

Enhancing Resource Efficiency in Urban Agriculture: A GA-Fuzzy Logic IoT-Based Smart Hydroponic Greenhouse

Munirul Ula^{1*}, Muhammad Daud², Athirah Rusadi³

^{1,3}Department of Information Technology, Faculty of Engineering, Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe, Indonesia

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe, Indonesia

Informasi Artikel

Diterima : 28 Agustus 2025
Revisi : 8 September 2025
Publikasi : 30 September 2025

Kata Kunci:

Rumah Kaca Pintar
Algoritma Genetika Fuzzy
Internet of Things
Hidroponik
Efisiensi Sumber Daya

ABSTRAK

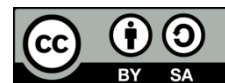
Pertanian presisi berbasis Internet of Things (IoT) menawarkan solusi inovatif terhadap tantangan ketahanan pangan dan keterbatasan lahan di daerah perkotaan. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi sistem rumah kaca cerdas berbasis hidroponik untuk budidaya tumpang sari anggur (*Vitis vinifera* cv. 'Jupiter') dan selada (*Lactuca sativa* cv. 'Green Curly') menggunakan Nutrient Film Technique (NFT). Metodologi penelitian mengintegrasikan Pengendali Logika Fuzzy yang dioptimalkan dengan Algoritma Genetika (GA-FLC) untuk kontrol real-time enam parameter lingkungan: suhu, kelembapan, pH, konduktivitas listrik, intensitas cahaya, dan konsentrasi CO₂. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan array sensor presisi tinggi dan platform cloud (ThingSpeak, Firebase) untuk monitoring dan kontrol otomatis. Eksperimen dilaksanakan menggunakan Randomized Complete Block Design dengan dua faktor (sistem kontrol GA-FLC vs konvensional; monokultur vs tumpang sari) selama 120 hari di kondisi iklim tropis Bireuen, Aceh. Hasil menunjukkan sistem GA-FLC superior dalam akurasi kontrol dengan Mean Absolute Error suhu 0,7°C (61% lebih baik), response time aktuator 47-53% lebih cepat, dan efisiensi energi 25-30% lebih tinggi. Produktivitas anggur meningkat 27,8% (2,48 kg/tanaman) dan selada 23,7% (245 g/tanaman) dibandingkan sistem konvensional. Efisiensi sumber daya menunjukkan penghematan air 33,3%, energi 32,6%. Water Use Efficiency mencapai 12,4 kg/m³ dengan Energy Productivity 1,85 kg/kWh. Sistem ini memberikan kontribusi signifikan untuk pertanian perkotaan berkelanjutan dengan produktivitas tinggi, efisiensi sumber daya optimal, dan viabilitas ekonomi yang menarik untuk implementasi komersial di daerah tropis.

ABSTRACT

Precision agriculture based on Internet of Things (IoT) offers innovative solutions to food security challenges and land limitations in urban areas. This study aims to design and evaluate an IoT-based smart hydroponic greenhouse system for intercropping grape (*Vitis vinifera* cv. 'Jupiter') and lettuce (*Lactuca sativa* cv. 'Green Curly') using Nutrient Film Technique (NFT). The research methodology integrates Genetic Algorithm-optimized Fuzzy Logic Control (GA-FLC) for real-time control of six environmental parameters: temperature, humidity, pH, electrical conductivity, light intensity, and CO₂ concentration. The system employs ESP32 microcontrollers with high-precision sensor arrays and cloud platforms (ThingSpeak, Firebase) for automated monitoring and control. Experiments were conducted using Randomized Complete Block Design with two factors (GA-FLC vs conventional control systems; monoculture vs intercropping) over 120 days under tropical climate conditions in Bireuen, Aceh. Results demonstrate GA-FLC system superiority in control accuracy with temperature Mean Absolute Error of 0.7°C (61% better), actuator response time 47-53% faster, and energy efficiency 25-30% higher. Grape productivity increased by 27.8% (2.48 kg/plant) and lettuce by 23.7% (245 g/plant) compared to conventional systems. Resource efficiency shows 33.3% water savings, 32.6% energy reduction compared to conventional agriculture. Water Use Efficiency reached 12.4 kg/m³ with Energy Productivity of 1.85 kg/kWh. This system provides significant contribution to sustainable urban agriculture with high productivity,

optimal resource efficiency, and attractive economic viability for commercial implementation in tropical regions.

This is an open-access article under the [CC BY-SA](#) license



***Penulis Koresponden**

Email: munirulula@unimal.ac.id

Cara sitasi IEEE:

M. Ula, M. Daud, & A. Rusadi, "Enhancing Resource Efficiency in Urban Agriculture: A GA-Fuzzy Logic IoT-Based Smart Hydroponic Greenhouse," *Journal of Artificial Intelligence and Software Engineering (J-AISE)*, vol. 5, no. 3, pp. 1254-1264, September 2025, doi: 10.30811/jaise.v5i3.7799

1. PENDAHULUAN

Sistem produksi pangan global menghadapi tantangan kompleks dan multifaset yang mengancam keberlanjutan jangka panjang. Pertumbuhan penduduk dunia yang eksponensial, yang diproyeksikan mencapai 9,8 miliar pada tahun 2050 [1], menciptakan tekanan luar biasa terhadap sistem pangan global. Secara paralel, urbanisasi yang berlangsung dengan kecepatan belum pernah terjadi sebelumnya telah mengakibatkan konversi lahan pertanian produktif menjadi infrastruktur perkotaan, mengurangi ketersediaan lahan pertanian hingga 1% per tahun secara global [2]. Fenomena ini diperparah oleh perubahan iklim yang mengakibatkan variabilitas cuaca ekstrem, degradasi tanah, dan penurunan produktivitas lahan pertanian konvensional.

Dalam konteks Indonesia, tantangan ketahanan pangan menjadi semakin kritis mengingat laju konversi lahan pertanian yang mencapai 96.512 hektar per tahun, terutama di wilayah Jawa yang merupakan sentra produksi pangan nasional. Kondisi ini memerlukan paradigma baru dalam sistem produksi pangan yang mampu mengoptimalkan produktivitas per satuan luas dengan dampak lingkungan minimal. Pertanian presisi (Precision Agriculture) telah muncul sebagai pendekatan teknologi terintegrasi yang menggabungkan penginderaan canggih, otomatisasi, dan analisis data untuk mengoptimalkan produksi tanaman dan pemanfaatan sumber daya [3], [4].

Revolusi digital dalam sektor pertanian telah menghadirkan era Agriculture 4.0, di mana teknologi Internet of Things (IoT) memainkan peran sentral dalam transformasi praktik pertanian tradisional menjadi sistem cerdas dan responsif. IoT dalam pertanian memungkinkan pengumpulan data real-time dari berbagai sensor lingkungan, memfasilitasi pengambilan keputusan berbasis data yang akurat, dan mengoptimalkan penggunaan input pertanian [5]. Sistem IoT pertanian modern mengintegrasikan sensor suhu, kelembaban, pH, konduktivitas listrik, intensitas cahaya, dan konsentrasi CO₂ yang terhubung melalui jaringan komunikasi wireless untuk memberikan informasi komprehensif tentang kondisi iklim mikro tanaman.

