

Perancangan dan Implementasi Sistem Scada untuk Pencampuran Nutrisi Hidroponik Berbasis ESP32 Menggunakan Metode Kontrol Fuzzy Mamdani

Rudi Hariyanto^{1*}, Danang Erwanto², Dian Efytra Yuliana³

Universitas Islam Kadiri, Kediri, Indonesia

Email: rudhariyanto27@gmail.com

Abstract

This study aims to design and implement a SCADA system for hydroponic nutrient mixing based on ESP32 using the Fuzzy Mamdani control method. The system is designed to perform integrated monitoring and control of the nutrient mixing process. The system uses Electrical Conductivity (EC), pH, temperature, and ultrasonic sensors to monitor the condition of the nutrient solution and the liquid level in each tank. The ESP32 serves as the main controller for acquiring sensor data and controlling actuators, including the water pump, nutrient A pump, nutrient B pump, and mixer motor. Communication between the ESP32 and FUXA SCADA is implemented using the MQTT protocol, while FUXA serves as a Human Machine Interface (HMI) for displaying real-time data and providing system control. In automatic mode, the error between the EC setpoint and the actual EC value is processed using the Fuzzy Mamdani method to determine the PWM value of the nutrient pumps. The test results show that the system is capable of performing integrated monitoring and control of the nutrient mixing process. The calibration results show an EC sensor error of 1.11%, a pH sensor error ranging from 0.73% to 2.00%, an ultrasonic sensor error ranging from 0.80% to 1.00%, and a temperature sensor error ranging from 0.33% to 0.80%. MQTT communication and FUXA SCADA were successfully used to transmit sensor data and execute actuator control commands. The Fuzzy Mamdani control was tested in the Seedling, Early Vegetative, and Full Vegetative phases, with EC setpoints of 0.70 mS/cm, 1.20 mS/cm, and 1.80 mS/cm, respectively. The resulting overshoot values were 2.86%, 2.50%, and 2.78%, with settling times of approximately 5, 7, and 8 minutes, respectively. The steady-state error values were 0.00 mS/cm, 0.01 mS/cm, and -0.01 mS/cm, respectively, while the EC values remained within the specified tolerance range during the observation period. These results indicate that the system is capable of maintaining the EC value around the setpoint and performing the nutrient mixing process automatically according to the plant growth phase.

Keywords: ESP32, SCADA, FUXA, MQTT, Fuzzy Mamdani, EC, Hydroponic Nutrients.

Abstrak

Berikut adalah bagian Abstrak (dalam Bahasa Indonesia dan Bahasa Inggris) berdasarkan dokumen skripsi asli: ABSTRAK Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem SCADA untuk pencampuran nutrisi hidroponik berbasis ESP32 menggunakan metode kontrol Fuzzy Mamdani. Sistem dirancang untuk melakukan monitoring dan pengendalian proses pencampuran nutrisi secara terintegrasi. Sistem menggunakan sensor Electrical Conductivity (EC), sensor pH, sensor suhu, dan sensor ultrasonik untuk memantau kondisi larutan serta level pada setiap tangki. ESP32 digunakan sebagai pengendali utama untuk membaca data sensor dan mengendalikan aktuator berupa pompa air, pompa nutrisi A, pompa nutrisi B, dan motor mixer. Komunikasi antara ESP32 dan SCADA FUXA menggunakan protokol MQTT, sedangkan FUXA digunakan sebagai Human Machine Interface (HMI) untuk menampilkan data secara real-time dan memberikan kendali terhadap sistem. Pada mode otomatis, nilai error antara setpoint dan nilai EC aktual diproses menggunakan metode Fuzzy Mamdani untuk menentukan nilai PWM pompa nutrisi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan monitoring dan pengendalian proses pencampuran nutrisi secara terintegrasi. Hasil kalibrasi menunjukkan nilai error sensor EC sebesar 1,11%, sensor pH sebesar 0,73–2,00%, sensor ultrasonik sebesar 0,80–1,00%, dan sensor temperatur sebesar 0,33–0,80%. Komunikasi MQTT dan SCADA FUXA berhasil digunakan untuk mengirimkan data sensor serta menjalankan perintah pengendalian aktuator. Pengujian kontrol Fuzzy Mamdani pada fase Persemaian, Vegetatif Awal, dan Vegetatif Penuh menunjukkan bahwa sistem mampu mengarahkan nilai EC dari kondisi awal menuju setpoint masing-masing sebesar 0,70 mS/cm, 1,20 mS/cm, dan 1,80 mS/cm. Nilai overshoot yang diperoleh masing-masing sebesar 2,86%, 2,50%, dan 2,78%, dengan settling time sekitar 5, 7, dan 8 menit. Nilai error steady-state masing-masing sebesar 0,00 mS/cm, 0,01 mS/cm, dan -0,01 mS/cm, serta nilai EC tetap berada dalam rentang toleransi selama pengamatan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan nilai EC di sekitar setpoint dan menjalankan proses pencampuran nutrisi secara otomatis sesuai fase pertumbuhan tanaman.

Kata kunci: ESP32, SCADA, FUXA, MQTT, Fuzzy Mamdani, EC, Nutrisi Hidroponik.

