

Analisis Eksperimental Supervisory Adaptive Fuzzy Control untuk Kestabilan Nutrisi dan Ketersediaan Air pada Sistem Hidroponik Cerdas

Juju Juhaeriyah¹, Muhamad Riyad Ariwibowo², Ahmad Syahruli³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Swadaya Gunung Jati

¹juju_juhaeriyah@ugj.ac.id*, ²riyad_ariwibowo@ugj.ac.id, ³ahmad.122220005@ugj.ac.id

Abstract

Modern hydroponic systems face instability in nutrient levels and water availability. Previous research has not integrated Supervisory Adaptive Fuzzy Control (SAFC) with IoT monitoring in a unified and adaptive manner. This research is important for supporting sustainable precision agriculture through efficient and responsive automated hydroponic control that adapts to the dynamics of modern agricultural environments. This study aims to develop an IoT-based smart hydroponic system using SAFC for nutrient and water stabilization. An experimental approach was adopted, encompassing the design of an IoT architecture, prototype assembly, implementation of the SAFC algorithm, testing and analysis. Testing included sensor accuracy, rule validation, and real-time analysis of nutrient stability and water availability. Test results showed that the TDS sensor achieved 96.49% accuracy with an error of 3.51%, whilst the ultrasonic sensor achieved 95.66% accuracy with an error of 4.34%. The system consistently met the nine SAFC rules across all test variations. Stability experiments lasting 33 minutes for each variant showed that a flow ratio of 1:2 produced the best stability in the 'medium' category, with an average TDS of 762.83 ppm and a water level of 6.05 cm. IoT integration enables real-time data synchronization between prototypes, mobile apps, and desktop apps with 100% transmission accuracy, supporting efficient and sustainable remote monitoring and control of hydroponic systems. These findings reinforce the development of intelligent precision agriculture based on adaptive control. Further research should integrate lightweight machine learning and validation in real-world greenhouse settings.

Keywords: smart hydroponic system, supervisory adaptive fuzzy control, Internet of Things, precision agriculture, intelligent control system

Abstrak

Sistem hidroponik modern menghadapi masalah ketidakstabilan kadar nutrisi dan ketersediaan air. Penelitian sebelumnya belum mengintegrasikan Supervisory Adaptive Fuzzy Control (SAFC) dengan pemantauan IoT secara terpadu dan adaptif. Penelitian ini penting untuk mendukung pertanian presisi yang berkelanjutan melalui kontrol hidroponik otomatis yang efisien dan responsif, yang dapat beradaptasi dengan dinamika lingkungan pertanian modern. Studi ini bertujuan untuk mengembangkan sistem hidroponik cerdas berbasis IoT dengan menggunakan SAFC untuk menstabilkan nutrisi dan ketersediaan air. Pendekatan eksperimental diterapkan, mencakup desain arsitektur IoT, perakitan prototipe, implementasi algoritma SAFC, serta pengujian dan analisis. Pengujian mencakup akurasi sensor, validasi aturan, dan analisis real-time terhadap stabilitas nutrisi dan ketersediaan air. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor TDS mencapai akurasi 96,49% dengan kesalahan 3,51%, sedangkan sensor ultrasonik mencapai akurasi 95,66% dengan kesalahan 4,34%. Sistem secara konsisten memenuhi sembilan aturan SAFC pada semua variasi pengujian. Eksperimen stabilitas yang berlangsung selama 33 menit untuk setiap variasi menunjukkan bahwa rasio aliran 1:2 menghasilkan stabilitas terbaik yakni kategori cukup, dengan rata-rata TDS 762,83 ppm dan tingkat kedalaman air 6,05 cm. Integrasi IoT memungkinkan sinkronisasi data secara real-time antara prototipe, aplikasi seluler, dan aplikasi desktop dengan akurasi transmisi 100%, mendukung pemantauan dan pengendalian jarak jauh yang efisien dan berkelanjutan pada sistem hidroponik. Temuan ini memperkuat pengembangan pertanian presisi cerdas berbasis kontrol adaptif. Penelitian lebih lanjut sebaiknya mengintegrasikan pembelajaran mesin ringan dan validasi dalam lingkungan rumah kaca dunia nyata.

Kata kunci: sistem hidroponik pintar, supervisory adaptive fuzzy control, internet of things, pertanian presisi, sistem kendali cerdas

1. Pendahuluan

Tren global terbaru menunjukkan bahwa sektor pertanian dunia sedang menghadapi tekanan akibat pertumbuhan populasi yang cepat, perubahan iklim, dan berkurangnya lahan pertanian produktif. Menurut Food and Agriculture Organization, kebutuhan pangan global diproyeksikan meningkat hampir 60% pada tahun 2050, sementara ketersediaan sumber daya air untuk pertanian terus mengalami penurunan signifikan. Sistem budidaya hidroponik muncul sebagai solusi

yang menjanjikan karena mampu menghasilkan produksi tanaman dengan penggunaan air hingga 90% lebih hemat dibandingkan pertanian konvensional berbasis tanah. Selain itu, integrasi Internet of Things dalam pertanian cerdas berkembang sangat pesat, seiring meningkatnya adopsi teknologi pemantauan realtime dan sistem kendali lingkungan otomatis. Penelitian empiris terbaru juga menunjukkan bahwa sistem hidroponik presisi yang didukung teknologi sensor cerdas mampu meningkatkan produktivitas

