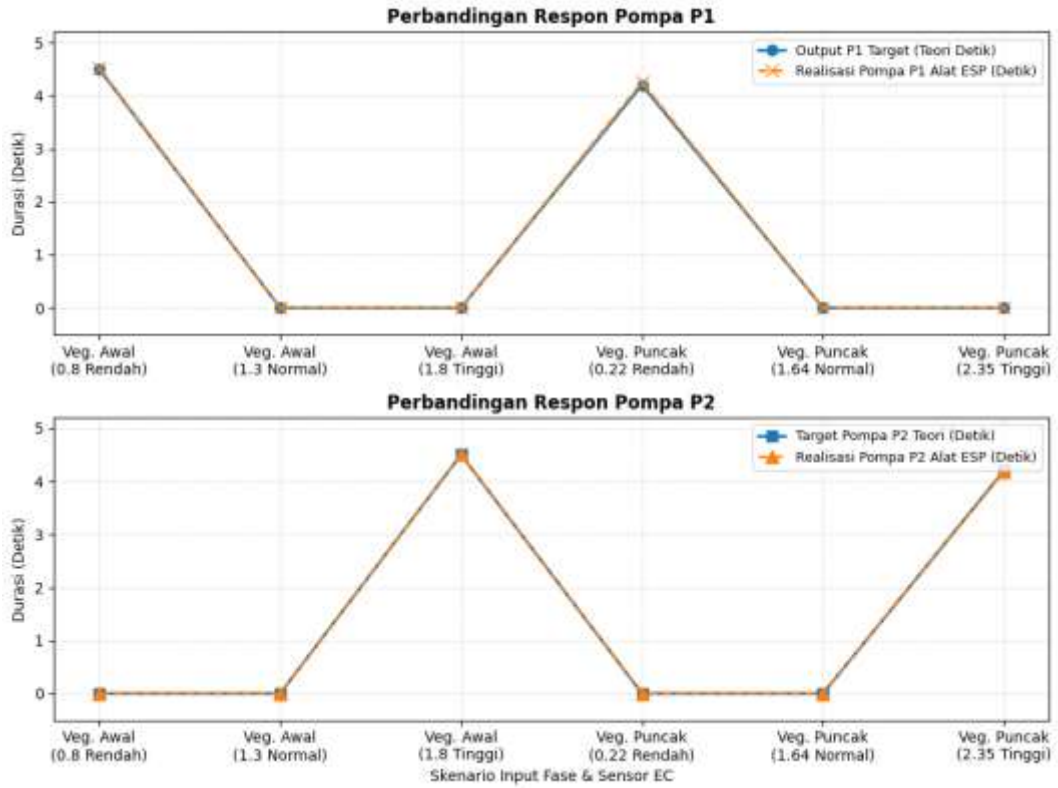
4.5 Hasil Pengujian Uji Error Logika Fuzzy

Pengujian uji error logika Fuzzy dilakukan untuk memvalidasi ketepatan pemrosesan algoritma *Fuzzy Mamdani* yang berjalan di dalam memori mikrokontroler ESP32 secara digital. Validasi dilakukan dengan merealisasikan skenario pengujian matriks data yang telah direncanakan pada Tabel 3.12 di Bab 3.

Nilai *output* durasi kerja pompa teoritis (Target Teori) dibandingkan secara langsung terhadap nilai realisasi durasi aktif fisik pompa pada alat yang terbaca melalui Serial Monitor. Data hasil pengisian realisasi eksekusi sistem dan perhitungan nilai *error* komputasi dijabarkan secara rinci pada Tabel 4.5 berikut

Tabel 4.5 Hasil Uji Eror Logika Fuzzy

No	Skenario Input Fase (Website)	Simulasi Input Sensor EC (mS/cm)	Simulasi Input Ketinggian Air(%)	Output P1 Target (Teori Detik)	Realisasi Pompa P1 Alat ESP (Detik)	Target Error P1 (%)	Target Pompa P2 Teori (Detik)	Realisasi Pompa P2 Alat ESP (Detik)	Error P2 (%)	Nilai EC Setelah Fuzzy Bekerja (mS/cm)	Status Kondisi Akhir Larutan
1.	Vegetatif awal	0,8 Rendah	90% Tinggi	4,50 detik	4,52	0,44%	0,00 detik	0,00	0,00%	1,31	Sesuai Target (Normal)
2.	Vegetatif awal	1,3 Normal	92% Tinggi	0,00 detik	0,00	0,00%	0,00 detik	0,00	0,00%	1,30	Stabil (Normal)
3.	Vegetatif awal	1,8 Tinggi	85% Tinggi	0,00 detik	0,00	0,00%	4,50 detik	4,50	0,00%	1,32	Terencerkan (Normal)
4.	Vegetatif puncak	0,22 Rendah	82,8% Tinggi	4,20 detik	4,25	1,19%	0,00 detik	0,00	0,00%	1,68	Sesuai Target (Normal)
5.	Vegetatif puncak	1,64 Normal	77,1% Sedang	0,00 detik	0,00	0,00%	0,00 detik	0,00	0,00%	1,64	Stabil (Normal)
6.	Vegetatif puncak	2,35 Tinggi	82,8% Tinggi	0,00 detik	0,00	0,00%	4,20 detik	4,18	0,48%	1,72	Terencerkan (Normal)
Rata-rata Error						0,27%			0,08%		