PENDAHULUAN

Budidaya tanaman secara hidroponik menuntut konsistensi kualitas larutan nutrisi yang tinggi agar tanaman dapat tumbuh secara optimal. Pada sistem ini, unsur hara esensial umumnya disiapkan melalui pencampuran larutan stok pekat AB mix (tangki A dan tangki B) ke dalam tangki utama sesuai dengan kebutuhan spesifik tanaman. Tingkat presisi konsentrasi larutan memegang peranan krusial terhadap keberhasilan budidaya, di mana parameter Electrical Conductivity (EC) merepresentasikan total kadar hara terlarut, sementara tingkat keasaman (pH) secara langsung memengaruhi kapasitas akar dalam menyerap unsur mineral. Sejumlah penelitian terdahulu menekankan bahwa kestabilan nilai pH dan konsentrasi nutrisi merupakan faktor penentu utama dalam menjaga kualitas serta produktivitas hasil tanaman hidroponik. Oleh karena itu, ketidakakuratan dalam proses pencampuran nutrisi berisiko memicu pergeseran nilai EC keluar dari rentang ideal yang berujung pada penurunan kesehatan tanaman.

Kendati demikian, dalam praktiknya, proses pencampuran nutrisi hidroponik di tingkat petani maupun skala kecil masih banyak dilakukan secara konvensional, baik melalui pengukuran volume manual maupun estimasi durasi kerja pompa. Pendekatan manual semacam ini kerap menghasilkan komposisi larutan yang tidak konsisten akibat fluktuasi debit pompa yang dipengaruhi oleh perubahan tegangan, kondisi mekanis perangkat, kekentalan cairan, serta tingginya potensi kesalahan manusia (human error). Selain itu, karakteristik lingkungan larutan bersifat dinamis karena terus dipengaruhi oleh penguapan air, sisa larutan sebelumnya, dan dinamika suhu sekitar. Berbagai literatur mengenai sistem pertanian cerdas berbasis Internet of Things (IoT) menunjukkan bahwa parameter fisikokimia air memerlukan pemantauan secara berkelanjutan agar setiap anomali dapat segera dikoreksi. Mengingat metode konvensional menuntut waktu dan ketelitian tinggi, pengembangan sistem otomasi yang mampu mengakuisisi data secara real-time dan mempertahankan stabilitas larutan secara mandiri menjadi suatu kebutuhan mendesak.

Arsitektur teknologi berbasis IoT dan sistem akuisisi data terdistribusi menawarkan solusi efektif untuk meningkatkan efisiensi operasional sistem hidroponik modern. Mikrokontroler ESP32 banyak dipilih sebagai unit pengendali inti karena telah dilengkapi modul Wi-Fi terintegrasi, kanal ADC beresolusi tinggi, serta dukungan sinyal Pulse Width Modulation (PWM) multi-kanal untuk menggerakkan aktuator seperti pompa DC. Berbagai riset mutakhir membuktikan bahwa ESP32 sangat handal dalam menangani monitoring multi-sensor (real-time monitoring) serta manajemen aktuator pada sistem skala laboratorium maupun skala kecil. Guna menjamin efisiensi dan keandalan komunikasi data dalam ekosistem IoT tersebut, protokol MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) dengan pola komunikasi publish-subscribe menjadi standar pilihan karena mampu mengalirkan data sensor serta perintah kendali dengan latensi rendah dan overhead jaringan yang minimal.

Integrasi protokol MQTT dengan platform Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) memberikan keleluasaan bagi operator untuk memantau seluruh variabel proses melalui antarmuka Human Machine Interface (HMI) berbasis industri. Dalam penelitian ini, platform SCADA FUXA dipilih karena sifatnya yang open-source, ringan, mendukung komunikasi MQTT

secara langsung, serta menyediakan fitur perancangan visual HMI berbasis drag-and-drop yang ideal untuk visualisasi sistem kendali mini. Meskipun demikian, implementasi otomasi tidak akan berjalan optimal apabila hanya mengandalkan logika kendali on-off sederhana. Dinamika proses pencampuran nutrisi memiliki karakteristik yang non-linier, dipengaruhi oleh volume tangki, variasi konsentrasi larutan stok, serta kompleksitas lingkungan.

Untuk mengakomodasi karakteristik tersebut, penerapan metode kendali cerdas berbasis logika kabur (Fuzzy Logic), khususnya algoritma Fuzzy Mamdani, dinilai sangat tepat. Metode ini mampu menterjemahkan aturan linguistik berdasarkan pengalaman empiris tanpa memerlukan pemodelan matematis yang rumit, sehingga mampu menghasilkan respons aksi kontrol yang halus dan adaptif. Sejumlah studi memperlihatkan bahwa pengendali fuzzy terbukti efektif dalam meredam fluktuasi EC dan menjaga kestabilan larutan hidroponik secara otomatis.

Berdasarkan latar belakang permasalahan tersebut, penelitian ini difokuskan pada perancangan dan implementasi sistem tangki mixing nutrisi hidroponik berbasis mikrokontroler ESP32 yang diintegrasikan dengan protokol komunikasi MQTT, platform SCADA FUXA, serta penerapan metode kontrol Fuzzy Mamdani untuk mengatur durasi dan duty cycle pompa nutrisi secara presisi. Melalui sistem ini, diharapkan proses pencampuran nutrisi dapat berjalan secara otomatis, akurat, dan terintegrasi penuh guna mendukung produktivitas budidaya pertanian modern.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan jenis penelitian rekayasa (engineering research) yang bertujuan untuk merancang, membangun, serta mengimplementasikan sistem pencampuran nutrisi hidroponik berbasis SCADA dan kendali fuzzy secara nyata. Pelaksanaan penelitian bertempat di ruang kerja peneliti dan dilakukan secara bertahap mulai dari bulan Desember 2025 hingga September 2026, mencakup perancangan sistem, perakitan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, serta serangkaian pengujian performa.