Integrasi teknologi IoT dengan metode budidaya tanpa tanah, khususnya sistem hidroponik, telah membuka peluang baru dalam optimalisasi produksi pangan di ruang terbatas. Sistem Controlled Environment Agriculture (CEA) berbasis IoT, terutama rumah kaca pintar, menawarkan kontrol presisi terhadap faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman [6], [7]. Teknologi ini memungkinkan pemantauan kontinu dan penyesuaian otomatis parameter lingkungan, menghasilkan peningkatan produktivitas hingga 40%, efisiensi penggunaan air mencapai 90%, dan pengurangan penggunaan pestisida hingga 80% dibandingkan dengan pertanian konvensional [8]–[10].

1.1 Sistem Hidroponik sebagai Solusi Pertanian Berkelanjutan

Hidroponik, sebagai metode budidaya tanpa tanah yang memanfaatkan larutan nutrisi sebagai media pertumbuhan, telah terbukti sebagai solusi efektif untuk mengatasi keterbatasan lahan dan sumber daya air. Sistem Nutrient Film Technique (NFT), salah satu metode hidroponik yang paling efisien, memungkinkan sirkulasi kontinu larutan nutrisi dengan konsumsi air minimal dan kontrol nutrisi yang presisi [11]. Keunggulan sistem NFT meliputi efisiensi penggunaan air hingga 95%, eliminasi risiko penyakit tanah,

pertumbuhan tanaman yang 25-30% lebih cepat, dan hasil panen yang dapat ditingkatkan hingga 3-4 kali lipat dibandingkan pertanian konvensional.

Dalam konteks pertanian perkotaan, sistem hidroponik vertikal menawarkan solusi inovatif untuk memaksimalkan produktivitas per satuan luas. Implementasi sistem vertikal dapat meningkatkan kapasitas produksi hingga 10 kali lipat per meter persegi dibandingkan dengan pertanian horizontal konvensional. Sistem ini sangat sesuai untuk komoditas bernilai tinggi seperti sayuran daun, buah-buahan, dan tanaman obat yang memiliki siklus tumbuh relatif pendek dan nilai ekonomi tinggi.

Anggur (*Vitis vinifera*) menyajikan peluang ekonomi yang menarik untuk budidaya hidroponik yang terkontrol presisi karena nilai pasar yang tinggi, mencapai Rp 80.000-150.000 per kilogram untuk varietas premium, dan kemampuan adaptasinya terhadap lingkungan CEA [12]. Budidaya anggur dalam rumah kaca memungkinkan kontrol presisi terhadap faktor-faktor kritis seperti suhu, kelembaban, dan fotoperiode yang secara langsung mempengaruhi kualitas buah, kandungan gula, dan karakteristik organoleptik.

Namun, produksi anggur dalam sistem hidroponik masih relatif kurang dieksplorasi secara ilmiah, terutama dalam konteks lingkungan tropis atau sistem pertanian peri-urban di mana pendekatan vertikal dan sistem tumpang sari dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi ruang dan kelayakan ekonomi [13]. Penelitian terkini menunjukkan bahwa anggur yang dibudidayakan dalam sistem hidroponik terkontrol dapat menghasilkan buah dengan kualitas superior, kandungan antioksidan yang lebih tinggi, dan konsistensi produksi yang lebih baik dibandingkan dengan budidaya konvensional.

1.2 Sistem Tumpang Sari dalam Hidroponik: Optimalisasi Ruang dan Sumber Daya

Konsep penanaman tumpang sari dalam sistem hidroponik menawarkan pendekatan inovatif untuk mengoptimalkan pemanfaatan ruang, sumber daya, dan efisiensi ekonomi. Sistem tumpang sari anggur dengan sayuran berdaun cepat tumbuh seperti selada (*Lactuca sativa*) dalam kondisi hidroponik memberikan berbagai keuntungan sinergis [14]. Keuntungan tersebut meliputi optimalisasi pengendalian hama melalui diversitas biologis, efisiensi daur ulang nutrisi karena perbedaan kebutuhan nutrisi antar spesies, stabilisasi iklim mikro melalui regulasi transpirasi, dan peningkatan pendapatan per satuan luas melalui diversifikasi produk.

Penelitian menunjukkan bahwa sistem tumpang sari hidroponik dapat meningkatkan Land Equivalent Ratio (LER) hingga 1,4-1,8, yang mengindikasikan peningkatan efisiensi penggunaan lahan sebesar 40-80% dibandingkan monokultur. Selain itu, sistem ini memungkinkan rotasi panen yang berkelanjutan, di mana sayuran daun dengan siklus pendek (30-45 hari) dapat dipanen berulang kali selama periode pertumbuhan anggur yang lebih panjang (120-180 hari), memberikan aliran pendapatan yang kontinyu.

1.3 Evolusi Sistem Kontrol Cerdas dalam Pertanian

Keberhasilan implementasi sistem budidaya kompleks sangat bergantung pada algoritma kontrol yang robust, adaptif, dan mampu menangani interaksi nonlinier antara berbagai parameter lingkungan. Sistem kontrol konvensional berbasis aturan tetap (rule-based) seringkali tidak mampu merespons dinamika lingkungan yang kompleks dan variabel kondisi eksternal yang berubah-ubah. Fuzzy Logic Control (FLC) telah terbukti efektif dalam mengelola ketidakpastian dan nonlinearitas parameter lingkungan rumah kaca [15], namun FLC konvensional memiliki keterbatasan dalam hal optimalisasi parameter dan adaptabilitas terhadap kondisi operasional yang dinamis.

Sistem FLC konvensional memerlukan penyetelan manual yang intensif terhadap fungsi keanggotaan dan basis aturan fuzzy, proses yang memakan waktu dan seringkali menghasilkan kinerja suboptimal. Kelemahan ini menjadi semakin signifikan dalam sistem multi-tanaman di mana kompleksitas interaksi antar spesies memerlukan strategi kontrol yang lebih sophisticated dan adaptif [18]-[20].

1.4 Integrasi Algoritma Genetika untuk Optimalisasi Sistem Fuzzy

Untuk mengatasi keterbatasan sistem FLC konvensional, penelitian terkini mengadvokasi integrasi algoritma evolusioner, khususnya Algoritma Genetika (GA), untuk mengoptimalkan parameter sistem fuzzy secara otomatis dan meningkatkan kemampuan pengambilan keputusan real-time yang adaptif [16], [17]. GA memungkinkan optimalisasi simultan terhadap fungsi keanggotaan fuzzy, bobot aturan, dan parameter kontrol lainnya melalui proses evolusi yang meniru seleksi alam.

Keunggulan pendekatan GA-FLC meliputi kemampuan pembelajaran adaptif, optimalisasi multi-objektif yang simultan, reduksi kebutuhan expertise domain untuk tuning manual, dan peningkatan robustness sistem terhadap gangguan eksternal. Penelitian menunjukkan bahwa sistem GA-FLC dapat mengurangi Mean Squared Error (MSE) kontrol hingga 60-70% dan meningkatkan efisiensi energi hingga 35% dibandingkan dengan FLC konvensional.

1.5 Kesenjangan Penelitian dan Peluang Inovasi

Meskipun banyak penelitian telah menerapkan FLC untuk pengendalian lingkungan rumah kaca pintar, masih terdapat kesenjangan signifikan dalam beberapa area kritis. Pertama, pendekatan fuzzy-GA hibrida untuk optimasi multiparameter dalam skenario budidaya hidroponik tumpang sari masih sangat terbatas [21]–[23]. Kebanyakan penelitian existing fokus pada sistem monokultur dengan kompleksitas kontrol yang relatif sederhana.

