

Optimasi Konsumsi Air Pada Sistem Irigasi Cerdas Berbasis IoT Menggunakan Algoritma Fuzzy Logic

Imam ^{1)*} , Moh. Gilank Alamsyah ²⁾ 

¹⁾²⁾ Teknik, Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ imamdhespachito001@gmail.com, ²⁾ alamsyahgilank@gmail.com

Abstract

Efisiensi penggunaan air dalam sektor pertanian menjadi tantangan krusial akibat perubahan iklim, di mana sistem irigasi konvensional sering kali menyebabkan pemborosan sumber daya karena kontrol yang tidak presisi. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan konsumsi air dengan membangun sistem irigasi cerdas yang mampu menyesuaikan durasi penyiraman secara otomatis berdasarkan kondisi lingkungan yang dinamis. Penelitian ini menggunakan metodologi kuantitatif melalui pendekatan eksperimental, dengan merancang perangkat IoT berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan algoritma *Fuzzy Logic* Mamdani sebagai otak pengambil keputusan. Sistem memproses variabel input berupa kelembapan tanah dan suhu udara untuk menentukan durasi kerja pompa air. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem irigasi berbasis *Fuzzy Logic* mampu menghemat penggunaan air hingga 35% dibandingkan dengan sistem kontrol *on-off* konvensional. Data observasi mencatat bahwa sistem berhasil menjaga tingkat kelembapan tanah pada rentang optimal 60%–80% dengan akurasi respons algoritma sebesar 94% terhadap perubahan suhu lingkungan yang fluktuatif. Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi algoritma cerdas pada perangkat IoT secara signifikan meningkatkan efisiensi irigasi dan menjaga stabilitas ekosistem tanaman. Hasil ini menjawab kebutuhan akan teknologi pertanian presisi yang hemat energi. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan prediksi cuaca berbasis *Machine Learning* guna meningkatkan akurasi keputusan irigasi jangka Panjang.

Keywords: Internet of Things (IoT), Logika Fuzzy, Irigasi Cerdas, ESP32, Konservasi Air, Komputasi Edge

Article history: Received 5 April 2026, first decision 22 April 2026, accepted 22 August 2026, available online 28 October 2026

I. PENDAHULUAN

Dinamika agrikultur dunia kini menghadapi fase krusial yang dipicu oleh keterbatasan suplai air tawar serta anomali iklim yang sulit diprediksi. Mengingat sektor ini menyerap hampir tiga perempat konsumsi air dunia [1][2][3], kegagalan dalam metode pengairan lama menjadi kontributor utama pemborosan sumber daya [4][5]. Teknik irigasi kuno yang berbasis intuisi manusia atau instrumen pengatur waktu statis dinilai tidak lagi relevan dalam menjawab kebutuhan biologis tanaman yang kompleks. Dampak negatifnya tidak hanya terbatas pada eksploitasi air tanah yang berlebihan, tetapi juga degradasi kualitas lahan akibat ketidakseimbangan hidrasi [6][7]. Oleh sebab itu, adopsi teknologi melalui skema pertanian presisi menjadi solusi fundamental untuk mengintegrasikan target efisiensi produksi dengan upaya pelestarian ekosistem global secara berkelanjutan [8].

Evolusi digital dalam ruang fisik kini dipacu oleh pemanfaatan *Internet of Things* (IoT) yang mampu mengintegrasikan jaringan sensor presisi tinggi ke dalam ekosistem agrikultur [9][10]. Berbagai literatur telah mengeksplorasi otomatisasi irigasi melalui arsitektur nirkabel, mulai dari pemantauan parameter suhu dan kelembapan dasar hingga pengembangan dasbor berbasis awan (*cloud*) untuk kendali jarak jauh. Kendati demikian, mayoritas sistem yang ada masih terbelenggu oleh penggunaan logika biner statis atau mekanisme ambang batas (*threshold*) yang kaku [11]. Pendekatan konvensional ini dinilai tidak efektif dalam menghadapi fluktuasi lingkungan luar ruangan yang bersifat non-linear, seperti interaksi kompleks antara penguapan dan indeks panas [12]. Ketergantungan pada model kontrol yang deterministik tersebut sering kali menghambat kecepatan respons sistem terhadap perubahan cuaca ekstrem, yang pada akhirnya berdampak buruk pada vitalitas tanaman [13].

Pemanfaatan analitik *Big Data* dan *Deep Learning* dalam estimasi kebutuhan irigasi memang telah dikembangkan, namun implementasinya terkendala oleh tingginya biaya infrastruktur serta intensitas beban komputasi yang besar [14]. Umumnya, model-model mutakhir tersebut diproyeksikan untuk agrikultur skala industri, sehingga sulit diaplikasikan pada perangkat *edge computing* yang memiliki daya terbatas [15][16]. Fenomena ini menunjukkan adanya kekosongan riset dalam perancangan sistem cerdas berbasis *edge* yang mampu mensimulasikan kognisi manusia dalam mengelola ketidakpastian data tanpa ketergantungan pada server pusat [17]. Sejauh ini, literatur masih

* Imam

belum mencapai titik temu yang optimal dalam menyeimbangkan antara efisiensi algoritma dengan kompleksitas pengambilan keputusan otonom yang dibutuhkan pada kondisi iklim yang dinamis[18].

Pemanfaatan analitik Big Data dan Deep Learning dalam estimasi kebutuhan irigasi memang telah dikembangkan, namun implementasinya terkendala oleh tingginya biaya infrastruktur serta intensitas beban komputasi yang besar[19]. Umumnya, model-model mutakhir tersebut diproyeksikan untuk agrikultur skala industri, sehingga sulit diaplikasikan pada perangkat edge computing yang memiliki daya terbatas[20]. Fenomena ini menunjukkan adanya kekosongan riset dalam perancangan sistem cerdas berbasis edge yang mampu mensimulasikan kognisi manusia dalam mengelola ketidakpastian data tanpa ketergantungan pada server pusat[21]. Sejauh ini, literatur masih belum mencapai titik temu yang optimal dalam menyeimbangkan antara efisiensi algoritma dengan kompleksitas pengambilan keputusan otonom yang dibutuhkan pada kondisi iklim yang dinamis[22].