Objek penelitian ini berfokus pada sistem pencampuran nutrisi hidroponik terintegrasi yang menggabungkan mikrokontroler ESP32, protokol komunikasi MQTT, platform SCADA FUXA, serta berbagai sensor dan aktuator pendukung. Ruang lingkup sistem difokuskan pada pengendalian otomatis parameter Electrical Conductivity (EC) larutan, sementara parameter pH, suhu larutan, dan level air difungsikan sebagai variabel monitoring pendukung. Sistem dirancang dengan dua mode operasi, yaitu mode manual dan otomatis, di mana pemilihan fase pertumbuhan tanaman dilakukan secara manual oleh operator melalui HMI. Pengujian sistem dilakukan pada skala prototipe dengan kapasitas tangki mixing sekitar 5 liter menggunakan nutrisi AB mix dengan rasio pencampuran 1:1.

Perangkat keras (hardware) yang digunakan meliputi mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali utama, sensor EC analog, sensor pH analog, sensor suhu waterproof DS18B20 digital one-wire, serta sensor ultrasonik HC-SR04 untuk pengukuran level. Bagian aktuator terdiri atas pompa air, pompa nutrisi A, pompa nutrisi B, motor mixer, pompa output, dan pompa sirkulasi yang dikendalikan melalui driver MOSFET dengan catu daya utama 12V DC serta modul step-

down 5V. Sementara itu, perangkat lunak (software) yang digunakan mencakup Arduino IDE untuk pemrograman firmware ESP32, MQTT Broker (Mosquitto) sebagai perantara komunikasi data, serta platform SCADA FUXA untuk perancangan antarmuka HMI dan sistem supervisi secara real-time.

Arsitektur sistem dibagi menjadi tiga bagian utama yaitu bagian input (sensor), bagian proses (ESP32), dan bagian output (aktuator), yang dihubungkan dengan SCADA menggunakan protokol komunikasi MQTT berpola publish-subscribe. Secara mekanik, sistem menggunakan empat wadah utama yang terdiri atas tangki air bersih, tangki stok nutrisi A, tangki stok nutrisi B, dan tangki mixing sebagai wadah pencampuran akhir. Algoritma kendali sistem menggunakan metode Fuzzy Logic Mamdani. Variabel masukan sistem berupa *Error* EC ($e = \text{Setpoint} - \text{EC Aktual}$) dengan rentang -1,5 hingga 1,5 mS/cm yang dibagi menjadi 5 himpunan fuzzy (Sangat Rendah, Rendah, Normal, Tinggi, Sangat Tinggi). Variabel keluaran sistem berupa Duty Cycle PWM pompa nutrisi (rentang 0–255) yang dibagi menjadi 5 tingkatan (OFF, Lambat, Sedang, Cepat, Maksimum). Proses inferensi menggunakan fungsi implikasi MIN-MAX serta metode defuzzifikasi Center of Area (Centroid) untuk menghasilkan nilai PWM aktuator secara adaptif.

Sebelum pengujian fungsional, dilakukan kalibrasi pada seluruh sensor guna memastikan tingkat akurasi pengukuran. Sensor EC dikalibrasi menggunakan larutan standar 718 $\mu\text{S/cm}$, sensor pH dikalibrasi menggunakan larutan buffer dua titik (pH 4,00; pH 6,86; dan pH 9,18), serta sensor ultrasonik dan suhu divalidasi terhadap mistar ukur dan termometer digital acuan. Tahapan pengujian sistem dilakukan secara bertahap meliputi uji fungsional perangkat keras, uji komunikasi MQTT dan keandalan dashboard SCADA FUXA, serta uji mode manual dan otomatis berdasarkan tiga skenario fase pertumbuhan tanaman, yaitu Fase Persemaian (setpoint 0,70 mS/cm), Vegetatif Awal (1,20 mS/cm), dan Vegetatif Penuh (1,80 mS/cm). Kinerja sistem selanjutnya dievaluasi berdasarkan empat parameter kuantitatif utama, yakni overshoot EC (%), settling time (menit), error steady-state (mS/cm), dan stabilitas EC.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Sistem

Implementasi sistem merupakan tahap realisasi dari perancangan perangkat keras, pemrograman mikrokontroler ESP32, serta pengembangan antarmuka SCADA menggunakan FUXA. Seluruh komponen seperti sensor EC, pH, suhu, ultrasonik, aktuator pompa, dan motor mixer diintegrasikan agar dapat bekerja secara otomatis maupun manual.