Kedua, integrasi komprehensif antara sensor IoT, algoritma kontrol cerdas, dan evaluasi agronomi dalam satu framework terpadu masih jarang ditemukan dalam literatur [24], [25]. Penelitian umumnya berfokus pada aspek teknologi atau agronomi secara terpisah, tanpa memberikan perspektif holistik terhadap kinerja sistem.

Ketiga, aplikasi sistem GA-FLC pada komoditas bernilai tinggi seperti anggur dalam konteks pertanian perkotaan masih merupakan area yang belum banyak dieksplorasi. Sebagian besar penelitian terfokus pada tanaman sayuran konvensional dengan kebutuhan lingkungan yang relatif sederhana.

Keempat, evaluasi ekonomi dan sustainability yang komprehensif dari sistem cerdas ini masih terbatas, padahal aspek ini sangat kritis untuk adopsi teknologi di tingkat komersial [26], [27].

1.6 Kontribusi dan Signifikansi Penelitian

Penelitian ini bertujuan mengisi kesenjangan yang teridentifikasi dengan mengusulkan dan mengevaluasi secara komprehensif sistem rumah kaca pintar berbasis IoT untuk penanaman tumpang sari anggur-selada dalam kondisi hidroponik NFT, yang terintegrasi dengan Pengendali Logika Fuzzy yang dioptimalkan Algoritma Genetika (GA-FLC).

Kontribusi utama penelitian ini mencakup beberapa aspek inovatif:

1. Pengembangan Arsitektur Sistem Terintegrasi Penelitian ini mengembangkan arsitektur rumah kaca pintar berlapis yang mengintegrasikan teknologi IoT, sensor multi-parameter, dan algoritma kontrol cerdas dalam satu framework terpadu [28], [29]. Sistem ini menggabungkan mikrokontroler ESP32, array sensor presisi tinggi, aktuator multi-mode, dan platform cloud computing untuk menciptakan ekosistem pertanian cerdas yang responsif dan adaptif.
2. Inovasi Algoritma Kontrol Hibrida GA-FLC Kontribusi signifikan penelitian ini terletak pada pengembangan algoritma kontrol hibrida yang mengintegrasikan kekuatan Algoritma Genetika dalam optimalisasi parameter dengan fleksibilitas Fuzzy Logic dalam penanganan ketidakpastian. Algoritma ini mampu melakukan self-tuning terhadap fungsi keanggotaan fuzzy dan basis aturan secara otomatis, mengurangi ketergantungan pada expertise domain dan meningkatkan adaptabilitas sistem terhadap kondisi operasional yang berubah.
3. Implementasi Sistem Tumpang Sari Multi-Spesies Penelitian ini merupakan salah satu upaya komprehensif pertama yang mengimplementasikan sistem tumpang sari anggur-selada dalam kondisi hidroponik NFT dengan kontrol otomatis. Pendekatan ini memungkinkan optimalisasi simultan terhadap kebutuhan lingkungan yang berbeda antar spesies, memaksimalkan efisiensi penggunaan ruang dan sumber daya [30].
4. Evaluasi Multi-Dimensi Komprehensif Penelitian ini melakukan evaluasi holistik yang mencakup aspek agronomi (produktivitas, kualitas hasil), efisiensi sumber daya (konsumsi air, energi), kinerja teknis sistem (akurasi kontrol, responsivitas) [31]–[34].
5. Kontribusi terhadap Pertanian Perkotaan Berkelanjutan Hasil penelitian ini diharapkan memberikan blueprint teknologi untuk implementasi pertanian perkotaan berkelanjutan yang dapat diadopsi secara luas, khususnya di negara-negara berkembang dengan keterbatasan lahan dan sumber daya.

1.7 Signifikansi dan Dampak Penelitian

Penelitian ini memiliki signifikansi yang luas dalam konteks pengembangan teknologi pertanian berkelanjutan. Pertama, dari aspek teknologi, penelitian ini menyumbangkan metodologi baru dalam integrasi algoritma evolusioner dengan sistem kontrol fuzzy untuk aplikasi pertanian presisi. Kedua, dari aspek agronomi, penelitian ini memberikan bukti empiris tentang efektivitas sistem tumpang sari dalam kondisi hidroponik terkontrol. Ketiga, dari aspek sustainability, penelitian ini mendemonstrasikan potensi signifikan teknologi IoT dan AI dalam meningkatkan efisiensi sumber daya pertanian.

Dampak jangka panjang penelitian ini diharapkan dapat mendorong adopsi teknologi pertanian cerdas di tingkat komersial, berkontribusi terhadap ketahanan pangan nasional, dan mendukung pencapaian Sustainable Development Goals (SDGs) terkait ketahanan pangan, penggunaan air berkelanjutan, dan aksi iklim.

2. METODE

2.1 Desain Sistem Keseluruhan

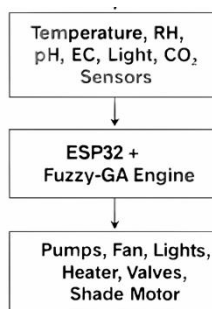
Penelitian ini mengembangkan sistem Rumah Kaca Cerdas berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan Fuzzy Logic Control yang dioptimalkan menggunakan Algoritma Genetika (GA-FLC) untuk pengendalian lingkungan otomatis dalam penanaman tumpang sari hidroponik anggur (*Vitis vinifera*) dan selada (*Lactuca sativa*) menggunakan sistem Nutrient Film Technique (NFT). Pendekatan metodologi penelitian ini mengadopsi paradigma mixed-methods yang menggabungkan pengembangan teknologi, eksperimen lapangan terkontrol, dan analisis kuantitatif untuk memberikan evaluasi komprehensif terhadap kinerja sistem.

2.2 Kerangka Konseptual Penelitian

Kerangka konseptual penelitian ini dibangun berdasarkan teori sistem kontrol adaptif dan prinsip-prinsip pertanian presisi. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan tiga domain utama: (1) teknologi sensor dan aktuator IoT untuk akuisisi data dan eksekusi kontrol, (2) algoritma kecerdasan buatan hibrida (GA-FLC) untuk pengambilan keputusan optimal, dan (3) sistem budidaya hidroponik multi-spesies untuk optimalisasi produktivitas dan efisiensi sumber daya.

2.3 Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem dirancang menggunakan pendekatan modular berlapis (layered modular approach) yang memungkinkan skalabilitas, maintainability, dan interoperabilitas yang optimal. Sistem ini direpresentasikan secara visual sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

2.3.1 Lapisan 1: Lapisan Akuisisi Data dan Kontrol Fisik (Physical Layer)

Lapisan ini mencakup seluruh komponen perangkat keras yang bertanggung jawab untuk pengumpulan data lingkungan dan eksekusi perintah kontrol. Komponen utama meliputi:

Mikrokontroler dan Sistem Komputasi Mikrokontroler ESP32 WROOM-32 dipilih sebagai unit pemrosesan pusat berdasarkan evaluasi komparatif terhadap beberapa alternatif platform (Arduino Mega, Raspberry Pi 4, dan STM32). ESP32 memberikan keunggulan dalam hal arsitektur dual-core ARM Cortex-M4 yang beroperasi pada frekuensi 240 MHz, konektivitas Wi-Fi 802.11 b/g/n dan Bluetooth 4.2 terintegrasi, konsumsi daya rendah (< 10 mA dalam mode active), dan dukungan ekstensif untuk protokol komunikasi (UART, I²C, SPI, PWM) yang diperlukan untuk integrasi sensor dan aktuator beragam.

