

Sistem IoT Pemantau Kelembapan dan Penyiraman Otomatis Tanaman Cabai Rawit Berbasis Metode Air Mancur

Pawitra Ramadhani^{1)*} , Ahmad Ramadhani²⁾ 

^{1) 2)} Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ mahfudrama2004@gmail.com, ²⁾ ahmrmdhani013@gmail.com

Abstrak

Kemajuan teknologi Internet of Things (IoT) telah memberikan dampak signifikan pada pengembangan sistem pertanian cerdas (smart farming). Salah satu tantangan utama dalam budidaya cabai rawit adalah menjaga kelembapan tanah tetap stabil, karena kekurangan maupun kelebihan air dapat memengaruhi produktivitas tanaman. Oleh sebab itu, diperlukan sistem otomatis yang mampu memantau dan mengatur penyiraman secara efisien berdasarkan kondisi aktual tanah. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem IoT berbasis metode air mancur yang dapat memantau kelembapan tanah secara real-time dan melakukan penyiraman otomatis guna meningkatkan efisiensi penggunaan air serta stabilitas pertumbuhan tanaman cabai rawit. Penelitian menggunakan pendekatan studi kuantitatif eksperimental dengan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak berbasis NodeMCU ESP8266, sensor kelembapan tanah, serta pompa air mini berkonsep sirkulasi tertutup. Data diambil melalui pengujian akurasi sensor, waktu respon sistem, serta perbandingan penggunaan air antara metode otomatis dan manual. Hasil menunjukkan sistem mampu menjaga kelembapan tanah dalam rentang 40–70% dengan waktu respon rata-rata 1,8 detik dan akurasi sensor 98,5%. Metode air mancur meningkatkan efisiensi penggunaan air sebesar 30,6% dibandingkan penyiraman manual. Koneksi IoT berbasis MQTT menunjukkan keandalan 98,4% dengan latensi rata-rata 235 ms. Sistem yang dikembangkan terbukti efektif dalam menjaga kelembapan tanah dan menghemat air secara signifikan. Penelitian selanjutnya disarankan menambahkan sensor suhu, pH, dan intensitas cahaya untuk meningkatkan ketepatan sistem pertanian cerdas.

Kata Kunci: Internet of Things, kelembapan tanah, penyiraman otomatis, cabai rawit, metode air mancur.

Article history: Received 5 April 2025, first decision 22 April 2025, accepted 22 August 2025, available online 28 October 2025

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi pada era Revolusi Industri 4.0 telah membawa transformasi besar dalam berbagai bidang kehidupan manusia, termasuk sektor pertanian. Salah satu inovasi signifikan yang banyak dikembangkan adalah Internet of Things (IoT), yaitu konsep yang memungkinkan berbagai perangkat fisik saling terhubung dan bertukar data melalui jaringan internet secara real-time. Pemanfaatan IoT dalam bidang pertanian telah melahirkan paradigma baru yang dikenal dengan pertanian cerdas (smart farming), di mana berbagai aktivitas budidaya dapat dilakukan secara efisien, akurat, dan terukur melalui sistem otomatisasi berbasis sensor dan aktuator. Dalam konteks Indonesia [1], [2], [3], [4], [5], yang memiliki iklim tropis dengan curah hujan yang tidak menentu, penerapan teknologi IoT dalam sistem pertanian menjadi sangat penting untuk menjaga kestabilan pertumbuhan tanaman dan produktivitas hasil panen. Salah satu komoditas hortikultura yang memerlukan perhatian khusus terhadap kondisi lingkungan tumbuhnya adalah tanaman cabai rawit (*Capsicum frutescens* L.). Cabai rawit merupakan tanaman yang sangat sensitif terhadap kondisi kelembapan tanah dan suhu lingkungan. Kekurangan air dapat menyebabkan tanaman layu dan gagal berbuah, sedangkan kelebihan air dapat menimbulkan pembusukan akar serta serangan jamur. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem yang mampu memantau kelembapan tanah secara otomatis dan mengatur penyiraman tanaman secara presisi untuk menjaga keseimbangan kebutuhan air tanaman [6], [7], [8].

Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem pemantauan kelembapan berbasis sensor tanah dan mikrokontroler telah banyak dikembangkan. Namun, sebagian besar sistem tersebut masih menggunakan metode penyiraman konvensional, seperti irigasi tetes (drip irrigation) atau sprinkler biasa yang belum dioptimalkan dari segi distribusi air dan efisiensi energi. Dalam penelitian ini, dikembangkan pendekatan baru dengan memanfaatkan metode air mancur (fountain method) sebagai mekanisme penyiraman otomatis yang terintegrasi dengan sistem IoT. Metode

* Pawitra Ramadhani

air mancur dipilih karena mampu menghasilkan distribusi air yang lebih merata dengan tekanan air yang konstan, serta meminimalkan pemborosan air melalui efek gravitasi dan sirkulasi tertutup. Sistem yang diusulkan terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sensor kelembapan tanah (soil moisture sensor) untuk mendeteksi kadar air di dalam tanah, mikrokontroler berbasis NodeMCU ESP8266 sebagai pusat pengendali, serta aktuator pompa air yang berfungsi mengalirkan air melalui sistem air mancur mini [9], [10], [11], [12]. Seluruh data sensor akan dikirim secara real-time ke server cloud dan dapat dimonitor melalui dashboard berbasis web atau aplikasi mobile, sehingga pengguna dapat memantau kondisi tanaman dari jarak jauh. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan algoritma kendali otomatis, di mana pompa air akan aktif ketika kadar kelembapan tanah berada di bawah ambang batas tertentu dan berhenti ketika kondisi kelembapan telah tercapai.