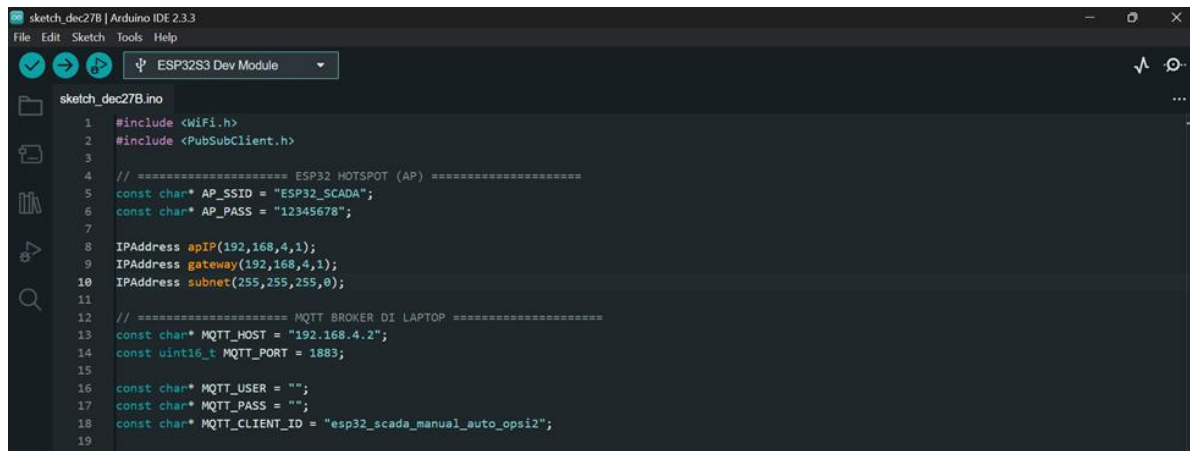


Gambar 1. Implementasi Sistem Pencampuran Nutrisi Hidroponik Berbasis ESP32



Gambar 2. Implementasi Perangkat Keras Sistem.

Perangkat lunak pada ESP32 berfungsi untuk membaca data sensor, menjalankan komunikasi MQTT, serta menerapkan metode kontrol Fuzzy Mamdani pada mode otomatis. Platform SCADA FUXA digunakan sebagai Human Machine Interface (HMI) untuk menampilkan kondisi sistem secara real-time.

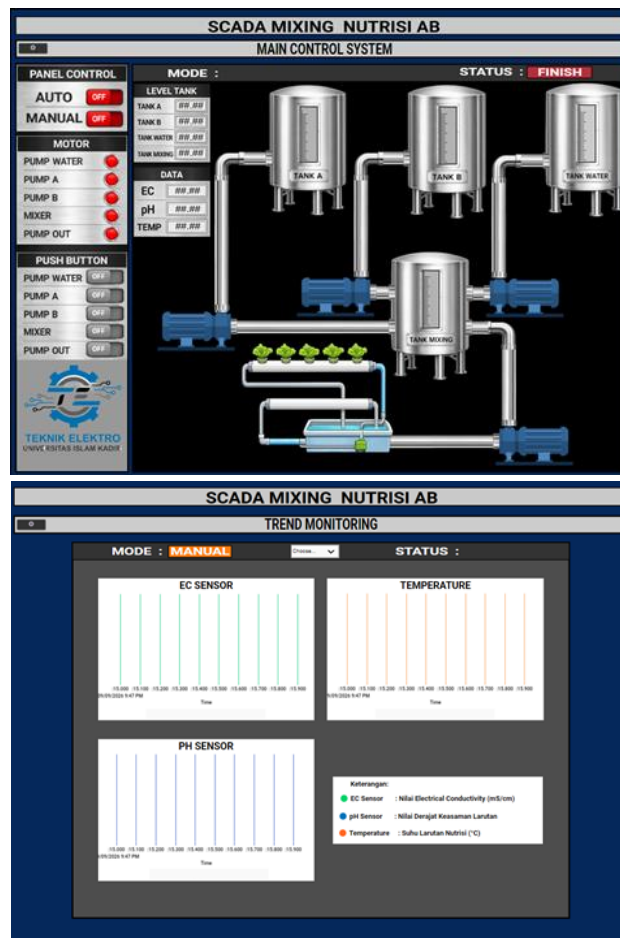


```

1 #include <WiFi.h>
2 #include <PubSubClient.h>
3
4 // ===== ESP32 HOTSPOT (AP) =====
5 const char* AP_SSID = "ESP32_SCADA";
6 const char* AP_PASS = "12345678";
7
8 IPAddress apIP(192,168,4,1);
9 IPAddress gateway(192,168,4,1);
10 IPAddress subnet(255,255,255,0);
11
12 // ===== MQTT BROKER DI LAPTOP =====
13 const char* MQTT_HOST = "192.168.4.2";
14 const uint16_t MQTT_PORT = 1883;
15
16 const char* MQTT_USER = "";
17 const char* MQTT_PASS = "";
18 const char* MQTT_CLIENT_ID = "esp32_scada_manual_auto_opsi2";
19

```

Gambar 3. Implementasi Perangkat Lunak ESP32 (potongan kode program pada Arduino IDE)



Gambar 4. Tampilan Dashboard SCADA FUXA (tampilan Main Control System dan Trend Monitoring).

Hasil Kalibrasi Sensor

Sebelum digunakan dalam pengujian sistem, seluruh sensor terlebih dahulu dikalibrasi untuk memastikan tingkat akurasi pengukuran.

Tabel 1. Hasil Kalibrasi Sensor EC

No	EC Standar ($\mu\text{S/cm}$)	ADC Sensor	Tegangan (V)	EC Sensor ($\mu\text{S/cm}$)	Error (%)
1	718	1281	1,032	710	1,11
2	718	1281	1,032	710	1,11
3	718	1281	1,033	710	1,11
4	718	1281	1,032	710	1,11
5	718	1281	1,033	710	1,11

Menunjukkan perbandingan nilai EC standar 718 $\mu\text{S/cm}$ dengan hasil sensor dan nilai error sebesar 1,11%.