Gambar 4.5 Hasil Pengujian Uji Error Logika Fuzzy

Data pada Tabel 4.5 merupakan hasil perbandingan antara nilai *output* durasi pompa target (secara teori perhitungan Fuzzy Mamdani) dengan durasi eksekusi realisasi pada alat ESP32. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan tidak ada kesalahan logika (*error*) saat algoritma dijalankan pada mikrokontroler. Berikut merupakan contoh perhitungan *relative error* jalur logika Fuzzy Mamdani pada pengujian data pertama (Vegetatif Awal - EC Rendah) (Khamaj & Ali, 2024):

$$\text{Error P1} = \frac{|\text{Realisasi Pompa P1 Alat} - \text{Output P1 Target (Teori)}|}{\text{Output P1 Target (Teori)}} \times 100\% \qquad (4.6)$$

$$\text{Error P1} = \frac{|4{,}52 - 4{,}50|}{4{,}50} \times 100\%$$

$$\text{Error P1} = \frac{0{,}02}{4{,}50} \times 100\%$$

$$\text{Error P1} = 0{,}44\%$$

Hasil yang didapatkan pada perhitungan *error* logika untuk Pompa 1 (P1) pada data pertama adalah 0,44%. Perhitungan nilai rata-rata *error* logika dari seluruh 6 skenario pengujian dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Rata-rata Error Logika} = \frac{\sum \text{Error Logika Seluruh Rule}}{\sum n} \quad (4.7)$$

$$\text{Rata-rata Error Logika} = \frac{0{,}44\% + 0{,}00\% + 0{,}00\% + 1{,}19\% + 0{,}00\% + 0{,}00\%}{6}$$

$$\text{Rata-rata Error Logika} = \frac{1{,}63\%}{6} = 0{,}27\%$$

Hasil dari rata-rata *error* jalur logika Fuzzy Mamdani antara perhitungan teori dan realisasi alat ESP32 adalah sebesar 0,27%. Hal ini membuktikan bahwa sistem kontrol fuzzy pada ESP32 telah tereksekusi dengan tingkat akurasi tinggi dan presisi yang sangat baik sesuai dengan rancangan *rule base.*

Pada perhitungan *error* logika untuk Pompa 2 (P2) pada data pertama adalah 0,00%. Selanjutnya, perhitungan nilai rata-rata *error* logika untuk Pompa 2 dari seluruh 6 skenario pengujian dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Rata-rata Error Logika P2} = \frac{\sum \text{Error Logika P2 Seluruh Rule}}{\sum n} \quad (4.8)$$

$$\text{Rata-rata Error Logika P2} = \frac{0{,}00\% + 0{,}00\% + 0{,}00\% + 0{,}00\% + 0{,}00\% + 0{,}48\%}{6}$$

$$\text{Rata-rata Error Logika P2} = \frac{0{,}48\%}{6} = 0{,}08\%$$

Hasil dari rata-rata *error* jalur logika Fuzzy Mamdani untuk Pompa 2 antara perhitungan teori dan realisasi alat ESP32 adalah sebesar 0,08%. Hal ini

menunjukkan bahwa pengoperasian Pompa 2 juga berjalan dengan tingkat presisi yang sangat tinggi sesuai dengan rancangan sistem.

Gambar 4.5 memperlihatkan grafik komparasi antara durasi target teori dan durasi eksekusi fisik alat ESP32. Terlihat kedua garis grafik saling berimpit secara sempurna (*overlapping*). Pembahasan dari Tabel 4.5 menunjukkan bahwa rata-rata error logika Fuzzy untuk Pompa 1 (P_1) adalah 0,27% dan Pompa 2 (P_2) sebesar 0,08%. Terjadinya selisih waktu tipis (misal 4,52 detik dari target 4,50 detik pada Rule 1) bukan disebabkan oleh kesalahan komputasi logika Fuzzy pada mikroprosesor, melainkan adanya keterlambatan eksekusi fungsional (*instruction execution latency*) pada pemanggilan fungsi *millis()* di mikrokontroler ESP32 saat pemicuan koil mekanis *relay.*

4.6 Hasil Pengujian Integrasi Antarmuka Website (*IoT Dashboard*)

Pengujian integrasi antarmuka website dilakukan untuk memvalidasi keberhasilan komunikasi data nirkabel (*Wi-Fi*) menggunakan protokol HTTP dalam mengirimkan parameter log sensor dari ESP32 menuju *database server*, serta memastikan visualisasi data pada halaman *dashboard website* berjalan secara *real-time*.