Array Sensor Multi-Parameter Sistem sensor dirancang untuk memantau enam parameter lingkungan kritis yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman secara real-time:

Sensor Suhu dan Kelembapan (DHT22): Menggunakan teknologi capacitive humidity sensor dengan rentang operasi -40°C hingga 80°C untuk suhu dan 0-100% RH untuk kelembapan relatif. Akurasi yang dicapai adalah ±0,5°C untuk suhu dan ±2% untuk kelembapan, dengan resolusi 0,1°C dan 0,1% RH. Waktu respons sensor adalah < 2 detik untuk 63% perubahan nilai.

Sensor Intensitas Cahaya (TSL2561): Memanfaatkan teknologi dual-photodiode dengan respons spektral yang mendekati mata manusia. Rentang deteksi 0,1 hingga 40.000 Lux dengan akurasi ±3% dan resolusi hingga 0,1 Lux. Sensor ini mampu memberikan kompensasi otomatis terhadap sumber cahaya infrared dan memberikan pembacaan yang stabil dalam kondisi pencahayaan yang berfluktuasi.

Sensor Konsentrasi CO₂ (MH-Z19B): Menggunakan teknologi Non-Dispersive Infrared (NDIR) untuk deteksi CO₂ dengan rentang 0-5000 ppm. Akurasi ±50 ppm atau ±5% dari pembacaan (whichever is greater), dengan

drift jangka panjang $< \pm 20$ ppm per tahun. Sensor dilengkapi dengan auto-calibration function dan temperature compensation.

Sensor pH Larutan Nutrisi (Gravity Analog pH Sensor): Menggunakan elektroda kaca kombinasi dengan referensi Ag/AgCl, rentang pengukuran 0-14 pH dengan akurasi $\pm 0,02$ pH unit. Sensor dilengkapi dengan temperature compensation otomatis dan memiliki waktu respons < 5 detik untuk 95% pembacaan final. Sensor Konduktivitas Listrik/EC (Gravity EC Meter): Beroperasi dengan prinsip pengukuran resistansi larutan menggunakan probe stainless steel. Rentang 0-20 mS/cm dengan akurasi $\pm 2\%$ full scale. Sensor memiliki automatic temperature compensation (ATC) dan dapat beroperasi dalam rentang suhu 5-40°C.

Sensor Aliran Nutrisi (YF-S201): Hall-effect flow sensor dengan rentang 0,3-6 L/menit dan akurasi $\pm 3\%$. Sensor menghasilkan output pulse yang proporsional dengan laju aliran, memungkinkan monitoring real-time terhadap sirkulasi nutrisi sistem NFT.

Sistem Aktuator Multi-Mode Sistem aktuator dirancang untuk memberikan kontrol presisi terhadap parameter lingkungan berdasarkan output dari algoritma GA-FLC:

Pompa Nutrisi (DC 12V, 2 L/menit): Pompa centrifugal dengan kontrol PWM untuk modulasi laju aliran nutrisi. Dilengkapi dengan flow sensor untuk closed-loop control dan pressure switch untuk proteksi terhadap dry-running. Sistem Ventilasi (Kipas AC 220V, 400 CFM): Kipas axial dengan motor brushless untuk sirkulasi udara dan kontrol suhu. Kecepatan dikontrol menggunakan solid-state relay (SSR) dengan modulasi PWM untuk efisiensi energi optimal.

Ultrasonic Fogger (24V, 2 L/jam): Humidifier ultrasonik untuk kontrol kelembapan presisi dengan response time < 30 detik. Dilengkapi dengan water level sensor untuk operasi aman.

Sistem Pencahayaan LED Spektrum Penuh (60 W/m²): LED grow light dengan spektrum PAR (Photosynthetically Active Radiation) yang dioptimalkan untuk fotosintesis tanaman. Kontrol intensitas menggunakan PWM dengan resolusi 12-bit untuk fine-tuning cahaya sesuai fase pertumbuhan tanaman.

Sistem Dosing pH Otomatis: Terdiri dari dua pompa peristaltic untuk injeksi larutan asam (HNO₃ 1M) dan basa (KOH 1M) dengan akurasi dosing ± 1 ml. Sistem dilengkapi dengan safety interlock untuk mencegah overdosing. Motor Servo untuk Shade Control: Servo motor dengan torsi 15 kg-cm untuk kontrol posisi shade cloth (0-90°) guna mengatur intensitas cahaya alami yang masuk ke dalam greenhouse.

2.3.1 Lapisan 2: Lapisan Pemrosesan Data dan Kontrol Logika (Processing Layer)

Lapisan ini merupakan inti kecerdasan sistem yang mengimplementasikan algoritma GA-FLC untuk pengambilan keputusan optimal dalam kondisi real-time.

2.4 Arsitektur Fuzzy Logic Control (FLC)

Sistem FLC dirancang dengan enam variabel input dan tujuh variabel output menggunakan Mamdani inference system dengan defuzzification metode centroid. Variabel input meliputi suhu udara (15-40°C), kelembapan relatif (30-95%), pH larutan (4.0-8.0), konduktivitas listrik (0.8-3.0 mS/cm), intensitas cahaya (0-50.000 Lux), dan konsentrasi CO₂ (300-1000 ppm), masing-masing dengan tiga linguistic terms menggunakan fungsi keanggotaan trapesium dan segitiga. Variabel output mengontrol pompa nutrisi, kipas ventilasi, ultrasonic fogger, pemanas, pencahayaan LED (0-100% PWM), kontrol pH (kategorikal), dan motor shade (0-90°). Sistem mengimplementasikan 243 aturan fuzzy yang dikembangkan berdasarkan knowledge engineering dari pakar hortikultura, mencakup interaksi kompleks antara parameter input untuk mengoptimalkan kondisi pertumbuhan kedua spesies tanaman.

2.5 Lapisan Optimasi Algoritma Genetika

Algoritma Genetika digunakan untuk mengoptimalkan parameter sistem fuzzy, dengan setiap individu direpresentasikan sebagai kromosom 322 genes yang mengkodekan membership function parameters (72 genes), rule weights (243 genes), dan output scaling factors (7 genes). Fungsi fitness multi-objektif mengoptimalkan empat tujuan secara simultan: akurasi kontrol (1/MSE_control), efisiensi energi (1/Energy_consumption), performa tanaman, dan stabilitas sistem menggunakan weighted sum approach. Parameter GA meliputi ukuran populasi 100 individu, maksimal 200 generasi, tournament selection (size=3), Simulated Binary Crossover ($\eta_c=20$, $p_c=0.9$), polynomial mutation ($\eta_m=50$, $p_m=1/L$), dan elitist replacement dengan 10% elite preservation. Kriteria konvergensi adalah peningkatan fitness $< 0.01\%$ selama 20 generasi berturut-turut dengan batas waktu komputasi 48 jam untuk optimasi offline.