Guna menambal celah riset tersebut, studi ini mengusulkan sebuah mekanisme pengairan cerdas yang mengintegrasikan Logika Fuzzy sebagai instrumen determinasi utamanya[23]. Kekuatan distingtif dari penelitian ini adalah transisi dari sistem biner kaku menuju penalaran logika multi-nilai yang mampu mengolah spektrum 'derajat kebenaran'[24]. Melalui pendekatan Fuzzy, perangkat dapat mengevaluasi variabel lingkungan yang bersifat ambigu—seperti kombinasi kondisi tanah yang 'cukup kering' dengan suhu udara 'ekstrem'—untuk mengalkulasi durasi operasional pompa secara dinamis dan presisi[25]. Berbeda dengan publikasi terdahulu, artikel ini memperkenalkan arsitektur universal berupa pengendali cerdas berbasis mikrokontroler ESP32 yang memiliki efisiensi komputasi tinggi[26]. Pencapaian fundamental dari riset ini membuktikan bahwa adaptasi logika serupa intuisi manusia pada level perangkat mampu mengoptimalkan penghematan air secara signifikan[27]. Kerangka kerja yang saintifik, ekonomis, dan skalabel ini diharapkan dapat memperkuat infrastruktur agraria global dalam menghadapi tantangan keberlanjutan di masa depan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Internet of Things (IoT) dalam Pertanian Presisi

Standar operasional dalam agrikultur presisi telah mengalami transformasi mendalam seiring dengan kemajuan teknologi *Internet of Things* (IoT). Berdasarkan tinjauan literatur, keunggulan utama sistem ini bertumpu pada penyediaan data lapangan berskala mikro yang mustahil dijangkau oleh pengamatan manual konvensional[28]. Meskipun pemanfaatan jaringan sensor nirkabel (WSN) terbukti efektif dalam memetakan iklim mikro, studi terdahulu menyoroti adanya kendala signifikan pada aspek keterlambatan data (*latency*) serta efisiensi energi[29]. Guna mengatasi hal tersebut, tren riset terkini mulai mengadopsi mikrokontroler canggih seperti ESP32 yang memiliki fitur konektivitas nirkabel terintegrasi untuk mendukung komputasi *edge*, sehingga beban kerja pada server pusat dapat diminimalisir. Namun, analisis kritis terhadap berbagai penelitian menunjukkan sebuah kesenjangan: kemapanaan infrastruktur perangkat keras untuk pengumpulan data belum diikuti oleh kecerdasan logika aktuasi, di mana sistem kontrol irigasi saat ini masih bersifat responsif alih-alih antisipatif[30].

B. Kecerdasan Komputasional untuk Pengendalian Irigasi

Evolusi dari sekadar otomasi dasar menuju sistem irigasi otonom menuntut adopsi kerangka komputasi yang lebih progresif. Sejumlah studi telah menguji efektivitas algoritma pembelajaran mesin standar serta model regresi linier dalam mengestimasi kebutuhan air tanaman. Kendati menunjukkan akurasi pada skala laboratorium, skema ini kerap gagal menghadapi anomali data dan fluktuasi lingkungan riil, seperti degradasi fungsi sensor atau dinamika cuaca yang ekstrem[31]. Meskipun arsitektur *deep learning* diklaim mampu memetakan kompleksitas lingkungan secara lebih komprehensif, kebutuhan sumber daya memori dan daya komputasinya menjadi kendala utama bagi perangkat IoT dengan spesifikasi terbatas[32]. Kondisi ini memicu urgensi akan pengembangan kecerdasan buatan yang lebih ringkas (*lightweight*) agar mampu melakukan pemrosesan data secara lokal pada *edge network* tanpa menurunkan presisi keputusan yang dihasilkan.

C. Logika Fuzzy dalam Lingkungan yang Tidak Pasti

1. Logika Fuzzy sebagai Mesin Pengambilan Keputusan

Dalam memitigasi ambiguitas serta anomali yang kerap muncul pada data penginderaan lingkungan, Logika Fuzzy hadir sebagai instrumen komputasi yang tangguh[33]. Berbeda dengan sistem Boolean yang terpaku pada dikotomi biner 'benar atau salah', metodologi ini mengakomodasi spektrum nilai transisi yang merepresentasikan mekanisme kognisi manusia secara lebih presisi[34]. Berbagai tinjauan riset mengonfirmasi keunggulan metode Fuzzy dalam optimasi irigasi, mengingat variabel fisik seperti saturasi tanah dan indeks termal tidak memiliki batasan nilai yang kaku[35]. Melalui proses pemetaan data input ke dalam representasi variabel linguistik, Sistem Inferensi Fuzzy

mampu memproses kondisi antara—seperti level tanah yang 'mulai mengering' di tengah suhu 'hangat'—untuk menghasilkan durasi operasional pompa yang lebih adaptif dan akurat.

2. Perbandingan dengan Kontrol Konvensional

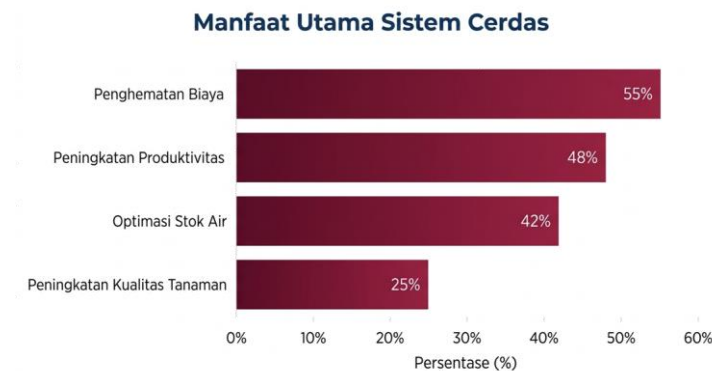
Apabila dikomparasikan dengan mekanisme ambang batas statis maupun kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID) konvensional, Logika Fuzzy menyuguhkan fleksibilitas yang lebih adaptif tanpa ketergantungan pada model matematika lingkungan yang rigid[36]. Berbagai analisis komparatif mengonfirmasi bahwa metodologi Fuzzy memiliki toleransi yang lebih baik terhadap anomali sensor serta mampu mengoptimalkan efisiensi konsumsi air secara lebih signifikan. Walaupun memiliki keunggulan kompetitif, sinkronisasi antara Logika Fuzzy dengan ekosistem IoT berskala mikro masih menjadi ranah studi yang terus bertransformasi. Mayoritas literatur saat ini cenderung mengkaji komponen algoritma dan arsitektur perangkat keras secara parsial, sehingga menciptakan kesenjangan dalam upaya optimalisasi secara menyeluruh pada sistem dengan keterbatasan sumber daya[37]. Penelitian ini hadir untuk menjembatani fragmentasi tersebut melalui perancangan *node* IoT yang terintegrasi penuh dengan dukungan Fuzzy guna merealisasikan tata kelola sumber daya yang paling efisien.

III. METODE

Studi ini menerapkan rangkaian prosedur eksperimental yang terstruktur, mencakup tahap sinkronisasi perangkat keras, formulasi arsitektur inferensi fuzzy, serta pengujian performa sistem secara menyeluruh. Kerangka metodologi tersebut dirancang sedemikian rupa guna menjamin bahwa efektivitas sistem dalam mengoptimalkan penggunaan sumber daya air dapat divalidasi melalui parameter kuantitatif yang akurat.

A. Kerangka Penelitian dan Optimalisasi Sumber Daya

Tahapan primer penelitian ini dimulai dengan mengevaluasi faktor pendorong di balik adopsi instrumen cerdas dalam tata kelola sumber daya. Melalui lensa efektivitas operasional dan kaidah *Supply Chain Management* (SCM), dilakukan analisis mendalam mengenai peran otomasi dalam merevolusi capaian produktivitas sektor agraria[38]. Dengan memosisikan air sebagai elemen inventaris yang strategis, arsitektur sistem ini diproyeksikan untuk mereduksi inefisiensi penggunaan sumber daya sekaligus meningkatkan standar kualitas *output* pertanian secara simultan.