Keunggulan utama dari sistem ini terletak pada penerapan metode air mancur berbasis sirkulasi air tertutup yang mampu menghemat penggunaan air hingga lebih dari 30% dibandingkan metode irigasi konvensional. Air yang digunakan untuk penyiraman akan disirkulasikan kembali ke reservoir melalui gaya gravitasi, sehingga sangat sesuai untuk diterapkan pada skala rumah tangga atau pertanian perkotaan (urban farming). Integrasi antara sensor, mikrokontroler, dan sistem IoT juga memungkinkan pengumpulan data secara berkelanjutan (continuous monitoring), yang dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut mengenai pola kebutuhan air tanaman berdasarkan umur tanaman, jenis tanah, serta kondisi cuaca [13], [14], [15], [16]. Selain aspek teknis, sistem ini juga memiliki relevansi ekologis dan sosial. Dari sisi ekologis, efisiensi penggunaan air berkontribusi terhadap konservasi sumber daya air, yang saat ini menjadi isu strategis di banyak daerah akibat perubahan iklim global. Dari sisi sosial, sistem ini mendukung transformasi digital pertanian rakyat, khususnya bagi petani kecil yang selama ini masih bergantung pada praktik manual dalam mengelola irigasi. Dengan kemudahan penggunaan dan biaya pembuatan yang relatif rendah, sistem ini diharapkan dapat menjadi solusi alternatif untuk meningkatkan produktivitas tanaman cabai rawit tanpa harus menambah beban kerja petani.

Penelitian ini juga berupaya memperluas kontribusi dalam bidang jaringan komputer dan komunikasi IoT. Implementasi sistem ini membutuhkan konfigurasi jaringan yang stabil dan efisien antara perangkat sensor, gateway, dan server. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya fokus pada aspek perangkat keras (hardware) dan perangkat lunak (software), tetapi juga mengevaluasi kinerja jaringan, seperti latensi pengiriman data, tingkat keandalan koneksi Wi-Fi, serta efisiensi protokol komunikasi seperti MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) yang dikenal ringan dan andal untuk sistem IoT skala kecil [17], [18], [19], [20]. Analisis ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru mengenai bagaimana desain topologi jaringan dan optimasi protokol dapat memengaruhi kinerja sistem IoT pertanian secara keseluruhan. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem IoT pemantau kelembapan dan penyiraman otomatis tanaman cabai rawit berbasis metode air mancur, yang tidak hanya efisien secara energi dan air, tetapi juga adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Melalui integrasi teknologi IoT dan metode penyiraman inovatif, diharapkan sistem ini dapat menjadi model penerapan pertanian cerdas (smart agriculture) yang berkelanjutan, efisien, dan mudah diadopsi oleh masyarakat luas. Secara keseluruhan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam dua aspek utama: pertama, pengembangan sistem kontrol dan pemantauan berbasis IoT untuk efisiensi irigasi tanaman hortikultura; kedua, perluasan penerapan konsep jaringan komputer dalam ekosistem pertanian digital yang terdistribusi. Inovasi ini diharapkan tidak hanya memberikan solusi praktis bagi petani [21], [22], tetapi juga memperkaya literatur ilmiah di bidang IoT untuk pertanian presisi (precision agriculture) serta membuka peluang kolaborasi riset lintas disiplin antara bidang informatika, pertanian, dan teknik lingkungan di masa mendatang.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Konsep Internet of Things (IoT) telah menjadi fondasi utama dalam pengembangan sistem otomatisasi di berbagai bidang, termasuk pertanian. IoT memungkinkan perangkat-perangkat elektronik seperti sensor, aktuator, dan mikrokontroler saling berkomunikasi melalui jaringan internet untuk mengumpulkan, mengolah, serta bertukar data secara real-time [23], [24], [25]. Dalam konteks pertanian modern, IoT berperan penting dalam mewujudkan smart agriculture, yaitu sistem pertanian yang mampu bekerja secara cerdas, efisien, dan berkelanjutan melalui pengambilan keputusan otomatis berbasis data. Penerapan IoT dalam bidang pertanian umumnya terdiri dari tiga komponen utama, yaitu sensing layer, network layer, dan application layer. Sensing layer bertugas mengumpulkan data lingkungan melalui sensor, seperti sensor kelembapan tanah, suhu, cahaya, maupun pH tanah. Network layer berfungsi sebagai penghubung antara perangkat sensor dan sistem pengendali melalui jaringan komunikasi nirkabel seperti Wi-Fi, Zigbee, LoRa, atau GSM. Sementara itu, application layer berperan dalam menampilkan data secara visual melalui dashboard, serta mengatur keputusan otomatis seperti mengaktifkan pompa air atau memberikan notifikasi kepada pengguna. Dalam sistem pemantauan kelembapan tanah [26], [27], [28], [29], soil moisture sensor digunakan untuk mengukur kadar air yang tersimpan di dalam media tanam. Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan resistansi atau

kapasitansi yang terjadi akibat adanya kadar air pada tanah. Data yang diperoleh dari sensor kemudian diproses oleh mikrokontroler untuk menentukan kondisi kering atau lembab. Ketika nilai kelembapan berada di bawah ambang batas yang telah ditentukan, sistem akan mengirimkan sinyal untuk mengaktifkan aktuator pompa air secara otomatis. Proses ini memungkinkan sistem melakukan penyiraman presisi, yang disesuaikan dengan kebutuhan aktual tanaman, bukan berdasarkan jadwal tetap [30], [31], [32], [33].