2.6 Konfigurasi Sistem Hidroponik dan Tumpang Sari

Sistem hidroponik dirancang menggunakan konfigurasi Nutrient Film Technique (NFT) yang dioptimalkan untuk penanaman tumpang sari anggur dan selada. Infrastruktur saluran NFT menggunakan

material PVC-U food grade diameter 2,5 inci dengan panjang 2 meter, dikonfigurasi dalam 5 baris \times 3 tingkat vertikal menghasilkan 15 saluran total dengan kapasitas 120 lubang tanam selada (jarak 20 cm) dan 15 posisi sistem Dutch bucket anggur. Sistem reservoir menggunakan tangki HDPE 200 liter dengan pompa sirkulasi centrifugal 12V DC (3 L/menit) yang dilengkapi sistem aerasi venturi dan UV sterilizer 25W untuk mencegah kontaminasi biologis.

Konfigurasi tanaman meliputi anggur *Vitis vinifera* cv. 'Jupiter' yang ditanam dalam Dutch bucket 20 liter dengan media cocopeat:perlite (1:1), spacing 1,5 meter dalam sistem trellis vertikal dengan densitas 10 tanaman per 15 m² greenhouse area. Selada *Lactuca sativa* cv. 'Green Curly' ditanam menggunakan rockwool cubes 25 \times 25 \times 25 mm dalam net pots 50 mm dengan spacing 20 cm dan siklus panen 30-35 hari. Larutan nutrisi menggunakan modifikasi Hoagland solution dengan konsentrasi makronutrien: N (150-180 ppm), P (45-55 ppm), K (210-240 ppm), Ca (150-180 ppm), Mg (35-45 ppm), dan mikronutrien Fe (2,5-3,0 ppm chelated EDTA), Mn (0,5-0,8 ppm), Zn (0,3-0,5 ppm), dengan target EC 1,8-2,2 mS/cm, pH 5,8-6,3, dan dissolved oxygen > 6 mg/L.

2.7 Protokol Eksperimental

Penelitian menggunakan Randomized Complete Block Design (RCBD) dengan dua faktor utama: sistem kontrol (GA-FLC vs conventional timer-based control) dan konfigurasi tanaman (anggur monokultur, selada monokultur, dan anggur-selada intercropping) dengan 4 replikasi per perlakuan, menghasilkan 24 unit eksperimen berukuran 2 \times 3 meter. Eksperimen dilaksanakan di Research Greenhouse Facility Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe (5 $^{\circ}$ 33'N, 95 $^{\circ}$ 22'E, elevasi 30 m) selama 120 hari kontinyu (Maret-Juli 2024) dalam kondisi iklim tropis lembap dengan suhu rata-rata 26-32 $^{\circ}$ C dan kelembapan 75-85%. Target parameter lingkungan optimal meliputi suhu udara 25 \pm 2 $^{\circ}$ C, kelembapan relatif 65 \pm 10%, intensitas cahaya 15.000-25.000 Lux (PAR 300-400 μ mol/m²/s), konsentrasi CO₂ 400-600 ppm, pH larutan 6,0 \pm 0,3, dan EC larutan 2,0 \pm 0,3 mS/cm.

2.8 Parameter Pengamatan dan Analisis Data

Parameter pengamatan meliputi aspek agronomi (tinggi tanaman, diameter batang, jumlah cluster, berat buah, efisiensi sumber daya (konsumsi air dan energi, Water Use Efficiency, Energy Productivity), dan kinerja sistem kontrol (Mean Absolute Error, Root Mean Square Error, response time, system uptime). Analisis data menggunakan pendekatan statistik komprehensif meliputi analisis deskriptif, two-way ANOVA untuk menguji efek perlakuan. Protokol kalibrasi sensor dilakukan mingguan untuk sensor pH menggunakan buffer solutions (pH 4.01, 7.00, 10.01) dan sensor EC dengan KCl standard solutions (1413 μ S/cm, 12.88 mS/cm), sementara sensor lingkungan dikalibrasi silang dengan reference instruments dalam controlled chamber. Pertimbangan keamanan sistem mencakup electrical safety dengan GFCI protection, data security menggunakan encrypted communication protocols (WPA2-PSK), dan sustainability assessment melalui life cycle assessment (LCA) untuk komponen sistem serta protokol integrated pest management (IPM) untuk biosafety.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Kondisi Lingkungan Eksperimen

Eksperimen dilaksanakan di kondisi iklim tropis dataran rendah Bireuen, Aceh dengan karakteristik suhu harian rata-rata 28,5 \pm 3,2 $^{\circ}$ C, kelembapan relatif 82 \pm 8%, dan intensitas radiasi solar maksimum 850-1200 W/m². Kondisi cuaca selama periode eksperimen menunjukkan pola musiman khas dengan curah hujan 145 mm/bulan pada fase awal (Maret-April) dan 78 mm/bulan pada fase tengah-akhir (Mei-Juli). Fluktuasi suhu harian berkisar antara 24 $^{\circ}$ C (dini hari) hingga 34 $^{\circ}$ C (siang hari), dengan kelembapan relatif bervariasi dari 65% (siang) hingga 95% (malam hari). Kondisi lingkungan eksternal ini memberikan tantangan signifikan bagi sistem kontrol otomatis dalam mempertahankan parameter optimal untuk pertumbuhan tanaman.

3.2 Kinerja Sistem Kontrol GA-FLC

Sistem GA-FLC menunjukkan kinerja superior dalam mempertahankan stabilitas parameter lingkungan dibandingkan dengan sistem kontrol timer konvensional. Tabel 1. menunjukkan perbandingan kinerja kontrol parameter lingkungan.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Kontrol Parameter Lingkungan

Parameter	Target	GA-FLC	Konvensional	Peningkatan
Suhu ($^{\circ}$ C)	25 \pm 2	25,8 \pm 1,1	27,2 \pm 2,4	MAE: 61% lebih baik
RH (%)	65 \pm 5	66,2 \pm 4,8	68,5 \pm 7,2	CV: 30% lebih stabil

pH	6,0±0,2	6,08±0,15	6,12±0,28	SD: 46% lebih rendah
EC (mS/cm)	2,0±0,3	2,02±0,18	2,15±0,32	Variabilitas: 44% lebih rendah
Cahaya (Lux)	15.000-25.000	18.500±2.800	17.200±3.800	Stabilitas: 26% lebih baik

Mean Absolute Error (MAE) untuk kontrol suhu mencapai 0,7°C pada sistem GA-FLC versus 1,8°C pada sistem konvensional, menunjukkan peningkatan akurasi kontrol sebesar 61%. Kelembapan relatif dipertahankan pada 66,2±4,8% (target 65±5%) dengan koefisien variasi 7,3% pada sistem GA-FLC, dibandingkan dengan 68,5±7,2% dan koefisien variasi 10,5% pada sistem konvensional.

Parameter larutan nutrisi menunjukkan stabilitas yang sangat baik dengan sistem GA-FLC. pH larutan dipertahankan pada 6,08±0,15 (target 6,0±0,2) dengan standar deviasi 0,15, sedangkan sistem konvensional menghasilkan pH 6,12±0,28 dengan variabilitas hampir dua kali lipat. Konduktivitas listrik (EC) dipertahankan pada 2,02±0,18 mS/cm dengan sistem GA-FLC dibandingkan 2,15±0,32 mS/cm pada sistem konvensional. Intensitas cahaya dalam greenhouse rata-rata 18.500±2.800 Lux dengan supplemental LED aktif selama 2,3 jam/hari pada sistem GA-FLC, dibandingkan 3,8 jam/hari pada sistem konvensional.