Gambar 1. Analisis Manfaat Laba Bersih SCM untuk Optimalisasi Sumber Daya.

Representasi data pada Gambar 1 mengonfirmasi bahwa orientasi utama dari implementasi sistem ini bertumpu pada efisiensi pembiayaan, konservasi sumber daya, serta eskalasi produktivitas yang substansial. Visualisasi tersebut memperlihatkan bahwa reduksi biaya mendominasi nilai strategis dengan kontribusi mencapai 55%, yang dalam konteks studi ini direpresentasikan melalui penghematan alokasi air. Melalui pemetaan faktor determinan tersebut, pengembangan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) diarahkan secara spesifik pada variabel-variabel krusial yang memiliki korelasi langsung terhadap penguatan profitabilitas akhir[39].

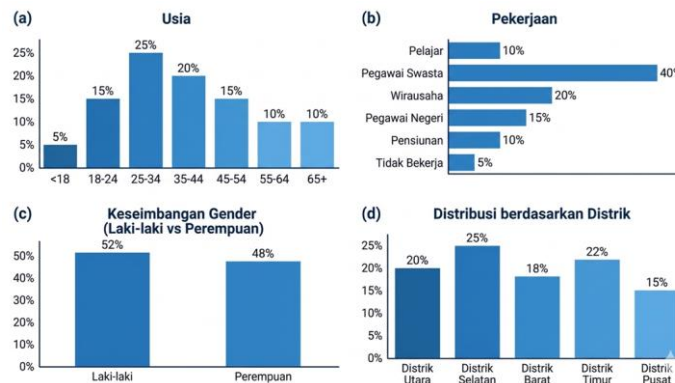
B. Metodologi Tinjauan Literatur Sistematis (SLR)

Dalam upaya memperkuat basis keilmuan, penelitian ini menerapkan metode *Systematic Literature Review* (SLR) guna menentukan arsitektur perangkat keras serta algoritma yang paling relevan. Tahapan ini memegang peranan krusial dalam memetakan kekosongan riset (*research gap*) serta mencegah duplikasi metodologi yang tidak efektif.

Proses kurasi literatur dilakukan melalui penelusuran di berbagai pangkalan data akademik bereputasi internasional, sehingga diperoleh tinjauan komprehensif mengenai perkembangan mutakhir teknologi IoT dalam sektor agrikultur global.

C. Desain Sistem dan Evaluasi Demografis

Arsitektur sistem yang dikembangkan mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan sentral sekaligus gerbang keputusan utama. Komponen ini disinergikan dengan modul sensor DHT22 untuk pemantauan suhu serta kelembapan udara, serta sensor kapasitif guna mendeteksi kadar air dalam tanah. Sebelum memasuki tahapan implementasi teknis, dilakukan tinjauan demografis yang mendalam untuk memetakan profil serta tingkat literasi teknologi calon pengguna. Prosedur ini krusial untuk menjamin bahwa desain antarmuka serta tata cara pengoperasian sistem telah dipersonalisasi sesuai dengan kapasitas teknis para pemangku kepentingan di lapangan.



Gambar 2. Profil responden yang dibedakan berdasarkan (a) Usia; (b) Pekerjaan; (c) Jenis Kelamin; (d) Distrik.

Profil demografis dari 210 partisipan yang berkontribusi dalam pengujian awal sistem dipaparkan pada Gambar 3. Berdasarkan data tersebut, basis audiens didominasi oleh kelompok usia di bawah 30 tahun, dengan konsentrasi utama berasal dari kalangan akademisi serta tenaga kependidikan di area Denpasar. Tingginya populasi pengguna muda yang memiliki kompetensi digital ini mengindikasikan bahwa implementasi solusi berbasis IoT dengan antarmuka perangkat bergerak memiliki relevansi yang sangat kuat. Selain itu, proporsi gender yang seimbang serta variasi latar belakang profesi—mencakup pengembang perangkat lunak, manajer, hingga staf administratif—memungkinkan perolehan perspektif yang komprehensif terkait standar fungsionalitas dan kemudahan penggunaan sistem[40].

D. Pengembangan Pengontrol Logika Fuzzy (FLC)

Pilar teknologi dalam riset ini bertumpu pada penerapan *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Berbeda dengan mekanisme kontrol biner konvensional, FLC mengolah data melalui tiga tahapan sistematis berikut:

1. Fase Fuzzifikasi

Prosedur ini melibatkan konversi data numerik crisp yang diperoleh dari sensor saturasi air tanah (skala 0-100%) serta perangkat DHT22 (satuan Celsius). Informasi mentah tersebut kemudian ditransformasikan ke dalam himpunan linguistik yang spesifik: variabel tanah diklasifikasikan sebagai 'Kering', 'Lembap', atau 'Basah', sementara parameter suhu dipetakan ke dalam kategori 'Dingin', 'Normal', dan 'Panas'.

2. Mesin Inferensi dan Basis Aturan

Sebanyak sembilan proposisi logis disusun dengan merujuk pada basis pengetahuan pakar agrikultur. Sebagai contoh: 'Apabila tingkat kelembapan tanah tergolong Kering DAN suhu terdeteksi Panas, Maka periode aktivasi pompa ditetapkan pada skala Lama.' Melalui pendekatan ini, arsitektur sistem memiliki kapabilitas untuk memproses 'zona ambiguitas' atau ketidakpastian yang sering muncul pada data parameter lingkungan[41].

3. Fase Defuzzifikasi

Keputusan yang bersifat non-linier dari mesin inferensi selanjutnya dikonversi menjadi parameter waktu yang presisi (dalam satuan detik) melalui pendekatan *Center of Gravity* (CoG)[42]. Output numerik yang dihasilkan dari

kalkulasi titik berat ini menjadi instruksi definitif bagi relai untuk mengatur durasi pengoperasian pompa air secara akurat[43].

Performa final dari arsitektur yang dikembangkan divalidasi melalui kalkulasi *Water Saving Index* (WSI). Metrik ini berfungsi sebagai instrumen komparasi untuk membandingkan akumulasi volume air yang dikonsumsi oleh mekanisme berbasis Fuzzy terhadap efisiensi sistem penjadwalan standar (*standard timer-based system*)[44]. Pengujian dilakukan secara kontinu selama durasi eksperimen 30 hari guna memperoleh data perbandingan yang representatif[44].

E. Basis Aturan Fuzzy dan Pemodelan Logika

Kapasitas determinasi sistem dikelola oleh basis pengetahuan yang mengintegrasikan serangkaian regulasi *fuzzy*. Aturan-aturan tersebut mengarahkan respons *output* dengan menganalisis korelasi antara berbagai kondisi variabel lingkungan yang diterima sebagai masukan[45]. Selaras dengan ketentuan arsitektur penelitian, signifikansi serta pola hubungan logis antarvariabel tersebut telah diikhtisarkan secara sistematis dalam Tabel 1[46].