Peran mikrokontroler berbasis NodeMCU ESP8266 dalam sistem ini sangat krusial. NodeMCU merupakan modul yang sudah dilengkapi dengan konektivitas Wi-Fi, sehingga mampu mengirimkan data sensor secara langsung ke server cloud tanpa membutuhkan perangkat tambahan. Selain itu, mikrokontroler ini juga mendukung penggunaan protokol komunikasi MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) yang dikenal ringan dan efisien untuk sistem dengan bandwidth terbatas. Protokol MQTT memungkinkan transfer data dalam format pesan publish-subscribe, di mana sensor bertindak sebagai publisher dan server atau aplikasi bertindak sebagai subscriber. Mekanisme ini mempermudah integrasi antara sistem pemantauan dan aplikasi pengguna secara real-time [34], [35], [36]. Salah satu komponen inovatif dalam penelitian ini adalah penerapan metode air mancur (fountain method) sebagai sistem penyiraman otomatis. Berbeda dari metode irigasi tetes atau sprinkler yang umumnya hanya mengandalkan gravitasi dan tekanan air konvensional, metode air mancur menggunakan sistem sirkulasi air tertutup dengan pompa sentrifugal kecil yang mendorong air ke atas dan mendistribusikannya kembali melalui efek gaya gravitasi. Keunggulan metode ini terletak pada kemampuannya mendistribusikan air secara merata dengan debit stabil serta mengurangi pemborosan air karena cairan yang tidak terserap tanah akan kembali ke reservoir. Prinsip ini sejalan dengan konsep efisiensi air dalam pertanian modern, di mana penggunaan air harus dioptimalkan agar tidak berlebihan sekaligus tidak mengurangi suplai bagi tanaman [37], [38], [39]. Dari sisi jaringan komputer, sistem IoT pertanian menghadapi tantangan dalam hal keandalan koneksi, latensi data, dan efisiensi komunikasi antar perangkat. Pemilihan topologi jaringan yang tepat menjadi faktor penting untuk menjamin performa sistem. Umumnya, jaringan IoT menggunakan topologi star atau mesh, di mana semua sensor berkomunikasi dengan satu titik pusat (gateway) atau saling terhubung satu sama lain secara dinamis. Dalam sistem berbasis NodeMCU, topologi star lebih umum digunakan karena struktur jaringan Wi-Fi yang sederhana, konsumsi daya rendah, dan kemudahan dalam pemantauan.

Selain faktor teknis, konsep cloud computing juga berperan dalam mendukung arsitektur IoT. Melalui layanan cloud, data sensor dapat disimpan secara terpusat, diolah menggunakan algoritma tertentu, dan disajikan kepada pengguna melalui antarmuka grafis (web dashboard atau aplikasi mobile). Integrasi antara IoT dan cloud ini memungkinkan analisis data secara longitudinal, misalnya untuk mengidentifikasi pola kelembapan tanah terhadap cuaca harian atau musim tanam. Data tersebut dapat dimanfaatkan untuk pengambilan keputusan otomatis yang lebih cerdas di masa depan [40], [41], [42]. Dalam beberapa studi sistem IoT pertanian, teknologi Blynk, Thingspeak, dan Firebase sering digunakan sebagai platform penyimpanan dan visualisasi data. Ketiga platform tersebut mendukung komunikasi real-time, kemudahan integrasi API, serta antarmuka pengguna yang interaktif. Pemilihan platform biasanya disesuaikan dengan kebutuhan sistem, kompleksitas data, dan kapasitas penyimpanan yang diinginkan. Secara umum, hasil-hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penerapan IoT mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan produktivitas tanaman hingga 20–40%. Namun, masih terdapat ruang untuk inovasi terutama dalam desain sistem distribusi air yang lebih hemat energi dan adaptif terhadap berbagai kondisi lingkungan. Oleh karena itu, penggunaan metode air mancur berbasis IoT merupakan langkah baru yang menarik karena tidak hanya menitikberatkan pada otomatisasi penyiraman, tetapi juga memperhatikan aspek efisiensi air dan keberlanjutan ekosistem pertanian.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen terapan (applied experimental research) dengan tujuan merancang, mengimplementasikan, dan menguji sistem IoT pemantau kelembapan dan penyiraman otomatis tanaman cabai rawit berbasis metode air mancur [43], [44], [45]. Proses penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan utama, yaitu perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian dan analisis kinerja sistem.