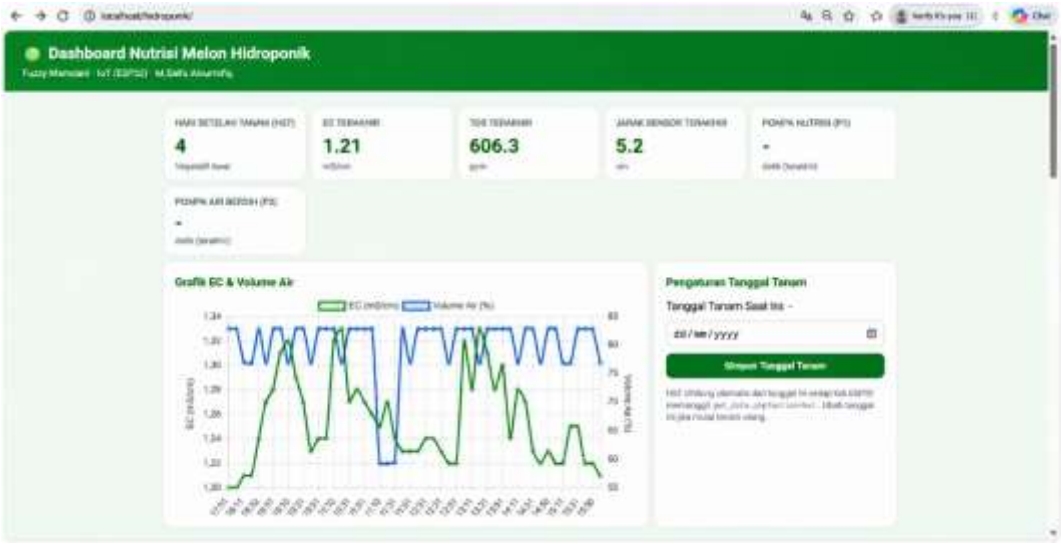
Skenario pengujian menggunakan metode *black-box testing* untuk memantau sinkronisasi antara kondisi riil pada bak penampungan utama dengan data numerik maupun grafik yang tampil pada layar antarmuka pengguna (*user interface*). Data hasil pengujian integrasi IoT *dashboard* ditunjukkan pada Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Fungsionalitas Antarmuka Dashboard Website IoT

No	Skenario Pengujian	Respon Sistem dan Tampilan Antarmuka Website	Status Validasi
1.	Menyalakan perangkat ESP32 dan menghubungkannya ke jaringan Wi-Fi lokal.	Halaman *dashboard* mengubah indikator status konektivitas menjadi "ONLINE" tanpa mengalami keterlambatan (*delay*) yang signifikan.	Sesuai
2.	Mengubah kepekatan larutan bak utama secara manual dari 1,3 mS/cm menjadi 1,7 mS/cm.	informasi "Kepekatan Nutrisi (EC)" pada website otomatis memperbarui angka menjadi 1,7 mS/cm secara *real-time*.	Sesuai
3.	Mengurangi ketinggian air bak utama hingga sensor ultrasonik mendeteksi penurunan level di bawah 80%.	Widget persentase level ketinggaian air menampilkan penurunan grafik secara dinamis dan memicu status peringatan "Rendah".	Sesuai
4.	Memantau pemicuan aktif mekanis Pompa Nutrisi (P1) oleh algoritma *Fuzzy Mamdani* selama 4,5 detik.	Website berhasil mencatat log riwayat riil dan menampilkan grafik batang durasi pompa tepat di angka 4,5s pada *dashboard*.	Sesuai
5	Mematikan catu daya utama (*power supply*) pada boks alat saat hari ke-3, membiarkannya mati selama 2 jam, lalu menghidupkannya kembali.	Saat ESP32 menyala kembali, perangkat langsung mengambil data waktu terbaru dari server sehingga nilai HST tetap berada di angka 3 (tidak ter-*reset* ke nol).	Sesuai
6.	Mengubah parameter tanggal secara manual di halaman *dashboard website* dari hari ke-14 menjadi hari ke-15 untuk menyimulasikan pergantian fase pertumbuhan melon.	ESP32 berhasil menangkap perubahan parameter harian tersebut, layar LCD memperbarui tampilan teks menjadi "HST: 15", dan sirkuit logika *fuzzy* otomatis menggeser mode target kontrol nutrisi dari Fase Vegetatif Awal menuju Fase Vegetatif Puncak.	Sesuai