tanaman, efisiensi nutrisi, dan keberlanjutan sistem pertanian secara signifikan [1]. Secara khusus, konsentrasi nutrisi dan ketersediaan air merupakan parameter penting yang secara langsung memengaruhi hasil dan kualitas tanaman pada sistem hidroponik [2]. Perkembangan ini menunjukkan bahwa sistem pemantauan dan pengendalian hidroponik berbasis kecerdasan menjadi semakin penting untuk menjamin keberlanjutan produksi pangan di tengah keterbatasan lingkungan modern.

Meskipun sistem hidroponik memiliki berbagai keunggulan, menjaga kestabilan konsentrasi nutrisi dan ketersediaan air tetap menjadi tantangan kritis. Variasi nilai electrical conductivity (EC) dan total dissolved solids (TDS) dapat menyebabkan ketidakseimbangan nutrisi yang berdampak signifikan terhadap pertumbuhan tanaman, produktivitas, dan kualitas hasil panen [3]. Tanpa intervensi yang tepat, fluktuasi kadar nutrisi dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman terhambat, penurunan hasil panen, serta peningkatan biaya operasional bagi petani. Selain itu, ketidakstabilan volume air dapat mengganggu distribusi nutrisi, sehingga memperparah ketidakstabilan sistem [4].

Penelitian sebelumnya telah berupaya mengatasi permasalahan ini melalui berbagai pendekatan berbasis sensor, fuzzy logic control, dan otomatisasi hidroponik berbasis IoT. Penelitian yang dilakukan oleh Benyezza dan Yulianto mengembangkan platform pemantauan hidroponik berbasis IoT yang mampu mengirimkan data lingkungan secara realtime ke server cloud untuk kebutuhan pemantauan jarak jauh [5,6]. Studi lain mengeksplorasi teknik kendali cerdas seperti fuzzy logic untuk mengatur irigasi dalam sistem pertanian [7]. Penelitian lain oleh Sihombing menerapkan fuzzy logic controller untuk mengatur konsentrasi nutrisi dan sirkulasi air pada sistem nutrient film technique [8]. Selain itu, beberapa studi mengintegrasikan wireless sensor network dan cloud computing guna meningkatkan efisiensi pemantauan dan predictive maintenance pada sistem pertanian cerdas [9].

Sistem hidroponik sangat bergantung pada kualitas air, nutrisi, dan kondisi lingkungan, namun petani sering kekurangan waktu untuk memantau secara manual. Banyak peneliti mengembangkan sistem IoT agar proses monitoring dan kontrol dapat berjalan secara otomatis, akurat, dan dapat diakses secara real time melalui web atau mobile app [10,11]. Beberapa studi lainnya mencatat Integrasi IoT dalam sistem hidroponik dapat mempermudah pemantauan, mengurangi kerja manual, dan membantu meningkatkan hasil panen atau kualitas tanaman [12,13].

Namun demikian, sebagian besar studi masih berfokus pada aspek monitoring dibandingkan kontrol adaptif, sehingga kontribusi terhadap pengembangan sistem

kendali cerdas masih terbatas. Hal ini membuka peluang untuk integrasi metode kontrol yang lebih kompleks dalam ekosistem IoT.

Fuzzy logic telah menjadi pendekatan populer dalam pengendalian lingkungan hidroponik karena kemampuannya menangani ketidakpastian dan non-linearitas sistem. Beberapa studi menunjukkan bahwa metode seperti fuzzy mampu menjaga stabilitas parameter seperti suhu dan kelembaban dengan tingkat error yang relatif rendah. Mayoritas peneliti menyatakan bahwa fuzzy logic unggul dibandingkan kontrol konvensional dalam kondisi lingkungan yang dinamis [14].

Namun, terdapat perdebatan akademik terkait pemilihan metode fuzzy yang paling optimal. Secara umum, Sugeno lebih mudah dianalisis stabilitasnya, sedangkan Mamdani lebih intuitif namun lebih berat komputasinya [15]. Pada studi lainnya yang membandingkan langsung Tsukamoto vs Sugeno pada satu sistem IoT yang sama menghasilkan bahwa Tsukamoto unggul dalam kecepatan mencapai set point, sedangkan Sugeno unggul pada kestabilan steady-state [16].

Gap metodologis yang muncul adalah keterbatasan dalam desain rule base yang masih bergantung pada expert knowledge, sehingga kurang adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Aplikasi praktis dari integrasi metode cerdas dalam sistem hidroponik menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi dan produktivitas. Studi terbaru menggabungkan fuzzy logic dengan machine learning dapat meningkatkan performa sistem dengan penurunan error steady-state hingga > 90% jika dibandingkan dengan fuzzy murni [17,18]. Namun, diperlukan sistem yang benar-benar mumpuni untuk mendukung implementasi machine learning, karena sistem akan membutuhkan data pelatihan besar, waktu training yang Panjang dan beban komputasi yang tinggi [19,20].