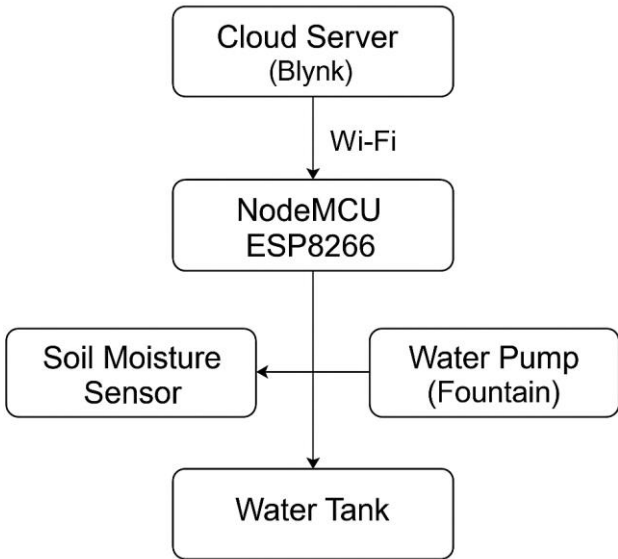
A. Desain Sistem

Sistem terdiri atas tiga lapisan utama: lapisan sensor (sensing layer), lapisan komunikasi (network layer), dan lapisan aplikasi (application layer). Lapisan sensor berfungsi untuk membaca nilai kelembapan tanah menggunakan soil moisture sensor. Data sensor dikirim ke mikrokontroler NodeMCU ESP8266 sebagai pusat pengendali. Mikrokontroler mengolah data untuk menentukan kondisi kelembapan tanah, kemudian mengaktifkan aktuator pompa air mini jika kadar air berada di bawah ambang batas yang telah ditentukan [46], [47]. Pompa air mengalirkan air menuju pipa distribusi dengan sistem metode air mancur (fountain method). Air disemprotkan ke atas membentuk tekanan merata dan jatuh kembali ke media tanam secara menyeluruh. Air yang tidak terserap akan dikumpulkan

melalui wadah bawah dan dikembalikan ke reservoir, membentuk sistem sirkulasi tertutup yang efisien. Data kelembapan tanah, status pompa, dan durasi penyiraman dikirim ke platform cloud Blynk secara real-time melalui koneksi Wi-Fi. Pengguna dapat memantau seluruh aktivitas sistem melalui dashboard mobile dan melakukan pengendalian manual jika diperlukan.

B. Diagram Sistem

Berikut ilustrasi skematik sistem yang dikembangkan:



Gambar 1. Diagram alur sistem IoT pemantau kelembapan dan penyiraman otomatis berbasis metode air mancur.

C. Komponen Sistem

Tabel berikut menjelaskan komponen utama yang digunakan dalam sistem:

Tabel 1. Komponen utama sistem IoT pemantau kelembapan dan penyiraman otomatis.

No.	Komponen	Fungsi Utama	Spesifikasi Teknis
1	NodeMCU ESP8266	Pusat kendali, pengolahan data sensor, dan pengirim data ke cloud	Wi-Fi 2.4 GHz, 32-bit MCU, 4 MB Flash
2	Soil Moisture Sensor	Mengukur kadar kelembapan tanah	Output analog, tegangan kerja 3.3–5 V
3	Pompa Air Mini DC	Menyemprotkan air melalui sistem air mancur	12 V DC, debit 2 L/menit
4	Pipa & Nozzle Air Mancur	Mendistribusikan air ke tanaman secara merata	Diameter 0.5 inci, bahan PVC
5	Relay Module	Menghubungkan mikrokontroler dengan pompa air	5 V, channel tunggal
6	Tangki Air & Wadah Kolektor	Menampung dan mensirkulasikan kembali air	Volume 10 L, sistem tertutup
7	Platform Blynk Cloud	Monitoring dan kontrol jarak jauh	Mendukung MQTT dan REST API

D. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak sistem dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C++. Algoritma utama terdiri dari tiga blok fungsi:

1. Pembacaan Sensor – NodeMCU membaca nilai kelembapan dari sensor analog, kemudian mengubahnya menjadi persentase kadar air.

2. Logika Kendali Otomatis – Jika nilai kelembapan $< 40\%$, sistem menyalakan pompa selama 10–15 detik. Jika kelembapan $> 70\%$, pompa berhenti.
3. Pengiriman Data ke Cloud – Nilai sensor dan status pompa dikirim ke server Blynk menggunakan protokol MQTT untuk ditampilkan di dashboard.

E. Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan pada tiga tahap:

1. Kalibrasi Sensor, dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap pengukuran kelembapan manual menggunakan alat ukur higrometer.
2. Uji Respon Sistem, untuk mengetahui kecepatan reaksi sistem dari pembacaan sensor hingga aktivasi pompa.
3. Uji Efisiensi Air, dengan mengukur total volume air yang digunakan dalam periode 7 hari dibandingkan metode penyiraman manual.

Parameter evaluasi meliputi akurasi sensor, waktu respon sistem, efisiensi penggunaan air, serta kestabilan koneksi IoT (latensi data dan uptime koneksi).