Tabel 2. Hasil Kalibrasi Sensor pH

No	Larutan Buffer	pH Standar	Sensor pH	Error (%)
1	Buffer pH 4,00	4,00	4,08	2,00
2	Buffer pH 6,86	6,86	6,91	0,73
3	Buffer pH 9,18	9,18	9,10	0,87

Menunjukkan pengujian pada buffer pH 4,00; 6,86; dan 9,18 dengan error berkisar 0,73%–2,00%.

Tabel 3. Hasil Kalibrasi Sensor Ultrasonik

No	Tabung	Tinggi Acuan (cm)	Sensor Ultrasonik (cm)	Error (%)
1	Nutrisi A	20,0	19,8	1,00
2	Nutrisi B	20,0	20,2	1,00
3	Air	50,0	49,6	0,80
4	Mixing	60,0	59,5	0,83

Menunjukkan pengujian level pada tangki Nutrisi A, B, Air, dan Mixing dengan error 0,80%–1,00%.

Tabel 4. Hasil Kalibrasi Sensor Temperatur

No	Termometer Digital ($^{\circ}\text{C}$)	Sensor Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Error (%)
1	25,0	25,2	0,80
2	27,0	27,1	0,37
3	28,0	28,2	0,71
4	30,0	30,1	0,33
5	32,0	31,8	0,63

Menunjukkan perbandingan DS18B20 dengan termometer digital dengan error 0,33%–0,80%. Hasil pengujian kalibrasi menunjukkan bahwa seluruh sensor memiliki tingkat persentase error yang kecil, sehingga layak digunakan sebagai masukan data pada sistem.

Pengujian Komunikasi MQTT dan SCADA FUXA

Pengujian komunikasi MQTT dilakukan untuk menguji keandalan pengiriman data sensor (publish) dari ESP32 ke broker serta penerimaan perintah kendali (subscribe) dari SCADA FUXA.

Tabel 5. Hasil Pengujian Komunikasi MQTT

No	Data/Perintah	Topik MQTT	Jumlah Percobaan	Berhasil	Gagal
1	Sensor EC	/sensor/ec	10	10	0
2	Sensor pH	/sensor/ph	10	10	0
3	Sensor Temperatur	/sensor/suhu	10	10	0
4	Sensor Ultrasonik Nutrisi A	/sensor/levelA	10	10	0
5	Sensor Ultrasonik Nutrisi B	/sensor/levelB	10	10	0
6	Sensor Ultrasonik Air	/sensor/levelAir	10	10	0
7	Sensor Ultrasonik Mixing	/sensor/levelMix	10	10	0
8	Kontrol Pompa Air	/control/pompaAir	10	10	0
9	Kontrol Pompa Nutrisi A	/control/pompaA	10	10	0
10	Kontrol Pompa Nutrisi B	/control/pompaB	10	10	0
11	Kontrol Mixer	/control/mixer	10	10	0

Menampilkan persentase keberhasilan 100% dari 10 kali percobaan pengiriman topik sensor dan kontrol).

Tabel 6. Hasil Pengujian SCADA FUXA

No	Data/Perintah	Topik MQTT	Jumlah Percobaan	Berhasil	Gagal
1	Sensor EC	/sensor/ec	10	10	0
2	Sensor pH	/sensor/ph	10	10	0
3	Sensor Temperatur	/sensor/suhu	10	10	0
4	Sensor Ultrasonik Nutrisi A	/sensor/levelA	10	10	0
5	Sensor Ultrasonik Nutrisi B	/sensor/levelB	10	10	0
6	Sensor Ultrasonik Air	/sensor/levelAir	10	10	0
7	Sensor Ultrasonik Mixing	/sensor/levelMix	10	10	0
8	Kontrol Pompa Air	/control/pompaAir	10	10	0
9	Kontrol Pompa Nutrisi A	/control/pompaA	10	10	0
10	Kontrol Pompa Nutrisi B	/control/pompaB	10	10	0
11	Kontrol Mixer	/control/mixer	10	10	0

Menampilkan keberhasilan respons HMI terhadap pemantauan parameter dan eksekusi perintah aktuator). Hasil pengujian membuktikan bahwa protokol MQTT dan platform SCADA FUXA dapat berjalan secara stabil tanpa adanya kegagalan data (packet loss), sehingga mendukung monitoring dan kontrol secara real-time.

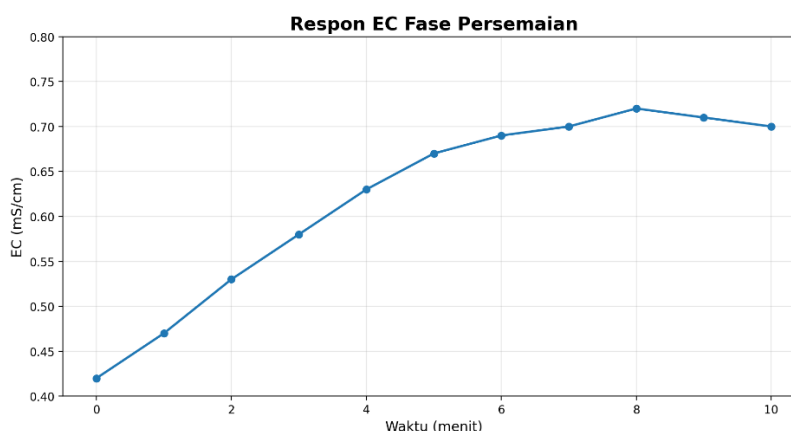
Pengujian Kontrol Fuzzy Mamdani

Pengujian kontrol fuzzy dilakukan pada tiga fase pertumbuhan tanaman untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengarahkan nilai EC aktual menuju setpoint.