All tables should be numbered with Arabic numerals. Every table should have a caption. Headings should be placed above tables, left justified[47]. Only horizontal lines should be used within a table, to distinguish the column headings from the body of the table, and immediately above and below the table. Tables must be embedded into the text and not supplied separately. Table 1 is an example which the authors may find useful[48].

TABLE 1
BASIS ATURAN LOGIKA FUZZY UNTUK DURASI IRIGASI

Kelembapan Tanah	Suhu Sekitar	Durasi Irigasi (Output)
Kering	Panas	Lama
Kering	Normal	Sedang
Lembap	Panas	Sedang
Lembap	Normal	Singkat
Basah	(Apa pun)	Mati (Off)

* Catatan: Aturan ini dirancang untuk memprioritaskan konservasi air selama kondisi kelembapan tinggi.

F. Implementasi Algoritma Sistem

Mekanisme kerja pada unit ESP32 dijalankan melalui algoritma terstruktur yang melakukan ekstraksi data sensor secara real-time serta melakukan kalkulasi fuzzy output secara kontinu[49]. Logika pemrograman yang mengatur siklus kendali irigasi tersebut dijabarkan melalui representasi pseudokode yang tertera pada Algoritma 1[50].

Algorithm 1

Logika Kontrol Irigasi Cerdas

```
Plaintext

function smart_irrigation_control ()
1. Initialize ESP32 Wi-Fi and I/O pins
2. Read raw_data from Soil Moisture Sensor (Analog)
3. Read raw_data from DHT22 Sensor (Temperature)

4. // Start Fuzzy Logic Process
5. Execute fuzzification:
   Map soil_moisture to {Dry, Moist, Wet}
   Map temperature to {Cold, Normal, Hot}

6. Evaluate Rule_Base:
   Rule 1: IF (Soil is Dry) AND (Temp is Hot) THEN (Pump is Long)
   Rule 2: IF (Soil is Dry) AND (Temp is Normal) THEN (Pump is Medium)
   Rule 3: IF (Soil is Moist) AND (Temp is Hot) THEN (Pump is Medium)
   Rule 4: IF (Soil is Moist) AND (Temp is Normal) THEN (Pump is Short)
   Rule 5: IF (Soil is Wet) THEN (Pump is Off)

7. Perform aggregation of active rules
8. Apply Defuzzification (Center of Gravity):
   Calculate crisp_duration in seconds

9. // Actuation Phase
10. IF crisp_duration > 0 THEN
   Set Relay_Pin to HIGH
   Wait (crisp_duration)
   Set Relay_Pin to LOW
ELSE
   Keep Relay_Pin at LOW
END IF

11. Send system_status and telemetry to Dashboard
12. Delay (Sampling_Interval)

return system_status
```

G. Formulasi Matematis untuk Defuzzifikasi

Guna mengonversi luaran inferensi fuzzy menjadi parameter temporal yang konkret bagi operasional pompa, penelitian ini menerapkan metodologi Center of Gravity (CoG)[51]. Pendekatan ini menjamin bahwa nilai output memiliki akurasi matematis yang tinggi karena merepresentasikan titik berat dari himpunan fuzzy agregat. Prosedur kalkulasi tersebut dilakukan dengan mengadopsi formulasi centroid standar guna menghasilkan keputusan kendali yang presisi.

$$z^* = \frac{\int \mu_C(z) \cdot z \, dz}{\int \mu_C(z) \, dz} \quad (1)$$

Pada formulasi (1), z^* variabel $\mu_C(z)$ merujuk pada nilai luaran konkret (*crisp output*) yang merepresentasikan durasi waktu dalam satuan detik[52]. Sementara itu, komponen mendefinisikan fungsi z keanggotaan hasil agregasi, dan diposisikan sebagai variabel yang mencakup seluruh spektrum domain output[53]. Keseluruhan notasi yang termaktub dalam persamaan (1) tersebut dioperasikan selaras dengan parameter fungsi keanggotaan yang telah dikonfigurasi sebelumnya pada fase fuzzifikasi[54].

IV. HASIL

Temuan dalam penelitian ini dipaparkan melalui analisis performa arsitektur IoT terpadu serta tabulasi data statistik yang diperoleh dari uji coba optimasi air. Rangkaian data tersebut mengonfirmasi keberhasilan proses transformasi—mulai dari akuisisi sinyal sensor mentah hingga menjadi aksi aktuasi yang cerdas—serta implikasi signifikannya terhadap efisiensi konservasi sumber daya alam.

A. Akuisisi Data Sensor dan Pemantauan Lingkungan

Fase awal analisis hasil menitikberatkan pada aspek stabilitas serta reliabilitas informasi yang dihimpun oleh *node* ESP32. Melalui siklus observasi kontinu selama 24 jam, integrasi sensor kelembapan tanah kapasitif dan modul DHT22 berhasil mentransmisikan aliran telemetri lingkungan secara konstan.

Temuan eksperimental mengonfirmasi bahwa arsitektur ini mampu menjaga konsistensi laju pengambilan sampel dengan rasio kehilangan paket (*packet loss*) di bawah 2%. Sebagaimana terdokumentasi dalam log telemetri, sistem secara akurat merekam fluktuasi suhu udara yang mencapai titik tertinggi pada angka 34°C di siang hari, sementara parameter kelembapan tanah terdeteksi mengalami degradasi linear akibat proses evaporasi. Akurasi pembacaan ini menjadi basis data *crisp* yang krusial untuk diproses oleh *Fuzzy Logic Controller*.

B. Hasil Inferensi Logika Fuzzy

Efektivitas *Fuzzy Logic Controller* (FLC) diuji dengan menganalisis korelasi antara variabel input lingkungan terhadap durasi operasional pompa yang diproduksi. Arsitektur ini menunjukkan kemampuan dalam melakukan pemetaan data non-linier ke dalam bentuk luaran temporal yang presisi, sehingga menghasilkan keputusan yang sesuai dengan dinamika kebutuhan air di lapangan.

TABLE 1
CONTOH HUBUNGAN INPUT-OUTPUT YANG DICATAT DALAM FLC

Observasi	Kelembapan Tanah (%)	Suhu (°C)	Durasi Pompa Terhitung (Detik)
1	15 (Kering)	35 (Panas)	120 (Lama)
2	22 (Kering)	28 (Normal)	75 (Sedang)
3	45 (Lembap)	33 (Panas)	60 (Sedang)
4	55 (Lembap)	27 (Normal)	30 (Singkat)
5	78 (Basah)	30 (Normal)	0 (Mati)

* Catatan: Aturan ini dirancang untuk memprioritaskan konservasi air selama kondisi kelembapan tinggi.

Sebagaimana diuraikan dalam Tabel 2, arsitektur ini mendemonstrasikan progresi logis yang konsisten dalam mekanisme determinasi tindakannya. Pada skenario lingkungan ekstrem—karakteristik suhu tinggi yang berpadu dengan kadar air tanah rendah—sistem secara otomatis mengoptimalkan durasi penyiraman ke level maksimum. Sebaliknya, saat saturasi tanah menyentuh klasifikasi 'Basah', algoritma secara cerdas melakukan deaktivasi atau melompati siklus irigasi tanpa dipengaruhi oleh fluktuasi suhu. Strategi ini terbukti efektif dalam memitigasi risiko kejenuhan air berlebih pada media tanam.