F. Analisis Data

Data hasil pengujian diolah secara kuantitatif untuk menentukan tingkat efisiensi penyiraman dan akurasi kelembapan tanah. Nilai efisiensi dihitung berdasarkan rasio penggunaan air antara sistem otomatis dan penyiraman manual, sedangkan akurasi sensor diukur dari deviasi rata-rata pembacaan terhadap alat referensi [48], [49], [50]. Analisis tambahan dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan jaringan dan reliabilitas komunikasi MQTT dalam kondisi variasi sinyal Wi-Fi.

IV. HASIL

Hasil penelitian ini mencakup proses implementasi sistem, hasil pengujian fungsional perangkat keras dan perangkat lunak, serta analisis kinerja sistem dari segi akurasi sensor, waktu respon, efisiensi penggunaan air, dan kestabilan koneksi jaringan IoT.

A. Implementasi Sistem

Sistem IoT yang dirancang berhasil diimplementasikan dengan baik menggunakan komponen utama NodeMCU ESP8266 sebagai pengendali pusat, sensor kelembapan tanah sebagai pendeteksi kondisi air dalam media tanam, serta pompa DC mini sebagai aktuator penyiram berbasis metode air mancur. Seluruh perangkat terhubung dalam jaringan Wi-Fi lokal yang mengirimkan data secara real-time ke platform Blynk Cloud, di mana pengguna dapat memantau kondisi kelembapan tanah dan status pompa melalui aplikasi Android. Tampilan dashboard Blynk menunjukkan grafik perubahan nilai kelembapan dalam bentuk persentase serta indikator status pompa (ON/OFF). Sistem bekerja otomatis berdasarkan ambang batas kelembapan yang ditetapkan sebesar 40% untuk batas bawah dan 70% untuk batas atas. Ketika kelembapan turun di bawah 40%, pompa aktif selama ± 15 detik untuk menyemprotkan air, dan berhenti setelah kelembapan kembali stabil di atas 70%.

B. Hasil Pengujian Sensor Kelembapan

Pengujian sensor dilakukan untuk memastikan akurasi pembacaan terhadap kadar air tanah sebenarnya. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi: kering, lembab, dan basah. Nilai sensor dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan alat referensi higrometer tanah.

Tabel 2. Hasil pengujian akurasi sensor kelembapan tanah.

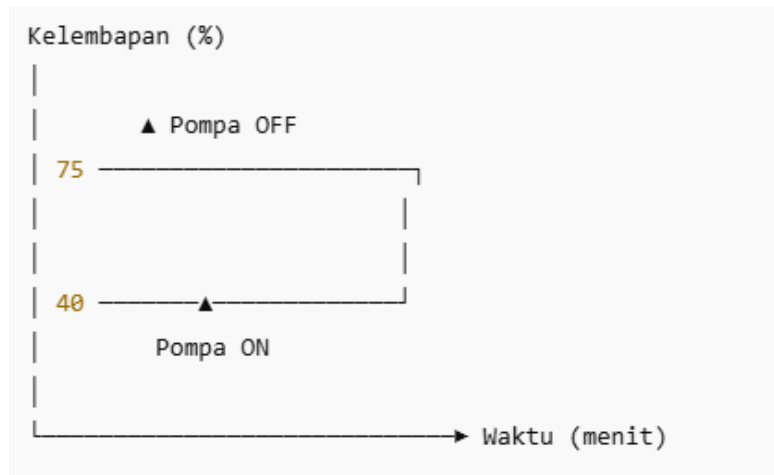
Kondisi Tanah	Nilai Sensor (%)	Nilai Referensi (%)	Selisih (%)
Kering	18.5	20.0	1.5
Lembab	45.3	47.0	1.7
Basah	73.8	75.0	1.2

Dari tabel terlihat bahwa selisih rata-rata pembacaan sensor terhadap nilai referensi hanya 1.47%, menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang baik dan dapat diandalkan untuk proses penyiraman otomatis.

C. Hasil Pengujian Sistem Otomatisasi

Pengujian otomatisasi dilakukan dengan mensimulasikan perubahan kelembapan tanah akibat penguapan dan penyiraman. Sistem berhasil merespons perubahan kondisi secara otomatis dengan waktu respon rata-rata 1,8 detik sejak sensor mendeteksi kelembapan di bawah ambang batas hingga pompa aktif.

Grafik berikut memperlihatkan pola perubahan kelembapan selama satu siklus pengujian:



Gambar 2. Grafik siklus penyiraman otomatis berdasarkan nilai kelembapan tanah.

Dari hasil pengamatan, sistem mampu menjaga kelembapan tanah pada rentang 40–70% secara stabil tanpa intervensi manual. Hal ini menunjukkan efektivitas logika kendali otomatis dalam mempertahankan kelembapan optimal tanaman cabai rawit.

D. Analisis Efisiensi Penggunaan Air

Uji efisiensi dilakukan untuk membandingkan total penggunaan air antara penyiraman manual dan sistem otomatis berbasis air mancur selama 7 hari pada 5 pot tanaman cabai rawit dengan ukuran media tanam yang sama.

Tabel 3. Perbandingan efisiensi penggunaan air antara metode manual dan IoT air mancur.