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa integrasi IoT dan metode kendali cerdas telah membawa kemajuan signifikan dalam sistem hidroponik, khususnya dalam aspek monitoring dan stabilisasi lingkungan. Pola yang muncul mengindikasikan pergeseran dari sistem berbasis rule statis menuju sistem adaptif. Namun, gap utama terletak pada kurangnya integrasi antara sistem IoT dengan metode kendali yang benar-benar adaptif secara real-time. Selain itu, keterbatasan dalam desain rule fuzzy dan minimnya pendekatan hybrid yang ringan menjadi tantangan tersendiri. Oleh karena itu, penelitian ini diperlukan untuk mengembangkan sistem kendali cerdas berbasis IoT yang mengintegrasikan fuzzy logic dengan pendekatan supervisory adaptif, guna meningkatkan performa dan efisiensi sistem secara signifikan.

Meskipun penelitian tersebut memberikan kontribusi yang penting, masih terdapat beberapa keterbatasan. Sebagian besar sistem yang dikembangkan hanya berfokus pada fungsi pemantauan tanpa menerapkan mekanisme pengambilan keputusan adaptif yang mampu menyesuaikan distribusi nutrisi dan ketersediaan air secara dinamis terhadap perubahan kondisi lingkungan. Selain itu, pendekatan fuzzy control konvensional umumnya masih menggunakan membership function dan rule base yang bersifat statis sehingga kemampuan adaptasinya terhadap gangguan realtime menjadi terbatas. Penelitian yang ada juga belum banyak membahas integrasi Supervisory Adaptive Fuzzy Control (SAFC) dengan sistem pemantauan hidroponik berbasis IoT dalam satu framework terpadu yang mampu menjaga kestabilan kadar nutrisi sekaligus mempertahankan ketersediaan air. Gap penelitian ini menjadi sangat penting karena lingkungan hidroponik bersifat dinamis dan membutuhkan sistem kendali adaptif yang mampu bekerja secara kontinu agar pertumbuhan tanaman tetap optimal. Oleh karena itu, penelitian ini berupaya menjawab dua pertanyaan utama, yaitu: (1) bagaimana membangun sistem pemantauan kadar nutrisi dan ketersediaan air berbasis IoT secara realtime, dan (2) bagaimana menerapkan SAFC untuk menjaga kestabilan nutrisi dan jumlah air pada sistem hidroponik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pemantauan kadar nutrisi dan ketersediaan air berbasis IoT secara realtime serta menerapkan mekanisme SAFC guna menjaga kestabilan nutrisi dan kecukupan air secara otomatis. Penelitian ini memberikan kontribusi pada bidang intelligent agricultural systems melalui integrasi supervisory adaptive fuzzy dan komunikasi IoT realtime dalam satu arsitektur kendali hidroponik terpadu.

Secara teoretis, penelitian ini memperluas pemahaman mengenai strategi kendali cerdas adaptif untuk lingkungan pertanian dinamis, khususnya pada pengaturan nutrisi hidroponik. Secara praktis, sistem yang diusulkan dapat membantu petani dan pengelola greenhouse meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi pemborosan nutrisi, meminimalkan intervensi manual, serta menjaga konsistensi kualitas hasil panen.

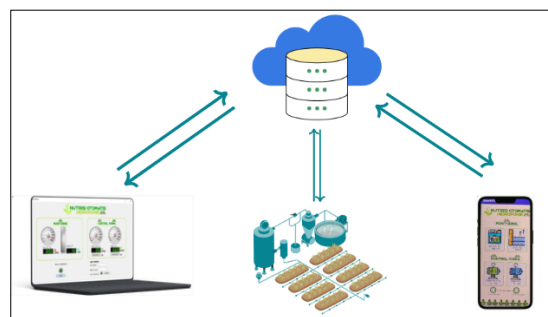
Dari sisi metodologis, penelitian ini memperkenalkan framework SAFC yang mampu menyesuaikan parameter kendali secara dinamis berdasarkan umpan balik sensor secara realtime. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung pengembangan teknologi precision agriculture yang berkelanjutan dan memperkuat implementasi smart farming pada sistem produksi pangan modern.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam studi ini adalah pendekatan penelitian eksperimental yang dikombinasikan dengan desain sistem, pengujian, dan analisis kinerja. Selama fase desain sistem, kegiatan yang dilakukan meliputi desain arsitektur, desain perangkat keras, dan desain perangkat lunak. Selama fase pengujian, kegiatan yang dilakukan meliputi pengujian akurasi sensor dan kesesuaian aturan fuzzy. Akhirnya, analisis akan dilakukan terhadap respons sistem dalam menjaga stabilitas nutrisi dan ketersediaan air hidroponik.

2.1. Desain Arsitektur

Tahap awal desain sistem dimulai dengan merancang arsitektur komunikasi data antar platform menggunakan teknologi Internet of Things. Platform yang digunakan meliputi prototipe hidroponik, Firebase sebagai penyimpanan cloud, serta aplikasi seluler dan desktop sebagai sistem pemantauan realtime. Keempat platform ini terhubung melalui internet dengan alur komunikasi seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.