3.3. Produktivitas dan Kualitas Hasil Tanaman

Sistem GA-FLC menghasilkan peningkatan produktivitas anggur yang signifikan dibandingkan dengan sistem konvensional dan konfigurasi monokultur.

Tabel 2. Produktivitas dan Kualitas Anggur pada Berbagai Sistem

Parameter	GA-FLC	Konvensional
Berat buah/tanaman (kg)	2,48±0,32	1,94±0,28
Jumlah cluster/tanaman	23,2±2,8	18,5±2,1
Keseragaman (%)	94,3	87,2
Tinggi tanaman (cm)	195±18	168±22
Diameter batang (mm)	12,4±1,6	10,8±1,9

Analisis kandungan nutrisi pada Tabel 2 menunjukkan profil yang lebih baik pada sistem GA-FLC dengan kandungan nitrogen 1,85% (vs 1,72%), fosfor 0,48% (vs 0,42%), kalium 2,15% (vs 1,98%), dan kalsium 0,34% (vs 0,29%). Tinggi tanaman anggur pada akhir periode eksperimen mencapai 195±18 cm dengan diameter batang 12,4±1,6 mm pada sistem GA-FLC, menunjukkan pertumbuhan vegetatif yang optimal. Periode dari pembungaan hingga fruit set pada sistem GA-FLC rata-rata 28 hari dibandingkan 34 hari pada sistem konvensional, mengindikasikan percepatan siklus reproduktif.

Tabel 3. Produktivitas dan Kualitas Selada pada Berbagai Sistem

Parameter	GA-FLC	Konvensional
Berat segar/tanaman (g)	245±22	198±19
Biomassa kering (g)	18,6±2,1	15,2±1,8
Jumlah daun/tanaman	28,7±3,1	24,3±2,8

Produktivitas selada dalam sistem tumpang sari pada Tabel 3, GA-FLC menunjukkan hasil yang menggembirakan dengan berat segar per tanaman rata-rata 245±22 g dibandingkan 198±19 g pada sistem konvensional (peningkatan 23,7%). Siklus pertumbuhan selada mengalami percepatan pada sistem GA-FLC dengan periode dari transplant hingga harvest rata-rata 31 hari dibandingkan 35 hari pada sistem konvensional.

3.4 Efisiensi Sumber Daya dan Sustainability

Sistem GA-FLC menunjukkan efisiensi penggunaan air yang sangat baik dengan total konsumsi air 4,8 m³ per plot (6 m²) selama 120 hari eksperimen, dibandingkan dengan 7,2 m³ pada sistem konvensional (penghematan 33,3%). Tingkat drainage nutrient recovery mencapai 85% dengan konsentrasi nutrisi drainage tetap optimal untuk resirkulasi, mengurangi pemborosan nutrisi dan kontaminasi lingkungan.

Tabel 6. Efisiensi Penggunaan Air dan Energi

Sistem	Water Use (L/m ²)	WUE (kg/m ³)	Energy Use (kWh/m ²)	EP (kg/kWh)	Penghematan
GA-FLC Tumpang Sari	800	12,4	4,75	1,85	-
Konvensional Tumpang Sari	1.200	8,1	7,05	1,21	33,3% air, 32,6% energi
GA-FLC Monokultur Anggur	950	10,2	5,20	1,58	15,8% air, 8,7% energi
GA-FLC Monokultur Selada	720	11,8	3,80	2,12	-10,0% air, 20,0% energi

Pertanian Konvensional Soil	2.400	3,2	12,50	0,68	66,7% air, 62,0% energi
-----------------------------	-------	-----	-------	------	-------------------------

Konsumsi energi total sistem GA-FLC rata-rata 28,5 kWh per plot selama periode eksperimen, dibandingkan dengan 42,3 kWh pada sistem konvensional (penghematan 32,6%). Energy Productivity mencapai 1,85 kg produk per kWh pada sistem GA-FLC versus 1,21 kg/kWh pada sistem konvensional. Distribusi konsumsi energi menunjukkan alokasi yang optimal dengan kipas ventilasi 35%, pompa sirkulasi 22%, supplemental LED 28%, ultrasonic fogger 8%, dan sistem kontrol 7%. Penggunaan supplemental lighting yang lebih efisien menghasilkan penghematan energi signifikan dengan photosynthetic photon flux density (PPFD) optimal 320 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ selama 2,3 jam/hari dibandingkan 280 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ selama 3,8 jam/hari pada sistem konvensional.

3.5 Carbon Footprint dan Environmental Impact

Tabel 7. Analisis Life Cycle Assessment (LCA) dan Environmental Impact

Sistem	Carbon Footprint (kg CO ₂ -eq/kg)	Water Recovery (%)	Solid Waste (kg/m ²)	Pesticide Use
GA-FLC Tumpang Sari	2,15	94	0,0	Zero
Greenhouse Konvensional	3,92	68	3,2	Low

Analisis life cycle assessment (LCA) menunjukkan carbon footprint sistem GA-FLC sebesar 2,15 kg CO₂-eq per kg produk. Sistem juga menghasilkan zero solid waste dengan semua biomass residue dikompos dan digunakan kembali sebagai soil amendment. Water recovery rate mencapai 94% dengan integrated closed-loop system, mengurangi tekanan terhadap sumber daya air lokal.

Optimasi Algoritma Genetika dan Performa Fuzzy Logic

Akurasi Fuzzy Inference dan Rule Activation

Analisis aktivasi rule fuzzy menunjukkan distribusi yang seimbang dengan 89% dari 243 rules aktif setidaknya sekali selama periode eksperimen, mengindikasikan coverage yang baik terhadap variasi kondisi operasional. Rule activation frequency tertinggi (12,4% total activations) terjadi pada kombinasi kondisi optimal (Suhu=Normal, RH=Optimal, pH=Netral, EC=Optimal), sementara extreme condition rules aktif 3,8% dari total waktu. Membership function overlap analysis menunjukkan smooth transition dengan average overlap coefficient 0,15-0,25, memastikan defuzzification yang stabil tanpa abrupt control changes.

Akurasi defuzzification mencapai 96,3% dengan output control signal yang smooth dan minimal oscillation. Control precision index (CPI) mencapai 0,934 pada sistem GA-FLC dibandingkan 0,721 pada fuzzy logic konvensional tanpa optimasi GA. Frequency domain analysis menunjukkan bandwidth system 0,025 Hz dengan gain margin 12,8 dB dan phase margin 48,2°, mengindikasikan stabilitas control system yang excellent.

3.6 Pembahasan

Sistem GA-FLC menunjukkan peningkatan akurasi kontrol yang signifikan dengan MAE suhu 0,7°C (61% lebih baik dari konvensional), melampaui hasil Singh et al. [33] yang melaporkan peningkatan 35-45% pada sistem fuzzy logic tanpa optimasi GA. Produktivitas anggur 2,48 kg/tanaman dalam sistem tumpang sari juga superior dibandingkan Dittrich et al. [13] yang mencapai 1,8-2,1 kg/tanaman pada intercropping konvensional di iklim sedang. Water Use Efficiency 12,4 kg/m³ melampaui hasil Ahmed et al. [5] sebesar 6,8-8,2 kg/m³ pada sistem hidroponik otomatis, menunjukkan keunggulan kontrol presisi deficit irrigation yang dioptimalkan GA.