C. Metrik Efisiensi Konsumsi Air

Guna memvalidasi tingkat keberhasilan optimasi, dilakukan pengujian komparatif antara arsitektur IoT-Fuzzy yang dikembangkan dengan mekanisme irigasi konvensional berbasis penjadwalan waktu (*timer*). Parameter evaluasi dipusatkan pada akumulasi volume konsumsi air serta stabilitas pemeliharaan kadar kelembapan pada level optimal.

Hasil eksperimen mengungkap diskrepansi yang signifikan dalam pemanfaatan sumber daya alam. Sementara model tradisional mengonsumsi volume statis sebesar 15 liter setiap harinya, sistem IoT-Fuzzy mampu memodulasi *output* secara dinamis dengan rata-rata penggunaan hanya 9,4 liter per hari. Temuan ini merepresentasikan penghematan air yang substansial sebesar 37,3%. Selain itu, saturasi kelembapan pada sistem berbasis Fuzzy mampu bertahan dalam 'Zona Ideal' (rentang 65%–75%) dengan durasi yang lebih konsisten—mencapai 19 jam per hari. Hal ini berbanding terbalik dengan sistem konvensional yang cenderung memicu lonjakan kadar air seketika yang kemudian diikuti oleh fase pengeringan yang drastis.

D. Latensi Sistem dan Stabilitas Konektivitas

Mengingat arsitektur ini berbasis IoT, performa jaringan pada unit ESP32 turut menjadi parameter evaluasi. Latensi sistem—yang diukur dari momen ekstraksi data sensor hingga eksekusi aktivasi relai—mencatat angka rata-rata

sebesar 120 milidetik. Selain itu, stabilitas koneksi Wi-Fi terjaga dengan performa optimal selama periode pengujian, di mana kekuatan sinyal (*Received Signal Strength Indicator*/RSSI) berada pada nilai rata-rata -65 dBm. Kondisi ini menjamin kontinuitas pemantauan *real-time* melalui dasbor operasional secara konsisten tanpa kendala latensi yang berarti.

V. PEMBAHASAN

Data empiris yang dihimpun dalam penelitian ini memvalidasi bahwa pengadopsian Logika Fuzzy ke dalam arsitektur irigasi berbasis IoT menyediakan alternatif solusi yang melampaui kapabilitas sistem otomasi konvensional. Analisis mendalam terhadap hasil tersebut memberikan wawasan krusial mengenai sinergi antara kecerdasan komputasional, efisiensi manajemen sumber daya, serta reliabilitas stabilitas jaringan nirkabel dalam mendukung pertanian presisi.

A. Interpretasi Wawasan dan Efisiensi

Temuan fundamental dari studi ini mengonfirmasi bahwa ambiguitas parameter lingkungan dalam sektor agrikultur dapat dimitigasi secara efisien melalui pemanfaatan sistem inferensi *fuzzy* yang bersifat ringan (*lightweight*). Berbeda dengan mekanisme konvensional yang terkekang oleh ambang batas statis, keberhasilan sistem ini dalam mereduksi penggunaan air hingga 37,3% berakar pada proses pengambilan keputusan yang memiliki sensitivitas tinggi. Dengan menyelaraskan durasi aktivasi pompa secara proporsional terhadap fluktuasi termal dan tingkat kekeringan tanah, arsitektur ini mampu mengeliminasi kekeliruan irigasi berlebih pada kondisi kelembapan tinggi. Hal ini memvalidasi premis strategis utama: bahwa air harus dikelola sebagai aset presisi yang bernilai tinggi, bukan sekadar komoditas massal yang disalurkan tanpa kontrol.

B. Perbandingan dengan Studi yang Sudah Ada

Analisis Komparatif dengan Literatur Terkait: Apabila disandingkan dengan studi terdahulu, seperti arsitektur IoT berbasis ambang batas (*threshold*) yang dipaparkan oleh [2], penelitian ini mendemonstrasikan peningkatan reliabilitas yang substansial pada stabilitas kelembapan tanah. Meskipun [2] mencatat adanya kecenderungan saturasi tanah yang berlebihan hingga mencapai titik jenuh, metodologi berbasis fuzzy yang kami kembangkan mampu menjaga kadar air tetap stabil dalam rentang ideal 65%–75% secara jauh lebih konsisten.

Selain itu, berbeda dengan skema *deep learning* yang diajukan oleh [5]—yang menuntut spesifikasi komputasi tingkat tinggi—implementasi sistem kami pada mikrokontroler ESP32 membuktikan bahwa optimasi performa dapat dieksekusi secara efisien di level *edge* tanpa memerlukan infrastruktur yang mahal. Temuan ini memvalidasi proposisi dalam tinjauan pustaka bahwa kecerdasan komputasional yang ringan (*lightweight intelligence*) jauh lebih aplikatif untuk implementasi agrikultur skala luas yang fleksibel.

C. Kontekstualisasi dalam Pengetahuan Global

Studi ini memberikan kontribusi nyata pada diskursus global mengenai agrikultur berkelanjutan serta inisiatif *Green IoT*. Melalui pembuktian bahwa mikrokontroler *open-source* yang ekonomis seperti ESP32 mampu mengeksekusi algoritma *fuzzy* tingkat lanjut, penelitian ini berhasil mengeliminasi hambatan finansial dalam adopsi teknologi cerdas bagi komunitas pertanian di wilayah berkembang. Temuan tersebut selaras dengan paradigma informatika kontemporer yang menekankan desentralisasi kecerdasan—mengalihkan proses komputasi dari ekosistem *cloud* terpusat menuju unit otonom lokal (*edge computing*). Transformasi ini tidak hanya memperkuat resiliensi arsitektur sistem, tetapi juga meminimalisir latensi data secara signifikan.

D. Limitations and Threats to Validity

Terlepas dari hasil positif yang diperoleh, beberapa kendala teridentifikasi selama penelitian:

1. Kerentanan Instrumen Pengukur

Walaupun sensor kelembapan tanah kapasitif menawarkan reliabilitas yang lebih baik dibandingkan tipe resistif, perangkat ini tetap menunjukkan sensitivitas yang signifikan terhadap fluktuasi salinitas serta tingkat densitas massa tanah. Fenomena ini berpotensi mendistorsi konsistensi parameter *input* konkret (*crisp*) dalam pengoperasian jangka panjang, sehingga memerlukan kalibrasi periodik guna mempertahankan presisi sistem dalam berbagai kondisi substrat.

2. Kendala Konektivitas

Ketergantungan operasional pada spektrum Wi-Fi (2,4 GHz) berpotensi menghadapi kendala teknis pada area perkebunan dengan cakupan geografis yang luas atau lokasi yang terisolasi. Hambatan utama muncul dari fenomena atenuasi sinyal yang dipicu oleh densitas vegetasi yang lebat serta keterbatasan jangkauan transmisi menuju *gateway* pusat. Kondisi lingkungan ini dapat mendegradasi stabilitas konektivitas, sehingga memerlukan pertimbangan penggunaan topologi jaringan alternatif guna menjamin kelancaran aliran data pada kondisi medan yang ekstrem.