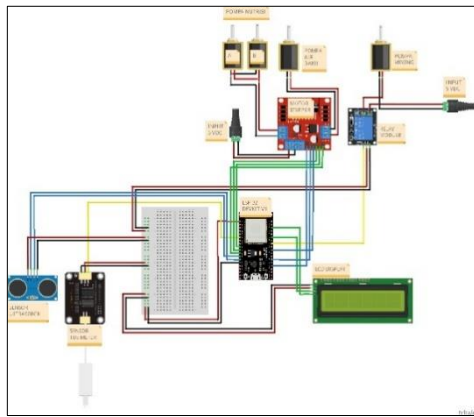


Gambar 1. Arsitektur sistem hidroponik cerdas

Data yang diperlukan untuk memantau dan mengendalikan sistem hidroponik dikirim dari perangkat prototipe ke Firebase. Data yang disimpan di Firebase dapat dikirim langsung melalui internet ke aplikasi seluler dan desktop. Dengan arsitektur ini, sistem dapat dipantau dan dikendalikan dari jarak jauh dan secara real-time.

2.2. Desain Perangkat Keras

Tahap ini dimulai dengan menentukan komponen yang akan digunakan untuk membangun prototipe hidroponik. Komponen-komponen tersebut meliputi ESP32 sebagai unit pengendali sistem, sensor TDS untuk mendeteksi tingkat nutrisi melalui kekeruhan air, sensor ultrasonik untuk mengukur kedalaman air di tangki, motor stepper dan pompa air untuk sirkulasi air nutrisi dan air mentah, serta adaptor catu daya. Semua komponen disusun sesuai dengan Gambar 2 di bawah ini.

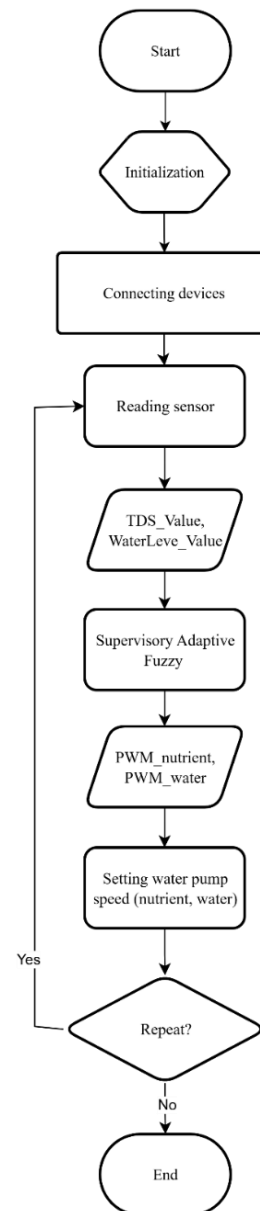


Gambar 2. Wiring diagram hidroponik cerdas

Alur kerja sistem yang digambarkan dalam diagram pengkabelan di atas dimulai dengan mendeteksi tingkat kekeruhan air di dalam tangki melalui sensor TDS Meter dan tingkat kedalaman air melalui sensor ultrasonik. Nilai kekeruhan dan kedalaman air berfungsi sebagai masukan untuk proses fusi yang dilakukan oleh mikrokontroler, yang menghasilkan keluaran berupa nilai PWM untuk pompa air nutrisi dan nilai PWM untuk pompa air mentah. Nilai PWM ini kemudian diterapkan pada kecepatan masing-masing pompa air mentah dan air nutrisi untuk mengisi tangki. Sistem ini bertujuan untuk menjaga tingkat nutrisi dan ketersediaan air di dalam tangki agar selalu ideal untuk mengairi tanaman hidroponik.

2.3. Desain Perangkat Lunak

Tahap ini berfokus pada perancangan perangkat lunak yang mampu mengontrol tingkat nutrisi dan ketersediaan air di tangki hidroponik. Hal ini dicapai dengan menerapkan algoritma fuzzy adaptif yang dapat mengatur stabilitas nutrisi dan ketersediaan air di tangki hidroponik. Untuk detail lebih lanjut, operasi atau alur kerja sistem hidroponik diilustrasikan pada Gambar 3.

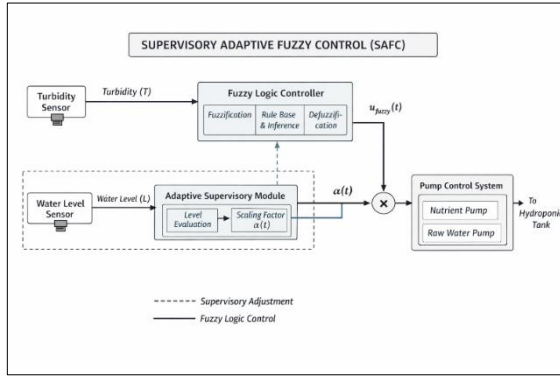


Gambar 3. Diagram alir sistem hidroponik cerdas

Sistem akan memulai operasinya dengan menginisialisasi komponen dan menghubungkan semua perangkat melalui internet. Selanjutnya, sistem akan mendeteksi tingkat nutrisi (TDS_Value) dan tingkat kedalaman air (WaterLevel_Value) di tangki hidroponik. Kedua nilai ini akan diproses menggunakan algoritma SAFC, menghasilkan keluaran berupa nilai PWM_nutrient dan PWM_water. Nilai keluaran ini akan diterapkan sebagai kecepatan pompa air nutrisi dan pompa air mentah yang akan mengisi tangki hidroponik. Sistem kemudian akan terus mengulangi proses deteksi sensor dan penyesuaian kecepatan pompa hingga sistem mencapai stabilitas dalam mengontrol tingkat nutrisi dan ketersediaan air di dalam tangki hidroponik.