4.7 *User interface* Nutrisi Tanaman Melon Hidroponik

Antarmuka sistem pemantauan berbasis website (*IoT Dashboard*) dirancang untuk memudahkan pengguna dalam memantau seluruh parameter kondisi larutan hidroponik secara *real-time*. Berdasarkan hasil pengujian fungsionalitas antarmuka yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 dibawah



Gambar 4.6 User interface Nutrisi Tanaman Melon Hidroponik

Gambar 4.6 Halaman *dashboard* berhasil menampilkan ringkasan data penting secara terstruktur, yang mencakup informasi Hari Setelah Tanam (HST), nilai kepekatan EC terakhir, nilai TDS (ppm), jarak sensor ultrasonik, persentase ketinggian air, serta riwayat durasi aktif pompa nutrisi (P1) dan pompa air bersih (P2).

Halaman utama *dashboard* juga dilengkapi dengan fitur grafik visualisasi pemantauan serta panel pengaturan tanggal tanam yang terhubung langsung dengan basis data server. Ketika mikrokontroler ESP32 mengirimkan data terbaru melalui jaringan nirkabel, elemen-elemen widget pada antarmuka website ini mampu memperbarui informasi secara dinamis tanpa hambatan *delay* yang masif, sehingga pengguna dapat mengawasi kestabilan nutrisi tanaman melon hidroponik dari jarak jauh secara efektif.

4.8 Analisis Dan Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem pengontrolan nutrisi tanaman melon hidroponik berbasis *Internet of Things* dan metode Fuzzy Mamdani terbukti dapat direalisasikan secara fungsional dan terintegrasi dengan baik. Perancangan sistem *closed-loop* yang berpusat pada mikrokontroler ESP32 mampu menjalankan fungsi akuisisi data, pemrosesan logika kendali, hingga aktuasi perangkat keras secara mandiri dan berkesinambungan.

Sensor TDS yang dikonversi menjadi nilai *Electrical Conductivity* (EC) serta sensor ultrasonik HC-SR04 menunjukkan tingkat keandalan yang memadai untuk memantau kondisi larutan di dalam bak penampungan utama berkapasitas 6 liter. Berdasarkan uji kalibrasi, sensor ultrasonik mencatatkan tingkat akurasi yang sangat tinggi dengan rata-rata tingkat *error* sebesar 0,47%. Sementara itu, sensor TDS mencatatkan rata-rata *error* sebesar 12,55%, yang disebabkan oleh sensitivitas probe terhadap fluktuasi ion dan residu pekat. Meskipun demikian, tingkat deviasi tersebut masih dapat ditoleransi untuk pembacaan relatif dalam skala operasional *greenhouse*.

Pengendalian durasi kerja aktuator berupa Pompa Nutrisi (P1) dan Pompa Air Bersih (P2) dikelola sepenuhnya oleh mesin inferensi *Fuzzy Mamdani*. Algoritma ini memproses tiga parameter masukan secara simultan, yaitu nilai EC aktual, ketinggian air, serta umur tanaman berdasarkan Hari Setelah Tanam (HST). Variabel HST diperoleh melalui sinkronisasi otomatis menggunakan fitur *WebBased RTC* dari server website dengan rata-rata selisih waktu sinkronisasi yang sangat akurat, yakni 0,83 detik. Pengujian terhadap sirkuit logika *fuzzy* yang

ditanamkan pada memori ESP32 menunjukkan bahwa rata-rata *error* logika *fuzzy* untuk Pompa 1 (P_1) mencapai 0,27% dan Pompa 2 (P_2) mencapai 0,08% apabila dikomparasikan dengan perhitungan teoretis. Hal ini mengonfirmasi bahwa mesin inferensi mampu menerjemahkan fungsi keanggotaan dan aturan implikasi secara konsisten dengan tingkat presisi yang sangat tinggi.

Aktuator pompa menunjukkan kestabilan debit aliran rata-rata sebesar 5,96 mL/detik dengan presentasi galat waktu nyala pompa yang sangat kecil, yaitu 0,49%. Selain itu, integrasi nirkabel berbasis protokol IoT memungkinkan seluruh parameter telemetri sensor dan catatan riwayat kerja pompa divisualisasikan secara *real-time* melalui tampilan antarmuka nutrisi tanaman melon hidroponik. Kemampuan ini memberikan kemudahan bagi pengguna dalam memantau dan mengevaluasi status kesehatan nutrisi tanaman melon dari jarak jauh.

Secara keseluruhan, penerapan metode Fuzzy Mamdani dan teknologi IoT berhasil menghadirkan solusi otomatisasi pertanian presisi yang mampu menjaga stabilitas unsur hara secara adaptif, mencegah risiko keracunan akibat kelebihan nutrisi (*nutrient burn*), serta menghindari hambatan pertumbuhan akibat kekurangan hara.