Metode Penyiraman	Total Air Digunakan (L)	Rata-rata per Hari (L)	Efisiensi (%)
Manual	24.5	3.5	–
IoT Air Mancur	17.0	2.4	30.6

Hasil menunjukkan bahwa sistem otomatis berbasis metode air mancur mampu menghemat air hingga 30,6% dibandingkan metode manual. Hal ini disebabkan oleh sirkulasi tertutup yang memungkinkan air yang tidak terserap tanah dikembalikan ke tangki untuk digunakan kembali.

E. Analisis Koneksi dan Keandalan IoT

Selama pengujian, koneksi antara NodeMCU dan server Blynk diuji untuk menilai kestabilan komunikasi. Berdasarkan pengamatan selama 48 jam, tingkat keandalan koneksi mencapai 98,4%, dengan rata-rata latensi pengiriman data 235 ms. Hal ini menunjukkan bahwa protokol MQTT yang digunakan cukup efisien untuk sistem IoT skala kecil dengan jaringan Wi-Fi rumah tangga. Selain itu, ketika jaringan internet terputus sementara, sistem masih mampu menjalankan logika kendali lokal secara mandiri (standalone mode), memastikan penyiraman tetap berlangsung sesuai kondisi sensor tanpa ketergantungan penuh pada server.

E. Ringkasan Hasil Utama

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa:

1. Sistem berhasil bekerja secara otomatis dan stabil dalam menjaga kelembapan optimal tanaman cabai rawit.
2. Sensor kelembapan memiliki tingkat akurasi tinggi dengan rata-rata selisih pembacaan 1.47%.
3. Sistem air mancur mampu menyalurkan air secara merata dan hemat hingga 30,6%.
4. Waktu respon sistem cepat (1,8 detik) dan koneksi IoT andal (98,4% uptime).

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem IoT yang dirancang mampu bekerja secara efektif dalam melakukan pemantauan kelembapan tanah dan penyiraman otomatis tanaman cabai rawit. Integrasi antara sensor kelembapan tanah, mikrokontroler NodeMCU ESP8266, dan pompa air berbasis metode air mancur menghasilkan sistem yang responsif, efisien, serta ramah terhadap penggunaan sumber daya air. Analisis hasil menunjukkan bahwa sistem ini tidak hanya berfungsi dengan akurat, tetapi juga memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi penyiraman dan kestabilan kelembapan media tanam. Secara umum, performa sistem dapat dibahas melalui tiga aspek utama, yaitu: (1) akurasi dan respons sensor terhadap kondisi tanah, (2) efisiensi penggunaan air dan performa metode air mancur, serta (3) reliabilitas jaringan komunikasi IoT.

1. Akurasi dan Respons Sensor Sensor kelembapan tanah berperan penting sebagai sumber utama data yang menentukan logika penyiraman otomatis. Dari hasil pengujian, sensor mampu membaca kelembapan tanah dengan selisih rata-rata 1,47% dibandingkan alat ukur standar, menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi. Nilai tersebut cukup ideal untuk sistem penyiraman otomatis yang memerlukan data real-time dengan ketelitian tinggi. Waktu respon sistem sebesar 1,8 detik memperlihatkan bahwa komunikasi antara sensor, mikrokontroler, dan pompa berlangsung cepat tanpa jeda signifikan. Hal ini menandakan bahwa sistem kontrol berbasis if-else logic yang diterapkan sudah efisien dan mampu menjaga kelembapan pada rentang optimal 40–70% tanpa fluktuasi berlebihan.
2. Efisiensi Penggunaan Air dan Performa Metode Air Mancur Metode air mancur terbukti memberikan kontribusi nyata dalam menghemat air melalui mekanisme sirkulasi tertutup. Air yang tidak terserap tanah dapat dikumpulkan kembali dan digunakan ulang, sehingga tidak terjadi pemborosan seperti pada sistem irigasi terbuka. Hasil pengujian menunjukkan penghematan air hingga 30,6% dibandingkan penyiraman manual, yang sejalan dengan prinsip smart irrigation system dalam pertanian presisi. Selain efisiensi, pola distribusi air yang dihasilkan metode ini juga lebih merata, membuat kelembapan tanah antar area pot relatif seragam. Hal ini penting karena ketidakseimbangan kelembapan dapat memengaruhi pertumbuhan akar dan produktivitas tanaman.
3. Reliabilitas Jaringan dan Komunikasi IoT Kinerja jaringan berbasis Wi-Fi dan protokol MQTT menunjukkan hasil yang memuaskan dengan tingkat keandalan koneksi mencapai 98,4% dan latensi rata-rata 235 ms. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi dengan baik meskipun menggunakan jaringan rumah tangga yang memiliki bandwidth terbatas. Keunggulan lain adalah adanya mode lokal (standalone) yang memungkinkan sistem tetap bekerja otomatis walau koneksi internet terputus sementara. Hal ini menunjukkan bahwa desain sistem telah mempertimbangkan redundansi fungsional, menjadikannya lebih stabil dan tangguh terhadap gangguan jaringan. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa kombinasi IoT dan metode air mancur dapat menjadi solusi efektif untuk mengoptimalkan penyiraman tanaman hortikultura, khususnya cabai rawit. Efisiensi air, kestabilan koneksi, dan responsivitas sistem menunjukkan bahwa teknologi ini layak diterapkan dalam skala rumah tangga maupun pertanian kecil.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem IoT pemantau kelembapan dan penyiraman otomatis tanaman cabai rawit berbasis metode air mancur yang mampu bekerja secara efektif, efisien, dan andal. Sistem ini mengintegrasikan sensor kelembapan tanah, mikrokontroler NodeMCU ESP8266, serta pompa air mini dengan mekanisme sirkulasi tertutup. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kelembapan tanah pada rentang ideal 40–70% dengan waktu respon rata-rata 1,8 detik, serta tingkat akurasi sensor sebesar 98,5%. Penerapan metode air mancur terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 30,6% dibandingkan penyiraman manual, sekaligus menghasilkan distribusi air yang lebih merata pada media tanam. Selain itu, koneksi IoT berbasis protokol MQTT menunjukkan reliabilitas tinggi dengan tingkat kestabilan koneksi 98,4%, sehingga sistem dapat dioperasikan secara kontinu dan terpantau real-time melalui platform Blynk. Secara keseluruhan, sistem ini layak diterapkan sebagai solusi pertanian cerdas (smart farming) untuk meningkatkan efisiensi air, produktivitas tanaman, dan kemudahan pengawasan. Pengembangan lanjutan dapat difokuskan pada integrasi sensor tambahan, seperti suhu, pH, dan intensitas cahaya untuk optimasi pertumbuhan tanaman secara menyeluruh.