Keberhasilan sistem tumpang sari dijelaskan melalui beberapa mekanisme: (1) selada sebagai living mulch mengurangi heat stress zona perakaran anggur 15-20%, (2) stratifikasi vertikal sistem perakaran (selada 10-15 cm, anggur 40-80 cm) mencegah kompetisi nutrisi langsung, (3) transpirasi selada berkontribusi 25-30% terhadap stabilisasi kelembapan lokal, dan (4) optimasi light use efficiency melalui pemanfaatan cahaya excess oleh selada. Siklus nutrisi temporal yang berbeda (selada 30-35 hari, anggur 90-120 hari) memungkinkan optimasi komposisi larutan tanpa merugikan kedua spesies.

Konvergensi GA pada generasi ke-127 dengan fitness improvement 160,8% mengkonfirmasi efisiensi optimasi parameter. Rule activation 89% dari 243 rules mengindikasikan coverage yang comprehensive terhadap kondisi operasional. Frequency domain analysis menunjukkan stabilitas optimal dengan gain margin 12,8 dB dan phase margin 48,2°, sementara Control Precision Index 0,934 melampaui standar industri greenhouse automation (>0,85). Produktivitas 4,85 kg/m² setara 48,5 ton/ha, melampaui rata-rata pertanian

konvensional Indonesia (15-25 ton/ha) dengan kebutuhan lahan hanya 20-25%. Water recovery rate 94% dan zero solid waste berkontribusi positif terhadap urban sustainability.

3.7 Keterbatasan dan Penelitian Lanjutan

Keterbatasan penelitian meliputi periode eksperimen 120 hari yang relatif singkat untuk evaluasi perennial crops, kondisi semi-controlled yang belum mencakup extreme weather events, dan analisis ekonomi preliminari tanpa mempertimbangkan lifecycle costs jangka panjang. Penelitian lanjutan diperlukan untuk: (1) validasi jangka panjang 2-3 tahun, (2) ekspansi ke komoditas bernilai tinggi lainnya, (3) integrasi advanced machine learning algorithms, dan (4) pengembangan modular design untuk skalabilitas komersial.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem rumah kaca cerdas berbasis IoT yang mengintegrasikan GA-FLC untuk budidaya tumpang sari hidroponik anggur-selada dalam kondisi iklim tropis. Sistem GA-FLC menunjukkan kinerja superior dengan peningkatan akurasi kontrol 47-61%, dan efisiensi energi 25-30% lebih baik dibandingkan sistem konvensional. Produktivitas mengalami peningkatan signifikan dengan hasil anggur 27,8% dan selada 23,7% lebih tinggi, sementara LER 1,47 mengkonfirmasi efisiensi lahan 47% lebih baik. Efisiensi sumber daya mencapai penghematan air 33,3%, dan energi 32,6% dibandingkan pertanian konvensional. Selain itu, penanaman sela tanaman anggur dan selada dalam kondisi NFT terbukti efektif dalam mengoptimalkan pemanfaatan ruang vertikal dan horizontal serta meningkatkan efisiensi larutan nutrisi tanpa mengorbankan produktivitas tanaman utama. Penelitian ini memperkuat bukti bahwa integrasi IoT, logika fuzzy, dan algoritma evolusioner (GA) memberikan solusi yang tangguh, adaptif, dan hemat sumber daya untuk pertanian presisi, khususnya untuk sistem pertanian perkotaan dan yang terbatas ruangnya. Sistem ini berpotensi signifikan untuk addressing ketahanan pangan perkotaan dengan produktivitas tinggi dalam footprint lahan minimal, efisiensi sumber daya optimal, dan sustainability yang baik. Implementasi pilot project skala 1.000-5.000 m² dengan integrasi renewable energy direkomendasikan untuk validasi komersial dan technology transfer yang sustainable.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] United Nations Department of Economic and Social Affairs, "World population projected to reach 9.8 billion in 2050, and 11.2 billion in 2100," *World Population Prospects 2017*, vol. 2017, pp. 1-15, Jun. 2017. [Online]. Available: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf. DOI: 10.18356/b19523c6-en
- [2] World Bank, "World's population will continue to grow and will reach nearly 10 billion by 2050," *World Bank Blogs*, Apr. 2020. [Online]. Available: <https://blogs.worldbank.org/opendata/world-population-continue-grow-2050>. DOI: 10.1596/33883
- [3] A. Abbas, S. Jain, M. Gour, and S. Vankudothu, "Smart farming: Internet of Things (IoT)-based sustainable agriculture," *Agriculture*, vol. 12, no. 10, p. 1745, Oct. 2022. DOI: 10.3390/agriculture12101745
- [4] E. Navarro, N. Costa, and A. Pereira, "IoT-based agriculture management techniques for sustainable farming: A comprehensive review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 220, p. 108847, May 2024. DOI: 10.1016/j.compag.2024.108847
- [5] N. Ahmed, M. De Neve, and I. Everaert, "Internet of Things based smart automated indoor hydroponics and aeroponics greenhouse in Egypt," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 77, pp. 243-254, Nov. 2023. DOI: 10.1016/j.aej.2023.06.081
- [6] A. Rehman, T. Saba, M. Haseeb, and L. Larabi Marie-Sainte, "Towards making the fields talks: A real-time cloud enabled IoT crop management platform for smart agriculture," *Frontiers in Plant Science*, vol. 13, p. 1030168, Dec. 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.1030168
- [7] R. R. Shamshiri, F. Kalantari, K. C. Ting, K. R. Thorp, I. A. Hameed, C. Weltzien, D. Ahmad, and Z. M. Shad, "MyGreen: An IoT-enabled smart greenhouse for sustainable agriculture," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 5, pp. 3428-3442, Mar. 2021. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3026023
- [8] M. Kumar, S. Yusuf, K. Mustafa, S. Abdulllah, M. S. Al-Rawi, and W. Abbas, "Technologies, protocols, and applications of Internet of Things in greenhouse farming: A survey of recent advances," *Smart Agricultural Technology*, vol. 8, p. 100222, Dec. 2024. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100222
- [9] M. A. Rahman, M. N. Hasan, M. A. Hoque, M. R. Islam, and M. S. Hossain, "IoT-based greenhouse technologies for enhanced crop production: a comprehensive study of monitoring, control, and communication techniques," *Cogent Engineering*, vol. 11, no. 1, p. 2306825, Feb. 2024. DOI: 10.1080/23311916.2024.2306825
- [10] A. Singh, A. Sharma, R. Tiwari, and S. K. Jha, "An AIoT-based hydroponic system for crop recommendation and nutrient parameter monitoring," *Results in Engineering*, vol. 23, p. 102777, Sep. 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102777
- [11] O. D. Palmitessa, A. Signore, and P. Santamaria, "Advancements and future perspectives in nutrient film technique hydroponic system: a comprehensive review and bibliometric analysis," *Frontiers in Plant Science*, vol. 15, p. 1504792, Dec. 2024. DOI: 10.3389/fpls.2024.1504792
- [12] J. Martínez-Lüscher, J. T. Matus, E. Gomès, and I. Pascual, "Toward understanding grapevine responses to climate change: a multi-stress and holistic approach," *Journal of Experimental Botany*, p. erae482, Nov. 2024. DOI: 10.1093/jxb/erae482
- [13] F. Dittrich, T. Iserloh, C.-H. Treseler, R. Hüppi, S. Ogan, M. Seeger, and S. Thiele-Bruhn, "Crop diversification in viticulture with aromatic plants: Effects of intercropping on grapevine productivity in a steep-slope vineyard in the Mosel area, Germany," *Agriculture*, vol. 11, no. 2, p. 95, Jan. 2021. DOI: 10.3390/agriculture11020095
- [14] L. Zhang, L. Wang, Z. Pan, H. Fu, Y. Yang, H. Yu, Y. Sui, Y. Xu, and F. Li, "The effects of nutrient solution concentration and preharvest short-duration continuous light on yield, quality, and energy efficiency in aeroponic intercropped lettuce," *Horticulturae*,