Implementasi sistem ini juga merefleksikan nilai-nilai keislaman dalam kerangka integrasi sains dan agama. Pemanfaatan teknologi canggih untuk mengoptimalkan sektor pertanian merupakan wujud nyata dari tanggung jawab manusia sebagai *khalifah fil 'ardh* dalam mengelola sumber daya alam secara bijaksana. sebagaimana firman Allah SWT dalam QS. Al-Mulk ayat 15 yang telah dipaparkan pada Bab I.

Berdasarkan Tafsir *Al-Misbah* karya M. Quraish Shihab, ayat ini menegaskan bahwa Allah SWT telah menundukkan bumi beserta *sunnatullah*-nya agar dapat diolah dan dimanfaatkan oleh manusia. Anjuran menjelajahi penjuru bumi memuat dorongan eksplorasi ilmu pengetahuan dan inovasi teknologi, termasuk dalam merancang sistem pertanian modern presisi.

Dalam penelitian ini, penerapan algoritma Fuzzy Mamdani memproses parameter konduktivitas listrik (*Electrical Conductivity*/EC), umur tanaman (Hari Setelah Tanam/HST) via *Web-Based RTC*, serta level ketinggian air tandon untuk mengontrol aktuator berupa Pompa Nutrisi (P_1) dan Pompa Air Bersih (P_2). Kebutuhan nutrisi yang disesuaikan secara dinamis berdasarkan fase pertumbuhan vegetatif (Fase Awal target 1,3 mS/cm dan Fase Puncak target 1,7 mS/cm) mencegah penyuntikan nutrisi secara berlebihan (*nutrient burn*) maupun pembuangan air yang tidak perlu. Penghematan dan ketepatan takaran pemberian nutrisi ini mencerminkan ketaatan terhadap perintah Allah SWT untuk tidak berlebih-lebihan (*israf*), sebagaimana firman-Nya dalam Surah Al-A'raf ayat 31:

وَكُلُوا وَاشْرَبُوا وَلَا تُسْرِفُوا ۚ إِنَّهُ لَا يُحِبِّ الْمُسْرِفِينَ

""...makan dan minumlah, tetapi jangan berlebih-lebihan. Sesungguhnya Allah tidak menyukai orang-orang yang berlebih-lebihan." (QS. Al-A'raf: 31).

Pengintegrasian kecerdasan buatan Fuzzy Mamdani dan IoT pada alat kontrol nutrisi melon hidroponik tidak hanya memberikan dampak teknis berupa efisiensi pengelolaan nutrisi, namun juga menjadi bentuk ibadah *muamalah* dalam menjaga

amanah kelestarian lingkungan dan mengoptimalkan rezeki yang diberikan oleh Allah SWT.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Sistem otomatisasi dan pemantauan nutrisi melon hidroponik berbasis IoT dan Fuzzy Mamdani pada ESP32 berhasil dibangun dengan closed-loop control yang mengintegrasikan sensor TDS/EC, sensor ultrasonik, dan Web-Based RTC. Algoritma Fuzzy Mamdani terbukti sangat presisi dalam mengendalikan durasi aktif Pompa Nutrisi (P_1) dan Pompa Air Bersih (P_2), ditunjukkan oleh rata-rata error logika sebesar $0{,}27\%$ untuk P_1 dan $0{,}08\%$ untuk P_2 dibanding kalkulasi teoritis. Kinerja perangkat keras menunjukkan rata-rata error sensor ultrasonik sebesar $0{,}47\%$, sensor TDS sebesar $12{,}55\%$, galat pemicuan aktuator $0{,}49\%$ (debit 5,96 mL/detik), serta rata-rata selisih waktu sinkronisasi Web-Based RTC sebesar 0,83 detik.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian **"**Monitoring Dan Otomatisasi Pemberian Nutrisi Tanaman Melon Hidroponik Menggunakan Fuzzy Mamdani Berbasis Internet Of Things" yang telah dilakukan, agar dapat memperluas pengembangan dan manfaat dari sistem, peneliti menyarankan beberapa poin untuk penelitian selanjutnya:

1. Menambahkan Parameter pH Air
2. Ekspansi *Rule Base* Multi-Fase Pertumbuhan
3. Studi Komparasi Algoritma Kendali Cerdas

DAFTAR PUSTAKA

Albares, P., & Estévez, P. G. (2021). Miura-Reciprocal Transformation and Symmetries for the Spectral Problems of KdV and mKdV. *Mathematics*, *9*(9), 926. https://doi.org/10.3390/math9090926