Fase Persemaian (Setpoint 0,70 mS/cm):

Tabel 7. Hasil Pengujian Kontrol Fuzzy Fase Persemaian.

No	EC Awal (mS/cm)	Setpoint (mS/cm)	PWM	EC Akhir (mS/cm)	Waktu (menit)
1	0,42	0,70	155	0,47	1
2	0,47	0,70	155	0,53	2
3	0,53	0,70	148	0,58	3
4	0,58	0,70	148	0,63	4
5	0,63	0,70	140	0,67	5
6	0,67	0,70	132	0,69	6
7	0,69	0,70	120	0,70	7
8	0,70	0,70	110	0,72	8
9	0,72	0,70	90	0,71	9
10	0,71	0,70	70	0,70	10



Gambar 5. Grafik Respon EC Fase Persemaian.

Sistem mampu membawa nilai EC dari kondisi awal 0,42 mS/cm menuju setpoint 0,70 mS/cm dengan settling time 5 menit dan overshoot sebesar 2,86%.

Fase Vegetatif Awal (Setpoint 1,20 mS/cm):

Tabel 8. Hasil Pengujian Kontrol Fuzzy Fase Vegetatif Awal.

No	EC Awal (mS/cm)	Setpoint (mS/cm)	PWM	EC Akhir (mS/cm)	Waktu (menit)
----	-----------------	------------------	-----	------------------	---------------

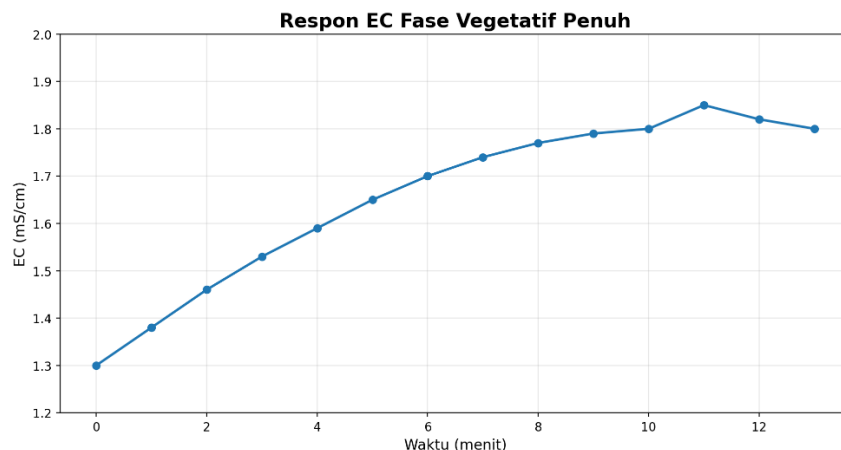
1	0,78	1,20	185	0,85	1
2	0,85	1,20	185	0,92	2
3	0,92	1,20	175	0,99	3
4	0,99	1,20	175	1,05	4
5	1,05	1,20	165	1,10	5
6	1,10	1,20	165	1,14	6
7	1,14	1,20	150	1,17	7
8	1,17	1,20	145	1,19	8
9	1,19	1,20	138	1,20	9
10	1,20	1,20	115	1,23	10
11	1,23	1,20	90	1,21	11
12	1,21	1,20	75	1,20	12

Grafik Rujukan: Gambar 4.6 Grafik Respon EC Fase Vegetatif Awal. Nilai EC awal sebesar 0,78 mS/cm berhasil diarahkan menuju setpoint 1,20 mS/cm dengan settling time 7 menit dan overshoot sebesar 2,50%.

Fase Vegetatif Penuh (Setpoint 1,80 mS/cm):

Tabel 9. Hasil Pengujian Kontrol Fuzzy Fase Vegetatif Penuh.

No	EC Awal (mS/cm)	Setpoint (mS/cm)	PWM	EC Akhir (mS/cm)	Waktu (menit)
1	1,30	1,80	200	1,38	1
2	1,38	1,80	200	1,46	2
3	1,46	1,80	192	1,53	3
4	1,53	1,80	192	1,59	4
5	1,59	1,80	182	1,65	5
6	1,65	1,80	182	1,70	6
7	1,70	1,80	175	1,74	7
8	1,74	1,80	170	1,77	8
9	1,77	1,80	160	1,79	9
10	1,79	1,80	155	1,80	10
11	1,80	1,80	135	1,85	11
12	1,85	1,80	105	1,82	12
13	1,82	1,80	80	1,80	13



Gambar 7. Grafik Respon EC Fase Vegetatif Penuh.

Sistem mengarahkan nilai EC dari 1,30 mS/cm menuju setpoint 1,80 mS/cm dengan settling time 8 menit dan overshoot sebesar 2,78%. Secara keseluruhan, analisis performa kontrol dirangkum dalam parameter evaluasi berikut:

Tabel 10. Hasil Analisis Overshoot

No	Fase Pertumbuhan	Setpoint (mS/cm)	EC Maksimum (mS/cm)	Overshoot
1	Persemaian	0,70	0,72	2,86%
2	Vegetatif Awal	1,20	1,23	2,50%
3	Vegetatif Penuh	1,80	1,85	2,78%

Tabel 11. Rentang Toleransi EC

Fase Pertumbuhan	Setpoint (mS/cm)	Batas Bawah (mS/cm)	Batas Atas (mS/cm)
Persemaian	0,70	0,65	0,75
Vegetatif Awal	1,20	1,15	1,25
Vegetatif Penuh	1,80	1,75	1,85