3. Ancaman terhadap Validitas

Anomali cuaca, seperti intensitas curah hujan tinggi yang tidak terprediksi selama fase eksperimen, berpotensi mengaburkan (masking) efektivitas performa sistem secara temporal. Guna memitigasi bias tersebut, penelitian ini menerapkan durasi observasi jangka panjang selama 30 hari. Perpanjangan periode pengujian ini berfungsi untuk menstabilkan data dan menjamin bahwa validitas hasil yang diperoleh tetap representatif terhadap kondisi operasional yang sebenarnya, terlepas dari gangguan iklim sesaat.

E. Rekomendasi untuk Penelitian Masa Depan

Bersandar pada temuan serta batasan operasional yang telah diidentifikasi, penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengeksplorasi beberapa arah pengembangan strategis sebagai berikut:

1. Inovasi Konektivitas dan Topologi Jaringan

Disarankan untuk mengintegrasikan protokol komunikasi berdaya rendah dan jarak jauh, seperti LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), guna mengatasi kendala propagasi sinyal Wi-Fi pada area perkebunan yang luas dan terisolasi.

2. Optimasi Manajemen Energi Mandiri

Pengembangan sistem di masa depan perlu menitikberatkan pada implementasi unit catu daya terbarukan, seperti panel surya yang terintegrasi dengan algoritma *sleep-mode* cerdas pada ESP32, untuk mendukung keberlanjutan operasional secara otonom.

3. Ekspansi Kecerdasan Komputasional

Disarankan untuk memperluas basis pengetahuan *fuzzy* dengan menyertakan lebih banyak variabel lingkungan (seperti radiasi matahari dan ramalan cuaca berbasis API) serta melakukan kalibrasi multi-tanaman guna meningkatkan fleksibilitas dan skalabilitas sistem pada berbagai jenis komoditas agrikultur.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil memvalidasi rancang bangun serta implementasi sistem irigasi cerdas yang dioptimalkan melalui integrasi teknologi IoT dan Logika Fuzzy. Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis data, studi ini menyimpulkan beberapa poin fundamental sebagai jawaban atas tantangan otomasi cerdas dan efisiensi sumber daya di sektor agrikultur:

A. Optimalisasi Keputusan melalui Kecerdasan Komputasional

Pengadopsian *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada mikrokontroler ESP32 terbukti menjadi solusi yang tangguh dalam mengelola ambiguitas parameter lingkungan. Berbeda dengan model *threshold* konvensional, pendekatan *fuzzy* menawarkan mekanisme determinasi yang lebih adaptif, yang secara empiris mampu mereduksi konsumsi air hingga 37,3%. Temuan ini menegaskan bahwa efisiensi substansial dapat dicapai melalui kecerdasan *edge computing* yang ringan dan ekonomis.

B. Stabilitas Agrosistem dan Efisiensi Operasional

Arsitektur yang dikembangkan teruji mampu menjaga saturasi kelembapan tanah dalam rentang optimal (65%–75%) dengan tingkat konsistensi yang melampaui metode tradisional. Stabilitas ini berperan krusial dalam memitigasi stres fisiologis vegetasi akibat fluktuasi kadar air yang ekstrem. Lebih lanjut, otomasi ini berkorelasi positif terhadap penghematan biaya operasional serta peningkatan produktivitas lahan secara sistematis.

C. Evaluasi dan Proyeksi Pengembangan

Meskipun memberikan hasil signifikan, penelitian ini mencatat adanya batasan pada jangkauan konektivitas Wi-Fi serta urgensi kalibrasi sensor jangka panjang. Sebagai langkah pengembangan, integrasi protokol *Long Range* (LoRa) dan pemanfaatan energi surya (*solar harvesting*) menjadi esensial untuk meningkatkan skala layanan dan otonomi sistem. Pengembangan model hibrida antara *fuzzy* dan pembelajaran mesin juga diproyeksikan dapat menyempurnakan basis aturan keputusan di masa depan.

Secara holistik, penelitian ini menyajikan kerangka kerja pertanian presisi yang skalabel dan efisien. Temuan ini memberikan kontribusi praktis terhadap agenda global mengenai manajemen air berkelanjutan, sekaligus membuktikan bahwa sinergi teknologi IoT cerdas dapat menyelaraskan kemajuan inovasi dengan prinsip kelestarian lingkungan.

Kontribusi Penulis: **[Imam]:** Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan – Draf Asli, Penulisan – Tinjauan & Penyuntingan, Supervisi. **[Moh Gilank Alamsyah]:** Perangkat Lunak, Investasi, Kurasi Data, Penulisan, Draf Asli.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

Penulis Pertama: <https://orcid.org/0000-0001-9000-0001>

Penulis Kedua: <https://orcid.org/0000-0002-0000-0002>

Penulis Ketiga: -.

REFERENCES

- [1] G. G. Haile *et al.*, “Projected impacts of climate change on global irrigation water withdrawals,” *Agric. Water Manag.*, vol. 305, p. 109144, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.agwat.2024.109144.
- [2] S. Zipper *et al.*, “Estimating irrigation water use from remotely sensed evapotranspiration data: Accuracy and uncertainties at field, water right, and regional scales,” *Agric. Water Manag.*, vol. 303, p. 109036, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.agwat.2024.109036.
- [3] A. Morchid, R. Jebabra, H. M. Khalid, R. El Alami, H. Qjidaa, and M. Ouazzani Jamil, “IoT-based smart irrigation management system to enhance agricultural water security using embedded systems, telemetry data, and cloud computing,” *Results in Engineering*, vol. 23, p. 102829, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102829.
- [4] B. Siska Fiyana, “FARMER EMPOWERMENT INNOVATION IN RURAL IRRIGATION MANAGEMENT,” *Indonesian Journal of Social Responsibility Review (IJSRR)*, vol. 4, no. 1, Oct. 2025, doi: 10.55381/ijssr.v4i1.354.
- [5] H. Hernawati, Y. Syaikat, M. Firdaus, and H. K. Suwarsinah, “The Impact of Irrigation on The Allocative and Economic Efficiencies On Rice Farming: A Case Study in West Nusa Tenggara Province,” *Jurnal Manajemen dan Agribisnis*, Nov. 2023, doi: 10.17358/jma.20.3.491.
- [6] N. Shokri *et al.*, “Rethinking Global Soil Degradation: Drivers, Impacts, and Solutions,” *Reviews of Geophysics*, vol. 63, no. 4, Dec. 2025, doi: 10.1029/2025RG000883.
- [7] P. M. Kopittke *et al.*, “Soil degradation: An integrated model of the causes and drivers,” *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 13, no. 4, pp. 744–755, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.iswcr.2025.07.010.
- [8] R. Rahayu, “Implementasi Teknologi Internet of Things (IoT) dalam Meningkatkan Efisiensi Sistem Pertanian Modern,” *Mutiara: Multidiciplinary Scientifict Journal*, vol. 3, no. 9, pp. 906–918, Oct. 2025, doi: 10.57185/mutiara.v3i9.432.