Ali Al Meselmani, M. (2023). Nutrient Solution for Hydroponics. In M. Turan, S. Argin, E. Yildirim, & A. Güneş (Eds.), *Recent Research and Advances in Soilless Culture*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.101604

Almadiy, A. A., Shaban, A. E., Ibrahim, A. M., Balhareth, S. M., El-Gioushy, S. F., & Khater, E.-S. G. (2023). Partially substituting chemical NPK fertilizers and their impact on Eureka lemon trees (Citrus limon L. Burm) productivity and fruit quality. *Scientific Reports*, *13*(1), 10506. https://doi.org/10.1038/s41598-023-37457-7

Arora, R., Chauhan, A., Sharma, R., & Singh, A. P. (2022). Optimization of an EPQ model in an imprecise environment with defuzzification by the centroid method under inflation. *Operations Research and Decisions*, *32*(3). https://doi.org/10.37190/ord220303

Asaduzzaman, Md., Talukder, Md. R., Tanaka, H., Ueno, M., Kawaguchi, M., Yano, S., Ban, T., & Asao, T. (2018). Production of Low-Potassium Content Melon Through Hydroponic Nutrient Management Using Perlite Substrate. *Frontiers in Plant Science*, *9*, 1382. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01382

Ashir, D. M. N. A., Ahad, Md. T., Talukder, M., & Rahman, T. (2022). *Internet of Things (IoT) based Smart Agriculture Aiming to Achieve Sustainable Goals* (Version 1). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2206.06300

Atikah, T. A., Alvianah, A., Saraswati, D., & Zubaidah, S. (2023). GROWTH OF MELON (CUCUMIS MELO L.) VARIETIES ON DIFFERENT PLANT MEDIA COMPOSITIONS IN CONDITIONS OF HYDROPONIC DRIP IRRIGATION. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, *137*(5), 98–108. https://doi.org/10.18551/rjoas.2023-05.10

Cahyanto, T. A., Sufianto, G., Handayani, L., Rosyidah, U. A., Yanuarti, R., & Arlisa Amiri, Y. I. (2024). IoT-Based Recommendation System for Citrus Land Suitability Using Mamdani Fuzzy Logic. *2024 Beyond Technology Summit on Informatics International Conference (BTS-I2C)*, 433–438. https://doi.org/10.1109/BTS-I2C63534.2024.10941761

Carrasco-Garrido, C., Moreno-Cabezali, B. M., & Martínez Raya, A. (2025). New perspectives on university quality assessment: A Mamdani Fuzzy Inference System approach. *PLOS One*, *20*(5), e0321013. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0321013

Chrysafiadi, K. (2023). The Role of Fuzzy Logic in Artificial Intelligence and Smart Applications. In K. Chrysafiadi, *Fuzzy Logic-Based Software Systems* (Vol. 34, pp. 25–29). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44457-9_2

Dhafir, M., Idkham, M., Safrizal, S., & Anwar, K. (2026). Development and Validation of an ESP32-Based Multi-Sensor System for Precision Smart

Greenhouse Monitoring. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, *15*(4), 1448–1458. https://doi.org/10.23960/jtepl.v15i4.1448-1458

Doni, D., Sasli, I., & Wasi'an, W. (2023). RESPON PERTUMBUHAN DAN HASIL MENTIMUN TERHADAP BERBAGAI KONSENTRASI PUPUK GANDASIL D DAN B SECARA HIDROPONIK. *Jurnal Sains Pertanian Equator*, *12*(3), 504. https://doi.org/10.26418/jspe.v12i3.61804

Dubey, A., & Yadav, S. K. (2024). Basics of Internet of Things. *INTERANTIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT*, *08*(10), 1–6. https://doi.org/10.55041/IJSREM37970

Efendi, A., & Syahminan, M. (2024). Natural Resource Management According To The Quran From The Perspective Of Environmental Issues (Al Misbah Interpretation Study). *Academy of Education Journal*, *15*(2), 1656–1666. https://doi.org/10.47200/aoej.v15i2.2570

Erdani, Y., & Ramdani, M. (2024). Data Logger Suhu dan Kelembaban Relatif Udara dengan Timestamp berbasis Network Time Protocol (NTP). *INSANtek*, *5*(1), 37–41. https://doi.org/10.31294/insantek.v5i1.3348

Feng, R., Liu, Y., Li, M., & Zhou, F. (2025). Research on Autonomous Vehicle Technology Innovation Ecosystem in China Based on System Dynamics. *Systems*, *13*(4), 269. https://doi.org/10.3390/systems13040269

Frasetiawan, B. T., Budi, S., & Hariyanti, A. (2023). PENGARUH KONSENTRASI AB MIX TERHADAP PERTUMBUHAN DAN HASIL KUBIS BUNGA DENGAN SISTEM HIDROPONIK SUBSTRAT. *Jurnal*