Tabel 12. Hasil Analisis Settling Time

No	Fase Pertumbuhan	Setpoint	Rentang Toleransi	Settling Time
1	Persemaian	0,70	0,65–0,75	5 menit
2	Vegetatif Awal	1,20	1,15–1,25	7 menit
3	Vegetatif Penuh	1,80	1,75–1,85	8 menit

Tabel 13. Hasil Analisis Error Steady-State (menunjukkan error stabil sebesar 0,00 hingga -0,01 mS/cm)

No	Fase Pertumbuhan	Setpoint (mS/cm)	EC Steady (mS/cm)	Error Steady-State (mS/cm)
1	Persemaian	0,70	0,70	0,00
2	Vegetatif Awal	1,20	1,19	0,01
3	Vegetatif Penuh	1,80	1,81	-0,01

Tabel 14. Hasil Pengamatan Stabilitas EC

Waktu Pengamatan	Persemaian (mS/cm)	Vegetatif Awal (mS/cm)	Vegetatif Penuh (mS/cm)
Menit 1	0,69	1,19	1,81
Menit 2	0,71	1,20	1,82
Menit 3	0,72	1,23	1,84
Menit 4	0,70	1,21	1,80
Menit 5	0,69	1,19	1,79

Tabel 15. Rekapitulasi Kinerja Kontrol Fuzzy (tabel ringkasan menyeluruh parameter pengujian kontrol).

No	Fase Pertumbuhan	Setpoint (mS/cm)	EC Awal (mS/cm)	Overshoot	Settling Time	Error Steady-State	Stabilitas
1	Persemaian	0,70	0,42	2,86%	5 menit	0,00	Stabil
2	Vegetatif Awal	1,20	0,78	2,50%	7 menit	0,01	Stabil
3	Vegetatif Penuh	1,80	1,30	2,78%	8 menit	-0,01	Stabil

Pengujian Mode Manual dan Otomatis

Pengujian fungsional sistem secara operasional dilakukan pada mode manual dan mode otomatis untuk memastikan seluruh perintah eksekusi berjalan dengan baik.

Tabel 16. Hasil Pengujian Mode Manual

No	Aktuator	Perintah	Jumlah Pengujian	Berhasil	Gagal
1	Pompa Air	ON/OFF	10	10	0
2	Pompa Nutrisi A	ON/OFF	10	10	0
3	Pompa Nutrisi B	ON/OFF	10	10	0
4	Motor Mixer	ON/OFF	10	10	0

Menampilkan pengujian kontrol ON/OFF aktuator pompa dan mixer).

Tabel 17. Hasil Pengujian Mode Otomatis

No	Tahapan Pengujian	Jumlah Pengujian	Berhasil	Gagal
1	Pemilihan fase tanaman	3	3	0
2	Pembacaan seluruh sensor	3	3	0
3	Pengiriman data ke SCADA	3	3	0
4	Perhitungan kontrol fuzzy	3	3	0
5	Pengendalian pompa nutrisi	3	3	0
6	Proses pencampuran nutrisi	3	3	0
7	EC mencapai <i>setpoint</i>	3	3	0

Menampilkan pengujian tahapan sistem secara utuh dari pemilihan fase hingga pencapaian setpoint. Hasil pengujian keseluruhan menunjukkan bahwa perangkat keras, komunikasi MQTT, antarmuka SCADA FUXA, serta algoritma kontrol Fuzzy Mamdani dapat berintegrasi dengan sangat baik dalam mengotomatisasi proses pencampuran nutrisi hidroponik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem SCADA untuk pencampuran nutrisi hidroponik berbasis mikrokontroler ESP32 menggunakan metode kontrol Fuzzy Mamdani, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut: Implementasi Sistem Terintegrasi: Sistem pencampuran nutrisi hidroponik berhasil dirancang dan diwujudkan dengan mengintegrasikan sensor EC, pH, suhu, sensor ultrasonik, serta aktuator berupa pompa air, pompa nutrisi A, pompa nutrisi B, motor mixer, pompa output, dan pompa sirkulasi, sehingga mampu melakukan proses pemantauan dan pengendalian secara menyeluruh. Keandalan Komunikasi MQTT dan SCADA FUXA: Protokol MQTT melalui broker Mosquitto terbukti berhasil menjembatani komunikasi data antara ESP32 dan platform SCADA FUXA. Seluruh data sensor dapat dikirim dan divisualisasikan pada HMI secara real-time, dan perintah kendali dari SCADA dapat dieksekusi dengan baik pada mode manual maupun otomatis. Penerapan Kontrol Fuzzy Mamdani: Metode kontrol Fuzzy Mamdani berhasil diterapkan berdasarkan nilai error antara setpoint dan nilai EC aktual untuk mengatur kecepatan pompa nutrisi. Pengujian pada tiga fase pertumbuhan tanaman—yaitu Fase Persemaian (setpoint 0,70 mS/cm), Vegetatif Awal (1,20 mS/cm), dan Vegetatif Penuh (1,80 mS/cm)—membuktikan bahwa sistem mampu mengarahkan nilai EC menuju target setpoint pada masing-masing fase. Performa Respon Sistem: Berdasarkan analisis kinerja kontrol, diperoleh nilai overshoot masing-masing sebesar 2,86% (Fase Persemaian), 2,50% (Fase Vegetatif Awal), dan 2,78% (Fase Vegetatif Penuh), dengan settling time berturut-turut sekitar 5 menit, 7 menit, dan 8 menit. Adapun nilai error steady-state yang dihasilkan sangat kecil, yakni 0,00 mS/cm, 0,01 mS/cm, dan -0,01 mS/cm. Stabilitas Larutan Nutrisi: Hasil pengamatan stabilitas menunjukkan bahwa nilai EC dapat dipertahankan di sekitar setpoint dalam rentang toleransi selama periode pengamatan (0,69–0,72 mS/cm pada fase Persemaian; 1,19–1,23 mS/cm pada fase Vegetatif Awal; dan 1,79–1,84 mS/cm pada fase Vegetatif Penuh), yang menandakan bahwa sistem otomatisasi bekerja secara stabil sesuai kebutuhan fase pertumbuhan tanaman.