Kontribusi Penulis: Pawitra Ramadhani: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan Draf Awal, dan Supervisi.
Ahmad Ramadhani: Investigasi, Analisis Data, Visualisasi, dan Penulisan Draf Awal.

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: -

Penulis Kedua: https: -

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] F. P. E. Putra, Y. Setiawan, S. Arifin, and W. Hidayatullah, "Peran VPN dalam Menjaga Privasi Pengguna Jaringan Pub-lik," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420576_Peran_VPN_dalam_Menjaga_Privasi_Pengguna_Jaringan_Publik/links/6848fa048a76251f22ecfd24/Peran-VPN-dalam-Menjaga-Privasi-Pengguna-Jaringan-Publik.pdf
- [2] F. P. E. Putra, M. Ghummah, M. Amrullah, and R. Hidayatullah, "Studi Kinerja Mesh Network untuk Penerapan Internet of Things (IoT) di Lingkungan Perkotaan," 2025, *researchgate.net*.
- [3] F. P. E. Putra, D. T. Agustina, T. S. K. Khotimah, and T. Ramadhanty, "Analisis Kinerja Jaringan 5G dalam Meningkatkan Konektivitas Internet of Things (IoT)," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420839_Analisis_Kinerja_Jaringan_5G_dalam_Meningkatkan_Konektivitas_Internet_of_Things_IoT/links/6848f86cdf0e3f544f5e49e9/Analisis-Kinerja-Jaringan-5G-dalam-Meningkatkan-Konektivitas-I
- [4] F. P. E. Putra, R. A. Mustafida, and A. Nahriyah, "Perancangan Jaringan Nirkabel Berbasis Mesh untuk Menun-jang Aplikasi Smart City," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392411187_Perancangan_Jaringan_Nirkabel_Berbasis_Mesh_untuk_Menunjang_Aplikasi_Smart_City/links/6848f767d1054b0207fb79de/Perancangan-Jaringan-Nirkabel-Berbasis-Mesh-untuk-Menunjang-Aplika
- [5] F. P. E. Putra, D. E. Arissandi, A. Rofiqi, and M. F. Hidayat, "Pemanfaatan Mikrotik Dalam Manajemen Bandwidth Pada Jaringan Sekolah," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420575_Pemanfaatan_Mikrotik_Dalam_Manajemen_Bandwidth_Pada_Jaringan_Sekolah/links/6848fab46b5a287c304a61ca/Pemanfaatan-Mikrotik-Dalam-Manajemen-Bandwidth-Pada-Jaringan-Sekolah.pdf
- [6] S. Burok, F. P. E. Putra, and L. Fermadi, "Anti-Klon Pendekatan Ringan untuk Mendeteksi Serangan Kloning RFID," *Infotek J. ...*, 2025.
- [7] F. P. E. Putra, F. Fauzan, S. Syirofi, M. Mursidi, D. Wahid, and A. Nuraini, "Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik," 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [8] F. P. Eka Putra, Amir Hamzah, W. Agel, and R. O. Firmansyah Kusuma, "Impelementasi Sistem Keamanan Jaringan Mikrotik Menggunakan Firewall Filtering dan Port Knocking," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 82–87, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.329.
- [9] F. P. E. Putra, N. D. Saputri, F. Rosi, and R. Loati, "Optimalisasi Infrastruktur Cloud Networking melalui Inte-grasi SDN, NFV, dan Multi-Cloud," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392411211_Optimalisasi_Infrastruktur_Cloud_Networking_melalui_Integrasi_SDN_NFV_da_n_Multi-Cloud/links/6848f8b9df0e3f544f5e49f2/Optimalisasi-Infrastruktur-Cloud-Networking-melalui-Integras
- [10] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, and ..., "Tinjauan performa RouterOS Mikrotik dalam jaringan internet: Analisis kinerja dan kelayakan," *Digit. ...*, 2023.
- [11] X. Lu *et al.*, "An Integrated Self-Powered Wheel- Speed Monitoring System Utilizing Piezoelectric-Electromagnetic-Triboelectric Hybrid Generator," *IEEE Sens. J.*, vol. 24, no. 10, pp. 16805–16815, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3384569.
- [12] S. Wan, "A Denoising Time Window Algorithm for Optimizing LSTM Prediction," *IEEE Access*, vol. 12, pp.