2.4. Desain Supervisory Adaptive Fuzzy Control (SAFC)

Seperti yang ditunjukkan pada diagram alir di atas, SAFC akan memproses Nilai TDS dan Nilai Ketinggian Air menjadi PWM nutrisi dan PWM air. Proses ini melibatkan dua tahap: fuzzy logic control dan adaptive supervisory module.



Gambar 4. Diagram blok SAFC

Pada diagram blok SAFC di atas, terlihat bahwa pengendali logika fuzzy menerima masukan berupa nilai dari sensor kekeruhan, yang diproses melalui tiga tahap logika fuzzy. Tiga tahap pemrosesan dalam pengendali logika fuzzy meliputi proses fuzzifikasi, yang mengubah masukan crisp menjadi variabel linguistik menggunakan fungsi keanggotaan (ditunjukkan pada Tabel 1). Hal ini diikuti oleh tahap inferensi, yang melibatkan penerapan aturan dengan menghitung nilai predikat alfa untuk setiap aturan berdasarkan operator logika (AND/OR). Terakhir, proses defuzzifikasi mengubah hasil inferensi menjadi keluaran crisp dengan menghitung rata-rata tertimbang dari semua aturan.

Tabel 1. Kriteria dan rentang nilai variabel

No	Variabel	Kriteria	Rentang Nilai
1	Kepekatan (ppm)	Jernih	0 - 500
		Cukup	600 - 800
		Pekat	900 - 1000
2	Kedalaman air (cm)	Dangkal	0.0 - 4.9
		Cukup	5.0 - 7.9
		Dalam	8.0 - 11.0
3	Kecepatan pompa nutrisi (PWM)	Lambat	100
		Cepat	255
4	Kecepatan pompa air (PWM)	Lambat	100
		Cepat	255

Sedangkan adaptive supervisory module mendapatkan input berupa nilai dari water level sensor (WaterLevel_Value) yang akan diproses melalui dua tahap adaptive supervisory module. Tahap pertama merupakan level evaluation yang membagi tingkat kedalaman air. Kemudian tahap kedua merupakan proses scaling factor yang memberikan nilai skala disetiap tingkat level kedalaman air. Perpaduan fuzzy logic controller dan adaptive supervisory module menghasilkan rules pada tabel 2 berikut:

Tabel 2. Supervisory Adaptive Fuzzy Control Rules

Rules	TDS Value	Water Level	Scale	PWM Nutrient	PWM Water
R1	Jernih	Dangkal	1	Cepat	Lambat
R2	Cukup	Dangkal	1	Lambat	Lambat
R3	Pekat	Dangkal	1	Lambat	Cepat
R4	Jernih	Cukup	0.5	Cepat	Lambat
R5	Cukup	Cukup	0.5	Lambat	Lambat
R6	Pekat	Cukup	0.5	Lambat	Cepat
R7	Jernih	Dalam	0.2	Cepat	Lambat
R8	Cukup	Dalam	0.2	Lambat	Lambat
R9	Pekat	Dalam	0.2	Lambat	Cepat

Berdasarkan rules pada tabel 2 di atas, Hasil dari adaptive supervisory module akan mentuning hasil dari fuzzy logic controller melalui scaling factor hingga menghasilkan nilai kecepatan pompa air nutrisi (PWM_nutrient) dan popa air baku (PWM-water) yang stabil dari sisi kadar nutrisi dan tingkat ketersediaan air dalam tanki.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Perancangan

Smart hydroponic system menghubungkan tiga device melalui komunikasi internet (IoT), yakni protipe Hydroponic, mobile apps dan desktop apps. Hasil perancangan smart hydroponic system terdapat pada Gambar 5 di bawah ini.



Gambar 5. Smart Hydroponic Devices

Ketiga device tersebut telah dilakukan pengujian akuisisi data dengan membandingkan value dari ketiga devices ini. Hasilnya keseluruhan value pada ketiga devices mempunyai nilai yang sama dengan tingkat akurasi 100%.

3.2. Hasil Pengujian Akurasi Sensor

Sensor-sensor yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan pengujian tingkat akurasi sensor yang dapat mencerminkan keandalan sensor dalam mendeteksi perubahan fisik. Pada Tabel 3 menunjukkan tingkat akurasi sensor TDS yang dilakukan selama 10 kali percobaan dengan hasil rata-rata akurasi 96.49 % dan tingkat error sebesar 3.51 %.