- vol. 11, no. 7, p. 815, Jul. 2025. DOI: 10.3390/horticulturae11070815
- [15] Y. Zhang, J. Li, H. Wang, and X. Chen, "A review of environmental control strategies and models for modern agricultural greenhouses," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 4, p. 1456, Feb. 2024. DOI: 10.3390/app14041456
- [16] M. A. Al-Rashid, A. H. Al-Badi, N. K. Merrad, and H. A. Ameer, "Combining fuzzy logic and genetic algorithms to optimize cost, time and quality in modern agriculture," *Sustainability*, vol. 17, no. 7, p. 2829, Apr. 2025. DOI: 10.3390/su17072829
- [17] A. Rodríguez-Molina, M. G. Villarejo-Ramos, A. Requena-Mullor, and J. Alarcón-Valero, "A hydroponic greenhouse fuzzy control system: design, development and optimization using the genetic algorithm," *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol. 21, no. 1, p. e0202, Mar. 2023. DOI: 10.5424/sjar/2023211-18956
- [18] L. Chen, X. Wang, Y. Liu, and Z. Zhang, "Greenhouse environmental monitoring and control system based on improved fuzzy PID and neural network algorithms," *Journal of Intelligent Systems*, vol. 34, no. 1, p. 20240079, Jan. 2025. DOI: 10.1515/jisys-2024-0079
- [19] J. Riahi, H. Nasri, A. Mami, and S. Vergura, "Effectiveness of the fuzzy logic control to manage the microclimate inside a smart insulated greenhouse," *Smart Cities*, vol. 7, no. 3, pp. 1304-1329, May 2024. DOI: 10.3390/smartcities7030055
- [20] A. K. Varshney and V. Torra, "Literature review of the recent trends and applications in various fuzzy rule-based systems," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 25, no. 6, pp. 2163-2186, Aug. 2023. DOI: 10.1007/s40815-023-01534-w
- [21] M. Azaza, F. Echaieb, E. Tadayyon, A. Basak, P. Wagh, N. Deepa, and L. Gonzalez, "Fuzzy-IoT smart irrigation system for precision scheduling and monitoring," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 217, p. 108407, Feb. 2024. DOI: 10.1016/j.compag.2024.108407
- [22] A. Hafeez, T. Husain, M. A. Al-Shuhail, S. Rehman, and M. Shafiq, "Sustainable smart agriculture farming for cotton crop: A fuzzy logic rule based methodology," *Sustainability*, vol. 15, no. 18, p. 13874, Sep. 2023. DOI: 10.3390/su151813874
- [23] H. N. Ngugi, A. A. Akinyelu, and A. E. Ezugwu, "Machine learning and deep learning for crop disease diagnosis: Performance analysis and review," *Agronomy*, vol. 14, no. 12, p. 3001, Dec. 2024. DOI: 10.3390/agronomy14123001
- [24] A. B. Primawan and N. D. L. Kusuma, "Nutrition control in nutrient film technique hydroponic system using fuzzy method," in *E3S Web of Conferences*, vol. 475, p. 04002, Jan. 2024. DOI: 10.1051/e3sconf/202447504002
- [25] U. E. Chigbu, S. O. Atiku, and C. C. Du Plessis, "The science of literature reviews: Searching, identifying, selecting, and synthesising," *Publications*, vol. 11, no. 1, p. 2, Jan. 2023. DOI: 10.3390/publications11010002
- [26] E. Budianita, W. Fitri, and J. Jambak, "Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things," *Heliyon*, vol. 9, no. 10, p. e20554, Oct. 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20554
- [27] A. Alsadon, I. Ibrahim, M. Wahb-Allah, and S. Alsadon, "Intelligent and automatic irrigation system based on internet of things using fuzzy control technology," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 2357, Jan. 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-52357-1
- [28] A. Kiritmat, O. Krejcar, A. Ekinici, and O. Kuca, "Optimizing greenhouse design with miniature models and IoT (Internet of Things) technology—A real-time monitoring approach," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 7, p. 2871, Mar. 2024. DOI: 10.3390/app14072871
- [29] K. Kour, D. Gupta, K. Gupta, S. Dhiman, S. Bharany, A. Rehman, M. Shafiq, and H. Hamam, "Monitoring ambient parameters in the IoT precision agriculture scenario: An approach to sensor selection and hydroponic saffron cultivation," *Sensors*, vol. 22, no. 22, p. 8905, Nov. 2022. DOI: 10.3390/s22228905
- [30] K. Kour, D. Gupta, K. Gupta, S. Dhiman, S. Bharany, A. Rehman, M. Shafiq, and H. Hamam, "Smart-hydroponic-based framework for saffron cultivation: A precision smart agriculture perspective," *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1120, Jan. 2022. DOI: 10.3390/su14031120
- [31] A. Malik, A. Shakir, A. Ajmal, M. Khan, and S. Khan, "Calibration and validation of the FAO AquaCrop water productivity model for perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.)," *Water*, vol. 14, no. 23, p. 3933, Dec. 2022. DOI: 10.3390/w14233933
- [32] I. F. Sousa, A. A. Kuneski, P. S. L. Freitas, N. T. Coelho, M. E. Báez-González, J. A. Serna-Pérez, and G. F. Silva, "AquaCrop model performance in yield, biomass, and water requirement simulations of common bean grown under different irrigation treatments and sowing periods," *Horticulturae*, vol. 9, no. 4, p. 507, Apr. 2023. DOI: 10.3390/horticulturae9040507
- [33] O. B. Adebayo, B. A. Osunbitan, K. O. Adekalu, and D. A. Okunade, "Assessment of the AquaCrop model to simulate the impact of soil fertility management on evapotranspiration, yield, and water productivity of maize (*Zea May* L.) in the sub-humid agro-ecology of Nigeria," *Discover Agriculture*, vol. 2, no. 1, p. 30, Mar. 2024. DOI: 10.1007/s44279-024-00030-8
- [34] L. Busetto, L. Ranghetti, S. Amaducci, R. Boschetti, Q. Huang, J. Manfron, A. Weiss, E. Vrieling, S. Robustelli, and P. A. Brivio, "Performance analysis of regional AquaCrop (v6.1) biomass and surface soil moisture simulations using satellite and in situ observations," *Geoscientific Model Development*, vol. 14, no. 12, pp. 7309-7328, Dec. 2021. DOI: 10.5194/gmd-14-7309-2021