REFERENSI

- A. M. Ridwan, A. S. Milah, L. Kamelia, and M. R. Renaldi Gunawan, "Sistem Kendali Fuzzy Logic untuk Kestabilan pH dan EC Nutrisi Pada Hidroponik," *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 15, no. 3, p. 152, Jun. 2025, doi: 10.22441/jte.2024.v15i3.002.
- A. Abu Sneineh and A. A. A. Shabaneh, "Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things," *MethodsX*, vol. 11, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mex.2023.102401.

- J.-H. Guo, T.-Y. Lin, K.-H. Hsia, and A. History, "Web-based IoT and Robot SCADA using MQTT protocol A R T I C L E I N F O," 2022. [Online]. Available: <https://alife-robotics.org/jrnal.html>
- C. H. Chen, S. Y. Jeng, and C. J. Lin, "Fuzzy Logic Controller for Automating Electrical Conductivity and pH in Hydroponic Cultivation," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/app12010405.
- P. Y. Aisyah, I. Zarkasih, and M. Kurnia, "Smart and sustainable hydroponics: Fuzzy logic-based environmental control for optimized indoor crop growth," *Green Technologies and Sustainability*, vol. 4, no. 2, Apr. 2026, doi: 10.1016/j.grets.2025.100311.
- H. Sulaiman, A. A. Yusof, and M. K. Mohamed Nor, "Automated Hydroponic Nutrient Takaran System: A Scoping Review of pH and Electrical Conductivity Takaran Frameworks," Feb. 01, 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/agriengineering7020043.
- K. Vought et al., "Dynamics of micro and macronutrients in a hydroponic nutrient film technique system under lettuce cultivation," *Heliyon*, vol. 10, no. 11, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e32316.
- S. Malkawi, D. Hagare, and B. Maheshwari, "Phosphorus recovery from hydroponics waste nutrient solution and its economic potential," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 209, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.resconrec.2024.107710.
- H. Prastono, M. Solahudin, and Supriyanto, "Evaluation of Nutrient Takaran Methods for Hydroponic Crop Cultivation," *Jurnal Keteknik Pertanian*, vol. 11, no. 3, pp. 279–293, Dec. 2023, doi: 10.19028/jtep.011.3.279-293.
- M. K. Opung, G. Wijana, and I. M. Sukewijaya, "Pengaruh Electrical Conductivity (EC) dan Jumlah Bibit per Net Pot terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Pakcoy (*Brassica rapa* L.) pada Hidroponik Deep Flow Technique," *Agro Bali : Agricultural Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 276–285, Mar. 2024, doi: 10.37637/ab.v7i1.1342.
- U. Sanaba, R. Rokhana, S. Setiawardhana, and A. Wijayanto, "Nutrition Temperature and TDS Control System with Fuzzy Logic on Pak Choy Hydroponics (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*)," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 20, no. 3, Sep. 2024, doi: 10.17529/jre.v20i3.34322.
- A. Abu Sneineh and A. A. A. Shabaneh, "Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things," *MethodsX*, vol. 11, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mex.2023.102401.
- S. Bhawana Mulia, S. Aminah, and F. Abu Niddal, "Control and Monitoring System of Hydroponic Nutrients in Different Hydroponic Racks Based on IoT in Cibodas Village Lembang District," *International Journal on Smart Material and Mechatronics*, vol. 11, no. 2, p. 2024, doi: 10.20342/IJSMM.11.2.
- D. Usman and D. S. Permana, "Water Pump Control System using Pulse Width Modulation Method Based on Arduino Uno R3," *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*, vol. 23, no. 2, p. 136, Oct. 2024, doi: 10.20961/mechanika.v23i2.89449.

- D. Fauzan Akbar et al., “IMPLEMENTASI DAN PERKEMBANGAN SISTEM SCADA DI INDUSTRI: TINJAUAN DARI SUDUT PANDANG PAKAR.” [Online]. Available: <https://doi.org/>
- M. Fahri and R. Setiawan, “Optimasi Sistem Monitoring Penghitung Produk Gula Dengan Menggunakan SCADA Berbasis Distributed Control System (DCS) 463 Optimasi Sistem Monitoring Penghitung Produk Gula dengan Menggunakan SCADA Berbasis Distributed Control System (DCS).”
- U. Samarakoon, J. Palmer, P. Ling, and J. Altland, “Effects of electrical conductivity, pH, and foliar application of calcium chloride on yield and tipburn of lactuca sativa grown using the nutrient-film technique,” *HortScience*, vol. 55, no. 8, pp. 1265–1271, Jul. 2020, doi: 10.21273/HORTSCI15070-20.