Tabel 3. Tingkat akurasi sensor TDS

No	TDS Meter Value	Prototype Value	Error (%)	Akurasi (%)
1	207	222	7.25	92.75
2	429	452	5.36	94.64
3	629	653	3.82	96.18
4	692	703	1.59	98.41
5	770	765	0.65	99.35
6	841	869	3.33	96.67
7	852	872	2.35	97.65
8	938	930	0.85	99.15
9	951	928	2.42	97.58
10	1003	928	7.48	92.52
Average			3.51	96.49

Sedangkan pada Tabel 4 menunjukkan tingkat akurasi sensor ultrasonic yang dilakukan selama 10 kali percobaan dengan hasil rata-rata akurasi sebesar 95.66 % dan error sebesar 4.34 %.

Tabel 4. Tingkat akurasi sensor Ultrasonic

No	Ruler Value	Ultrasonic Value	Error (%)	Akurasi (%)
1	2	1.83	8.50	91.50
2	3	3.13	4.33	95.67
3	3.5	3.43	2.00	98.00
4	4.5	4.4	2.22	97.78
5	5	5.35	7.00	93.00
6	6	6.65	10.83	89.17
7	6.5	6.65	2.31	97.69
8	7.5	7.6	1.33	98.67
9	7	7.27	3.86	96.14
10	8	7.92	1.00	99.00
Average			4.34	95.66

3.3. Hasil Pengujian Akurasi Sensor

SAFC merupakan otak pengendali utama dalam smart hydroponic system. Perlu dilakukan pengujian terhadap sistem dalam pemenuhan keseluruhan Aturan yang telah ditetapkan pada pembahasan methodology di atas. Data hasil pengujian SAFC rules pada Tabel 5 di bawah ini menunjukkan bahwa sistem mampu memenuhi keseluruhan aturan. Jadi, sistem dinilai layak untuk melanjutkan pengujian ke tahap selanjutnya.

Tabel 5. Hasil pengujian SAFC Rules

No	TDS Value	Water Level	PWM Nutrient	PWM Water	Rules
1	329.54	15.75	177.5	100	Rules 1
2	747.19	28.04	100	100	Rules 2
3	976.46	11.39	100	177.5	Rules 3
4	421.38	78.81	88.75	50	Rules 4
5	775.43	59.52	50	50	Rules 5
6	954.37	76.09	50	88.75	Rules 6
7	307.05	97.5	35.5	20	Rules 7
8	650.75	90.23	20	20	Rules 8
9	946.17	88.34	20	35.5	Rules 9

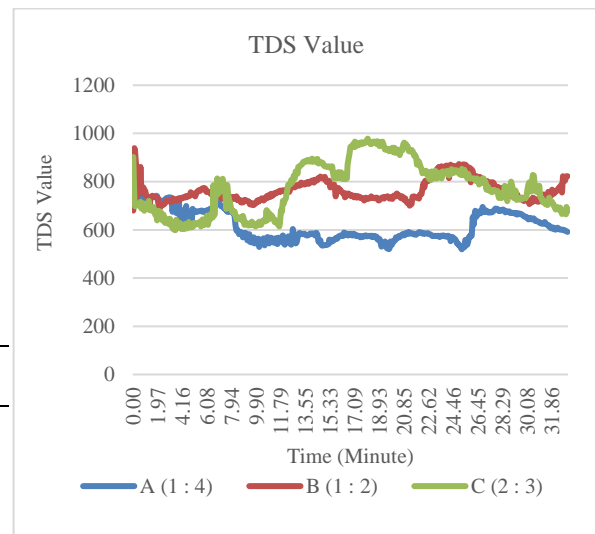
3.4. Analisa Kestabilan TDS Value dan Water Level

Eksperimen pengujian ini dilakukan untuk melihat tingkat kestabilan nutrisi dan ketersediaan air dalam tandon. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan tandon yang berkapasitas 2244 ml (Panjang = 17 cm, lebar = 12 cm, dan tinggi 11 cm) dan dengan tiga variasi perbandingan air masuk dan air keluar dari tandon. Masing-masing varian tersebut dilakukan pengujian selama 33 menit dengan ringkasan perbandingan hasil pengujian terdapat dalam tabel berikut:

Tabel 6. Ringkasan perbandingan hasil eksperimen

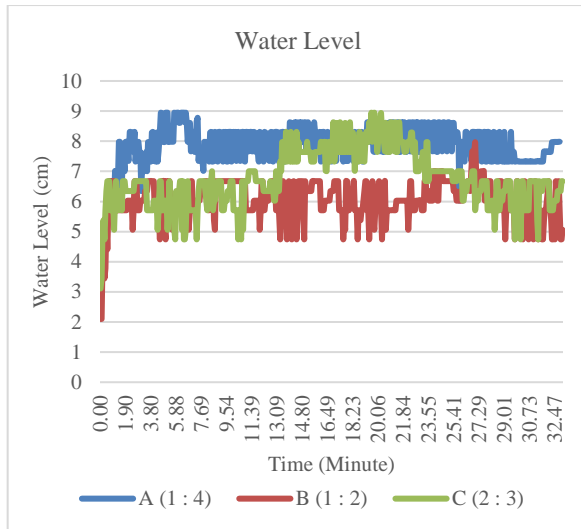
Varian	A (1 : 4)	B (1 : 2)	C (2 : 3)	
Water In (ml)	7,5	15	20	
Water Out (ml)	30	30	30	
TDS Value (ppm)	Average	616.49	762.83	774.46
	Max	809.80	938.89	978.47
	Min	519.21	680.17	598.49
Water Level (cm)	Average	7.85	6.05	6.76
	Max	8.95	7.97	8.95
	Min	2.80	2.10	3.11