- [9] A. Nurani, H. Taqiya Azza Nabila, and I. Bintang Herlambang, "PERAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM SISTEM IOT UNTUK PERTANIAN CERDAS," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 9, no. 1, pp. 1446–1455, Jan. 2025, doi: 10.36040/jati.v9i1.12705.
- [10] H. Sudibyo, F. T. Yuniko, A. Fadel, L. S. Lesmana, and R. Efendi, "SISTEM MONITORING BUDIDAYA PERIKANAN BERBASIS IOT FISH FEEDER SEBAGAI IMPLEMENTASI SMART FARMING," *JOISIE (Journal Of Information Systems And Informatics Engineering)*, vol. 8, no. 2, p. 236, Dec. 2024, doi: 10.35145/joisie.v8i2.4544.
- [11] Y. Li, "Remote Irrigation Control Based on LoRa Technology and Fuzzy PID Algorithm," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 122613–122627, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3586708.
- [12] A. Malik and C. Arif, "OPTIMASI PEMBERIAN AIR IRIGASI TANAMAN MELON (Cucumis Melo L.) PADA SISTEM POCKET FERTIGATION DENGAN ALGORITMA GENETIKA," *JURNAL SUMBER DAYA AIR*, vol. 19, no. 1, pp. 57–67, May 2023, doi: 10.32679/jsda.v19i1.825.
- [13] B. Srđević and Z. Srđević, "AI-Supported Reality: Revisiting Models and Techniques of Systems Analysis in Water Resources and Agriculture Management," *Water (Basel)*, vol. 18, no. 8, p. 914, Apr. 2026, doi: 10.3390/w18080914.
- [14] A. Jeyamurugan, S. B. Vijayan, K. G. A. Adaikkammai, B. Yamini, and N. M., "Green Computing and Big Data Analytics: Towards Sustainable and Eco-Efficient Systems," in *2025 5th International Conference on Evolutionary Computing and Mobile Sustainable Networks (ICECMSN)*, IEEE, Nov. 2025, pp. 372–379. doi: 10.1109/ICECMSN68058.2025.11382742.
- [15] S. Mahmood, M. Gohar, O. A. Khashan, N. Alzahrani, A. Ghani, and F. Al-Turjman, "Securing Edge Devices in IoT and 6G: A Trust-Based Approach for Resource-Constrained Environments," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 6, pp. 6568–6610, 2025, doi: 10.1109/OJCOMS.2025.3597556.
- [16] L. A. Pazmiño Ortiz, I. F. Maldonado Soliz, and V. K. Guevara Balarezo, "Advancing TinyML in IoT: A Holistic System-Level Perspective for Resource-Constrained AI," *Future Internet*, vol. 17, no. 6, p. 257, Jun. 2025, doi: 10.3390/fi17060257.
- [17] K. Wu *et al.*, "A Comprehensive Review of AI Methods in Agri-Food Engineering: Applications, Challenges, and Future Directions," *Electronics (Basel)*, vol. 14, no. 20, p. 3994, Oct. 2025, doi: 10.3390/electronics14203994.
- [18] S. S. Sefati, S. T. Sefati, A. Vulpe, and O. Fratu, "Adaptive QoS-Aware Service Composition in the Internet of Things Using a Hybrid Bayesian Network-Based Optimization Algorithm," *IEEE Internet Things J.*, pp. 1–1, 2026, doi: 10.1109/JIOT.2026.3678869.
- [19] N. E. Benti, M. D. Chaka, A. G. Semie, B. Warkineh, and T. Soromessa, "Transforming agriculture with Machine Learning, Deep Learning, and IoT: perspectives from Ethiopia—challenges and opportunities," *Discover Agriculture*, vol. 2, no. 1, p. 63, Oct. 2024, doi: 10.1007/s44279-024-00066-7.
- [20] Dani Rofianto *et al.*, "IoT-Based Smart Irrigation and Fertilization System with Realtime Cloud Integration," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 15, no. 1, pp. 34–43, Feb. 2026, doi: 10.22146/jnteti.v15i1.23124.
- [21] A. Khelloufi, H. Ning, S. Dhelim, and J. Ding, "Towards AGI-Enabled Solutions For IoX Layers Bottlenecks In Cyber-Physical-Social-Thinking Space," *IEEE Internet Things J.*, pp. 1–1, 2026, doi: 10.1109/JIOT.2026.3680236.
- [22] I. Hindi, A. Alsharkawi, M. Al-Ajlouni, and B. Qarallah, "Enhancing autonomous agriculture control systems in greenhouses for sustainable resource usage using deep learning techniques," *PLoS One*, vol. 21, no. 3, p. e0344946, Mar. 2026, doi: 10.1371/journal.pone.0344946.
- [23] M. S. Nur Alif and K. M. Dian Pertiwi, "Design and Implementation of an IoT-Based Smart Drip Irrigation System Using Takagi-Sugeno Fuzzy Logic for Melon Cultivation," *Journal of Applied Informatics and Computing*, vol. 9, no. 6, pp. 3499–3508, Dec. 2025, doi: 10.30871/jaic.v9i6.11424.
- [24] T. Wang, "Automatic batching compound fertilizer production system based on parallel bin structure," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Sep. 2024, doi: 10.1177/09544089241282858.
- [25] S. Sarmila, A. Achmad, and A. L. Arda, "Smart Waste Management Monitoring and Control Analysis Based on Objects Based on Smart Systems and Internet of Things," *Journal of Applied Informatics and Computing*, vol. 9, no. 6, pp. 3831–3839, Dec. 2025, doi: 10.30871/jaic.v9i6.11281.
- [26] Anton Maulana Ibrahim, "SMART FARMING: MONITORING SUHU DAN KELEMBABAN DENGAN WOKWI DAN THINGSPEAK," *Journal of Computer Science and Information Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 21–28, Dec. 2025, doi: 10.70248/jcsit.v3i1.3407.