Sains Pertanian Equator, *12*(2), 267. https://doi.org/10.26418/jspe.v12i2.62288

Ganaie, F. R. (2023). Application of Fuzzy Logic in Artificial Intelligence. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, *11*(4), 2350–2356. https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.50672

Golléty, C. (2024). *Functioning of a canopy-dominated intertidal community during emersion: Highly productive but heterotrophic at the annual scale - R code* (Version 1.0.0.) [Data set]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/ZENODO.10512341

Guo, H., He, C., Han, L., Chen, N., & Wang, Z. J. (2021). OCSID: Orthogonal Accessing Control Without Spectrum Spreading for Massive RFID Network. *IEEE Internet of Things Journal*, *8*(6), 4329–4338. https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3027204

Haq, A., Firdaus, R. A., Khoiro, M., Rahmawati, E., & Winarto, N. (2026). Accuracy of HC-SR04 Ultrasonic Servo in Servo-Scanned 2D Ranging. *Prisma Sains : Jurnal Pengkajian Ilmu Dan Pembelajaran Matematika Dan IPA IKIP Mataram*, *14*(3), 1417–1431. https://doi.org/10.33394/j-ps.v14i3.19813

Hung, N. Q., Thanh Nga, N. T., & Lam, V. P. (2025). Effects of varying electrical conductivity levels on plant growth, yield, and photosynthetic parameters of Tochiotome strawberry (Fragaria × ananassa 'Tochiotome) in a greenhouse. *Australian Journal of Crop Science*, *19*(04), 436–441. https://doi.org/10.21475/ajcs.25.19.04.p322

Insany, G. P. (2026). Optimalisasi Smart Watering Berbasis Iot dengan Kontrol Fuzzy Sugeno untuk Kebutuhan Air dan Nutrisi pada Budidaya Melon Hidroponik di Greenhouse. *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, *10*(2), 69. https://doi.org/10.31544/jtera.v10.i2.2025.69-78

Khamaj, A., & Ali, A. M. (2024). Adapting user experience with reinforcement learning: Personalizing interfaces based on user behavior analysis in real-time. *Alexandria Engineering Journal*, *95*, 164–173. https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.03.045

Kosheleva, O., & Kreinovich, V. (2023). Commonsense-Continuous Dynamical Systems – Stationary States, Prediction, and Reconstruction of the Past: Fuzzy-Based Analysis. In S. Dick, V. Kreinovich, & P. Lingras (Eds.), *Applications of Fuzzy Techniques* (Vol. 500, pp. 101–107). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16038-7_11

Lambat, Y., Ayres, N., Maglaras, L., & Ferrag, M. A. (2021). A Mamdani Type Fuzzy Inference System to Calculate Employee Susceptibility to Phishing Attacks. *Applied Sciences*, *11*(19), 9083. https://doi.org/10.3390/app11199083

Malyszko, M. (2021). Fuzzy Logic in Selection of Maritime Search and Rescue Units. *Applied Sciences*, *12*(1), 21. https://doi.org/10.3390/app12010021

Mitsuishi, T. (2022). Definition of Centroid Method as Defuzzification. *Formalized Mathematics*, *30*(2), 125–134. https://doi.org/10.2478/forma-2022-0010

Nair, R. R., Babu, T., & Yogarayan, S. (2026). A multi-objective genetic–Mamdani fuzzy reasoning framework for bias-resilient small business credit scoring.

Cogent Business & Management, *13*(1), 2641267. https://doi.org/10.1080/23311975.2026.2641267

Nuryudin, A., Irawan, D., & Astutik, R. P. (2024). SISTEM MONITORING DAN KONTROL NUTRISI TANAMAN DI HIDROPONIK NFT MENGGUNAKAN METODE FUZZY MAMDANI. *Jurnal Teknik Elektro*, *17*(1), 44–50. https://doi.org/10.9744/jte.17.1.44-50

Pancardo, P., Hernandez-Nolasco, J. A., Wister, M. A., & Garcia-Constantino, M. (2021). Dynamic Membership Functions for Context-Based Fuzzy Systems. *IEEE Access*, *9*, 29665–29676. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3058943

Putra, S. D., Heriansyah, H., Cahyadi, E. F., Anggriani, K., & Imron S Jaya, M. H. (2024). Development of Smart Hydroponics System using AI-based Sensing. *JURNAL INFOTEL*, *16*(3). https://doi.org/10.20895/infotel.v16i3.1190

Rinaldi, R., Dewi, T., & Oktarina, Y. (2023). Implementasi Fuzzy Logic dalam Mengendalikan Input dan Output pada Penyiraman dan Pemupukan Tanaman Otomatis Berbasis IoT. *Journal of Applied Smart Electrical Network and Systems*, *3*(02), 65–73. https://doi.org/10.52158/jasens.v3i02.520