Pada tabel 6 di atas terlihat bahwa hasil pengujian dari ketiga varian tersebut mempunyai nilai rata-rata TDS Value maupun water level value stabil pada kategori “Cukup”. Namun pada varian A dan C terdapat nilai TDS Minimum yang menyentuh kategori “Jernih” sedangkan varian B bertahan pada kategori “Cukup”. pada nilai water level maksimum juga varian A dan C menyentuh kategori “Dalam” sedangkan varian B bertahan pada kategori “Cukup”. Oleh karena itu, dari ringkasan pengujian dapat disimpulkan bahwa Varian B lebih stabil dalam menjaga kepekatan nutrisi dan ketersediaan air dalam tanki.



Gambar 6. Perbandingan Kepekatan Nutrisi pada Tiga Varian Percobaan

Gambar 6 di atas menunjukkan detail perbandingan hasil pengujian nilai kepekatan nutrisi (TDS Value) dari tiga variasi pengujian selama 33 menit. Terlihat pada grafik pengujian dengan variasi B menunjukkan tingkat kejernihan lebih stabil di kategori “Cukup” (600 – 800). Sedangkan pada grafik dengan variasi A lebih sering berada pada kategori “Jernih” (kurang dari 600), dan pada grafik dengan variasi C lebih sering berada pada kategori “Pekat” (lebih dari 800). Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa varian B lebih stabil menjaga kepekatan nutrisi.



Gambar 7. Perbandingan Water Level pada Tiga Varian Percobaan

Gambar 7 di atas menunjukkan detail perbandingan hasil pengujian tingkat ketersediaan air (Water Level) dari tiga variasi pengujian selama 33 menit. Terlihat pada grafik pengujian dengan variasi A menunjukkan tingkat ketersediaan air lebih banyak berada pada kategori “Dalam”. Pada grafik pengujian variasi B menunjukkan tingkat ketersediaan air lebih banyak berada pada kategori “Cukup”. Sedangkan pada grafik pengujian variasi C menunjukkan tingkat ketersediaan air berada pada kategori “Cukup” dan “Dalam”. Jadi, dapat disimpulkan bahwa varian B lebih stabil dalam menjaga ketersediaan air dalam tanki hidroponik.

Dari eksperimen pengujian yang telah dilakukan di atas, baik perbandingan dalam ringkasan hasil pengujian maupun perbandingan detail hasil pengujian selama 33 menit, menunjukkan bahwa pengujian varian B (1:2) lebih stabil dalam menjaga kecukupan tingkat nutrisi dan ketersediaan air dalam tanki hidroponik.

Secara keseluruhan, hasil dari analisa penelitian ini menunjukkan bahwa metode SAFC lebih unggul dalam menjaga kestabilan nutrisi dan ketersediaan air dalam tanki hidroponik. SAFC merupakan pengembangan lanjutan dari fuzzy kontrol konvensional karena mampu menyesuaikan parameter kontrol secara otomatis saat terjadi perubahan pada lingkungan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan smart hydroponic system berbasis Internet of Things dengan pendekatan Supervisory Adaptive Fuzzy Control (SAFC) yang mampu menjaga kestabilan nutrisi dan ketersediaan air secara realtime. Hasil penelitian menjawab pertanyaan utama terkait implementasi monitoring IoT dan mekanisme kendali adaptif melalui integrasi sensor TDS, sensor ultrasonik, ESP32, serta adaptive fuzzy controller dalam satu arsitektur terpadu. Temuan menunjukkan bahwa sistem mencapai akurasi sensor TDS sebesar 96,49% dan sensor ultrasonik sebesar 95,66%, serta mampu memenuhi seluruh rules kendali adaptif secara konsisten. Selain itu, variasi pengujian rasio 1:2 menunjukkan performa paling stabil dalam mempertahankan kategori nutrisi dan water level ideal. Kontribusi ini memperkuat pengembangan intelligent precision agriculture melalui sistem kendali hidroponik yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan untuk implementasi smart farming modern.

Meskipun penelitian ini menunjukkan performa sistem yang stabil, pengujian masih terbatas pada prototipe berskala laboratorium dan parameter lingkungan tertentu. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan integrasi machine learning ringan untuk optimasi rule adaptif serta melakukan validasi pada greenhouse skala nyata dengan variasi jenis tanaman dan kondisi lingkungan yang lebih kompleks. Praktisi disarankan menerapkan sistem ini pada budidaya hidroponik komersial untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi melalui monitoring otomatis berbasis cloud. Selain itu, pengembang sistem sebaiknya meningkatkan keamanan data dan efisiensi komunikasi realtime agar implementasi smart hydroponic dapat berjalan lebih andal, skalabel, dan berkelanjutan di masa depan.