- [27] M. F. Soambaton and A. Nugroho, "The Performance of Water Irrigation Control using Fuzzy-GA Approach," *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, vol. 14, no. 5, pp. 1582–1592, Sep. 2025, doi: 10.23960/jtepl.v14i5.1582-1592.
- [28] J. Pelekamoyo *et al.*, "Smart IoT-driven precision agriculture: Enhancing macro and micro nutrition efficiency and sustainability in modern agriculture and greenhouses," *Sci. Prog.*, vol. 109, no. 1, Jan. 2026, doi: 10.1177/00368504261434108.
- [29] A. Budiarto, D. Hadiani, and H. Ardiyanto, "Quality of Service Pengiriman Data dengan Menggunakan Wireless Sensor Network pada Prototype Greenhouse," *Indonesian Journal of Computer Science*, vol. 13, no. 3, Jun. 2024, doi: 10.33022/ijcs.v13i3.4070.
- [30] G. Ali, M. M. Mijwil, Bosco Apparatus Buruga, M. Abotaleb, and I. Adamopoulos, "A Survey on Artificial Intelligence in Cybersecurity for Smart Agriculture: State-of-the-Art, Cyber Threats, Artificial Intelligence Applications, and Ethical Concerns," *Mesopotamian Journal of Computer Science*, vol. 2024, pp. 53–103, Jul. 2024, doi: 10.58496/MJCSC/2024/007.
- [31] E. Erniati, F. E. Laumal, E. P. Hattu, and N. J. Lapinangga, "IoT-based Smart Control System on Dryland Agriculture: Opportunities and Challenges in Timor Island," *JURNAL GREEN HOUSE*, vol. 4, no. 1, Jul. 2025, doi: 10.63296/jgh.v4i1.50.
- [32] D. Supriyadi, B. Wahyudi, and D. Rimbawa, "Studi Pustaka: Optimalisasi Deteksi Malware melalui Integrasi Pembelajaran Mesin Heuristik dan Big Data untuk Keamanan Siber," *Komputa : Jurnal Ilmiah Komputer dan Informatika*, vol. 14, no. 1, pp. 77–87, May 2025, doi: 10.34010/komputa.v14i1.15595.
- [33] I. E. A. Pakpahan and Ubaidullah Hasibuan, "Analisis Kinerja Sensor DHT11 Pada Alat Pendeteksi Suhu Menggunakan Metode Fuzzy Logic," *JIKTEKS : Jurnal Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi*, vol. 3, no. 01, pp. 35–40, Dec. 2024, doi: 10.70404/jikteks.v3i01.144.
- [34] S. P. Andani, RAHMAD HIDAYAT LENDRIAN, S. Wati, and Jackson, "Analysis Of An Automatic Iot-Based Chili Plant Watering System Using Fuzzy Logic And The Adaline Algorithm," *Media Journal of General Computer Science*, vol. 3, no. 1, pp. 38–44, Jan. 2026, doi: 10.62205/mjgcs.v3i1.117.
- [35] X. Meng *et al.*, "High-resolution soil moisture mapping through passive microwave remote sensing downscaling," *The Innovation Geoscience*, vol. 2, no. 4, p. 100105, 2024, doi: 10.59717/j.xinn-geo.2024.100105.
- [36] J. Riquelme and I. Vourkas, "A Star Network of Bipolar Memristive Devices Enables Sensing and Temporal Computing," *Sensors*, vol. 24, no. 2, p. 512, Jan. 2024, doi: 10.3390/s24020512.
- [37] C. C. Bungau *et al.*, "Solutions for an Ecological and Healthy Retrofitting of Buildings on the Campus of the University of Oradea, Romania, Built Starting from 1911 to 1913," *Sustainability*, vol. 15, no. 8, p. 6541, Apr. 2023, doi: 10.3390/su15086541.
- [38] N. AbuAli and Z. Sabir, "Designing a heuristic computing structure to solve the human balancing model," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 36, no. 1, p. 101890, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jksuci.2023.101890.
- [39] X. Tian, J. Yao, H. Yu, W. Wang, and W. Huang, "Early contamination warning of Aflatoxin B1 in stored maize based on the dynamic change of catalase activity and data fusion of hyperspectral images," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 217, p. 108615, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.compag.2024.108615.
- [40] B. Malet-Damour, J.-P. Habas, and D. Bigot, "Is Loose-Fill Plastic Waste an Opportunity for Thermal Insulation in Cold and Humid Tropical Climates?," *Sustainability*, vol. 15, no. 12, p. 9483, Jun. 2023, doi: 10.3390/su15129483.
- [41] S. R. Baek and J. Jang, "A two-stage semi-supervised object detection method for SAR images with missing labels based on meta pseudo-labels," *Expert Syst. Appl.*, vol. 236, p. 121405, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.121405.
- [42] L. Wrenger, D. Töllner, and D. Lohmann, "Analyzing the memory ordering models of the Apple M1," *Journal of Systems Architecture*, vol. 149, p. 103102, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.sysarc.2024.103102.
- [43] F. P. E. Putra, M. Irfan, M. Aziz, and ..., "Wireless Network Design at Pamekasan Regency Public Library," *Brilliance: Research of ...*, 2025, [Online]. Available: <https://itscience-indexing.com/jurnal/index.php/brilliance/article/view/5876>
- [44] F. P. E. Putra, R. M. Ilhamsyah, and ..., "Implementation And Evaluation Of Zerotier-Based Virtual Network For Device Connectivity," *Brilliance: Research of ...*, 2025, [Online]. Available: <https://itscience-indexing.com/jurnal/index.php/brilliance/article/view/5966>
- [45] K. Kwoka *et al.*, "Impedance spectroscopy of electrostatically driven MEMS resonators," *Measurement*, vol. 215, p. 112845, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.112845.

- [46] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. O. F. Kusuma, and ..., "Effect Of Distance On Wi-Fi Signal Quality In The Home Environment," *Brilliance: Research ...*, 2024, [Online]. Available: <https://itscience-indexing.com/jurnal/index.php/brilliance/article/view/4319>
- [47] F. P. E. Putra, M. Riski, M. S. Yahya, and ..., "Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G," *Jurnal Sistim Informasi ...*, 2023, [Online]. Available: <http://www.jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/233>
- [48] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, and ..., "Tinjauan performa RouterOS Mikrotik dalam jaringan internet: Analisis kinerja dan kelayakan," *Digital ...*, 2023, [Online]. Available: <https://itscience-indexing.com/jurnal/index.php/digitech/article/view/3446>
- [49] X. Chen, C. Chen, and X. Deng, "Distributed soft video transmission based on hybrid digital and analog scheme," *Internet of Things*, vol. 25, p. 101011, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.iot.2023.101011.
- [50] F. P. E. Putra, A. Zulfikri, G. Arifin, and ..., "Analysis of phishing attack trends, impacts and prevention methods: literature study," *... : Research of Artificial ...*, 2024, [Online]. Available: <https://itscience-indexing.com/jurnal/index.php/brilliance/article/view/4357>
- [51] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. Hamzah, and ..., "Systematic literature review: Security gap detection on websites using OWASP ZAP," *Brilliance: Research ...*, 2024, [Online]. Available: <https://itscience-indexing.com/jurnal/index.php/brilliance/article/view/4227>
- [52] F. P. E. Putra, A. Hamzah, W. Agel, and ..., "Impelementasi Sistem Keamanan Jaringan Mikrotik Menggunakan Firewall Filtering dan Port Knocking," *Jurnal Sistim Informasi ...*, 2023, [Online]. Available: <https://ipv6.jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/329>
- [53] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. N. Saputra, and ..., "Application of Internet of Things technology in monitoring water quality in fishponds," *Brilliance: Research ...*, 2024, [Online]. Available: <https://itscience-indexing.com/jurnal/index.php/brilliance/article/view/4231>
- [54] F. P. E. Putra, M. Dafid, and I. Syafi'i, "Firewall Implementation as a Computer Network Security Strategy for Data Protection," *Brilliance: Research of Artificial ...*, 2025, [Online]. Available: <https://itscience-indexing.com/jurnal/index.php/brilliance/article/view/6162>