Saatchi, R. (2024). Fuzzy Logic Concepts, Developments and Implementation. *Information*, *15*(10), 656. https://doi.org/10.3390/info15100656

Sadiyoko, A., Perdana, K. A., & Naa, C. F. (2023). Improving the Concentration Accuracy of Fertilizer Application in Hydroponic System Using PLC. *TEKNIK*, *44*(2), 149–157. https://doi.org/10.14710/teknik.v44i2.53301

Shihab, M. Q. (n.d.). *Tafsir Al-Misbah: Pesan, Kesan, dan Keserasian Al-Qur'an* (Vol. 14). Lentera Hati. Retrieved https://archive.org/download/tafsir-al-mishbah-prof-dr.-m.-quraish-shihab-/Tafsir%20Al-Mishbah%20Jilid%2015%20-Dr.%20M.%20Quraish%20Shihab-pages-deleted.pdf

Shin, K. K. Y., Ping, T. P., Ling, M. G. B., Chee Jiun, C., & Bolhassan, N. A. B. (2024). SMART GROW – Low-cost automated hydroponic system for urban farming. *HardwareX*, *17*, e00498. https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00498

Sholihah, A. N., Tohir, T., & Al Tahtawi, A. R. (2021). Kendali TDS nutrisi hidroponik deep flow technique berbasis IoT menggunakan fuzzy logic. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, Dan Listrik Tenaga)*, *1*(2), 89–98. https://doi.org/10.35313/jitel.v1.i2.2021.89-98

Singh, B. V., Ashutosh, Janbandhu, M. S., Satapathy, S. N., Das, H., Yadav, B., Pratiksha, K., & Singh, S. (2023). Hydroponics and Synergetic Technologies: A Deep Dive into Small and Medium-Scale Applications. *International Journal of Plant & Soil Science*, *35*(21), 32–41. https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i213943

Syahputri, N. I., Chiuloto, K., & Harahap, N. N. A. (2022). Analisa Perbandingan Membership Function Fuzzy Tsukamoto dalam Menentukan Dosen

Berprestasi: Studi Kasus Universitas Harapan Medan. *Blend Sains Jurnal Teknik*, *1*(2), 164–170. https://doi.org/10.56211/blendsains.v1i2.134

Untoro, M. C., & Hidayah, F. R. (2022). IoT-Based Hydroponic Plant Monitoring and Control System to Maintain Plant Fertility. *INTEK: Jurnal Penelitian*, *9*(1), 33–41. https://doi.org/10.31963/intek.v9i1.3407

Verma, R. C., Chaithanya G., Sachan, P., Thilagam, P., Bahadur, R., Kumar, N., Singh, B. V., & Mahesha K. N. (2023). Exploring Hydroponics and the Associated Technologies for Use in Medium-and Small-scale Operations: A Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, *13*(10), 4474–4483. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i103125

Viaña, J., Ralescu, S., Cohen, K., Kreinovich, V., & Ralescu, A. (2022). Why Cauchy Membership Functions: Reliability. *Advances in Artificial Intelligence and Machine Learning*, *02*(02). https://doi.org/10.54364/AAIML.2022.1125

Vijaykumar, V. R., Sekar, S. R., Jothin, R., Diniesh, V. C., Elango, S., & Ramakrishnan, S. (2024). Novel Light Weight Hardware Authentication Protocol for Resource Constrained IoT Based Devices. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, *8*, 31–42. https://doi.org/10.1109/JRFID.2024.3359705

Visco, G., Dell'Aglio, E., Tomassetti, M., Fontanella, L. U., & Sammartino, M. P. (2023). An Open-Source, Low-Cost Apparatus for Conductivity Measurements Based on Arduino and Coupled to a Handmade Cell. *Analytica*, *4*(2), 217–230. https://doi.org/10.3390/analytica4020017

Waluyo, Widura, A., Hadiatna, F., & Anugerah, D. (2023). Fuzzy-Based Smart Farming and Consumed Energy Comparison Using the Internet of Things. *IEEE Access*, *11*, 69241–69251. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3291616

Yun, Y. S. (2021). Graphic Representation of a Dimensional Expansion of Triangular Fuzzy Number. *Journal of Mathematics*, *2021*, 1–11. https://doi.org/10.1155/2021/1970553

Zarkashie, M. F., Rizaldy, R., & Yuniarti, E. (2022). Portable Water Quality Measurement System for Sanitation. *Journal of Materials Science*.

Zhai, W., Kuang, X., Cheng, X., Pan, J., & Wu, C. (2024). Reconstruction of missing points in agricultural machinery trajectory based on bidirectional adjacent information. *Computers and Electronics in Agriculture*, *220*, 108920. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108920