Daftar Rujukan

- [1] R. Shamshiri *et al.*, “Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture,” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 11, pp. 1–22, 2018, <https://doi.org/10.25165/ij.ijabe.20181101.3210>
- [2] L. I. Trejo-Téllez and F. Gómez-Merino, “Nutrient Solutions for Hydroponic Systems,” 2012. <https://doi.org/10.5772/37578>
- [3] P. A. Putra and H. Yuliando, “Soilless Culture System to Support Water Use Efficiency and Product Quality: A Review,” *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 3, pp. 283–288, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.01.054>.
- [4] H. Suhardiyanto, K. B. Seminar, Y. Chadirin, and B. I. Setiawan, “Development of a pH Control System for nutrient solution in EBB and Flow Hydroponic Culture Based on Fuzzy Logic,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 34, no. 11, pp. 87–90, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)34111-3](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)34111-3).

- [5] H. Benyezza, M. Bouhedda, K. Djellout, and A. Saidi, "Smart Irrigation System Based Thingspeak and Arduino," in *2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS)*, 2018, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICASS.2018.8651993>.
- [6] D. Yulianto, A. Nugraha, and F. Rahani, "Automated Hydroponics System using the Internet of Things," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 8, 2024, <https://doi.org/10.21831/jee.v8i2.76816>.
- [7] M. Bukhari, S. O. Athar, M. Ullah, and M. N. Aman, "A Fuzzy-Logic-Based Smart Irrigation Controller for Precision Agriculture," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 22, pp. 37257–37268, 2024, <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3440200>.
- [8] P. Sihombing, M. Zarlis, and Herryance, "Automatic Nutrition Detection System (ANDES) for Hydroponic Monitoring by using Micro controller and Smartphone Android," in *2019 Fourth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, 2019, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIC47613.2019.8985851>.
- [9] M. Ayaz, A. Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, and el-H. Aggoune, "Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making the Fields Talk," *IEEE Access*, vol. PP, p. 1, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609>.
- [10] Muh. A. J. Hidayat and A. Amrullah, "Sistem Kontrol dan Monitoring Tanaman Hidroponik Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan Nodemcu Esp32," *Jurnal SAINTEKOM*, p., 2022, <https://doi.org/10.33020/saintekom.v12i1.223>.
- [11] M. Ridwan and K. M. Sari, "Penerapan IoT dalam Sistem Otomatisasi Kontrol Suhu, Kelembaban, dan Tingkat Keasaman Hidroponik," *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, p., 2021, <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v10i4.481-487>.
- [12] I. Fathurrahman, M. Saiful, and L. Samsu, "Penerapan Sistem Monitoring Hidroponik berbasis Internet of Things (IoT)," *ABSARA: Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat*, p., 2021, <https://doi.org/10.29408/ab.v2i2.4219>.
- [13] S. Fuada, E. Setyowati, G. I. Aulia, and D. W. Riani, "Narrative Review Pemanfaatan Internet of Things untuk Aplikasi Seed Monitoring and Management System pada Media Tanaman Hidroponik Di Indonesia," *INFOTECH journal*, p., 2023, <https://doi.org/10.31949/infotech.v9i1.4439>.
- [14] C.-H. Chen, S.-Y. Jeng, and C. Lin, "Fuzzy Logic Controller for Automating Electrical Conductivity and pH in Hydroponic Cultivation," *Applied Sciences*, p., 2021, <https://doi.org/10.3390/app12010405>.
- [15] R.-E. Precup, A. Nguyen, and S. Blažič, "A survey on fuzzy control for mechatronics applications," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 55, pp. 771–813, 2023, <https://doi.org/10.1080/00207721.2023.2293486>.
- [16] R. Hidayat, F. Idris, and J. Juhaeriyah, "A Comparative Analysis of Sugeno and Tsukamoto Fuzzy Logic for Temperature Stability in SCAMIS," *Protek : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 12, pp. 182–189, Sep. 2025, <https://doi.org/10.33387/protk.v12i3.10514>.
- [17] M. B. Nejad, S. Ghamari, and H. Mollae, "Adaptive neuro-fuzzy inference systems controller design on Buck converter," *The Journal of Engineering*, p., 2023, <https://doi.org/10.1049/tje2.12316>.
- [18] G. Sonugür, "Efficient speed control of DC motors: imitation learning with fuzzy logic expert systems," *Automatika*, vol. 66, pp. 306–320, 2025, <https://doi.org/10.1080/00051144.2025.2480425>.
- [19] T. A. Nguyen, T. M. Ngoc, T. T. H. Tran, T. Nguyen, and Q. Tran, "Self-learning adaptive neuro-fuzzy approximation of robust control behavior in electric power steering systems," *PLoS One*, vol. 20, p., 2025, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0334539>.
- [20] M. Ferdous, A. J. Al-Mahasneh, S. Anavatti, and J. Senthilnath, "A compact meta-learned neuro-fuzzy technique for noise-robust nonlinear control," *Appl. Soft Comput.*, vol. 166, p. 112149, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112149>.