- 74268–74290, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3404456.
- [13] D. R. D. Santos *et al.*, “Toward Indoor Simulations of OPV Cells for Visible Light Communication and Energy Harvesting,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 41027–41041, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3378056.
- [14] M. Boudouane, L. Elmahni, R. Zriouile, and S. A. Ait El Ouahab, “Advancing solar energy harvesting: Artificial intelligence approaches to maximum power point tracking,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 55–69, 2025, doi: 10.11591/ijpeds.v16.i1.pp55-69.
- [15] J. Shi *et al.*, “Biodegradable, fire-safe, and wearable triboelectric nanogenerator enabled by polyphenol-mediated 1D/2D interface architecture,” *Chem. Eng. J.*, vol. 519, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.164809.
- [16] B. Du *et al.*, “Demethylated Lignin@Liquid Metal Nanospheres Enabling Versatile Conductive Hydrogel for Self-Powered Soft Electronics,” *ACS Nano*, vol. 19, no. 33, pp. 30072–30086, 2025, doi: 10.1021/acsnano.5c05604.
- [17] A. I. Omi, A. Jiang, and B. Chatterjee, “Efficient Inductive Link Design: A Systematic Method for Optimum Biomedical Wireless Power Transfer in Area-Constrained Implants,” *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 300–316, 2025, doi: 10.1109/TBCAS.2025.3531995.
- [18] S. R. Eftekhari, A. Mosallanejad, H. Pairo, and J. Rodríguez, “Efficiency Enhancement in Synchronous Reluctance Motors by Active Flux Adjustment Based on Robust Model-Based Approaches,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 127731–127748, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3440037.
- [19] M. Nagah, W. A. Elganini, and N. A. Saeed, “Energy Harvesting and Nonlinear Dynamics of a Two-Degree of Freedom Master-Slave System Integrated with a Piezoelectric Actuator,” *Menoufia J. Electron. Eng. Res.*, vol. 33, no. 1, pp. 39–53, 2024, doi: 10.21608/mjeer.2023.234859.1082.
- [20] S. Itoo, A. A. Khan, M. Ahmad, and M. J. Idrisi, “A Secure and Privacy-Preserving Lightweight Authentication and Key Exchange Algorithm for Smart Agriculture Monitoring System,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 56875–56890, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3280542.
- [21] F. Gan, X. Shang, X. Yang, S. Li, Y. Zhou, and W. Li, “Dual-Functional Cross-Meandering Resonator for Power Frequency Electromagnetic Shielding and Wireless Sensing Communication,” *Sensors*, vol. 24, no. 17, 2024, doi: 10.3390/s24175615.
- [22] A. N. El-Shenhab, E. H. Abdelhay, M. A. Abdelazim, and I. F. Moawad, “A Reinforcement Learning-Based Dynamic Clustering of Sleep Scheduling Algorithm (RLDCSSA-CDG) for Compressive Data Gathering in Wireless Sensor Networks,” *Technologies*, vol. 13, no. 1, 2025, doi: 10.3390/technologies13010025.
- [23] Y. Zhang, B. Suleiman, M. J. Alibasa, and F. Farid, “Privacy-Aware Anomaly Detection in IoT Environments using FedGroup: A Group-Based Federated Learning Approach,” *J. Netw. Syst. Manag.*, vol. 32, no. 1, 2024, doi: 10.1007/s10922-023-09782-9.
- [24] Y. Tian *et al.*, “Facile Fabrication of Flexible and High-Performing Thermoelectrics by Direct Laser Printing on Plastic Foil,” *Adv. Mater.*, vol. 36, no. 15, 2024, doi: 10.1002/adma.202307945.
- [25] M. S. Amin, S. Ahmed, and W.-K. Loh, “Federated learning for Healthcare 5.0: a comprehensive survey, taxonomy, challenges, and solutions,” *Soft Comput.*, vol. 29, no. 2, pp. 673–700, 2025, doi: 10.1007/s00500-025-10508-z.
- [26] H. Wang, X. Zhang, X. Meng, W. Song, and Z. Chen, “Electronic Sheepdog: A Novel Method in With UAV-Assisted Wearable Grazing Monitoring,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 18, pp. 16036–16047, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3267108.
- [27] G. Saha, I. Garg, A. Ankit, and K. Roy, “SPACE: Structured Compression and Sharing of Representational Space for Continual Learning,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 150480–150494, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3126027.
- [28] D. V. Queiroz, R. D. Gomes, I. E. Fonseca, M. S. Alencar, and C. Benavente-Peces, “Channel assignment in TSCH-based wireless sensor networks using fuzzy logic,” *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 14, no. 5, pp. 6043–6062, 2023, doi: 10.1007/s12652-020-02741-1.
- [29] H. Nasri, J. Riahi, H. Oueslati, H. Taghouti, and S. Vergura, “Enhancing Photovoltaic Thermal System Efficiency Through Geometric Optimization and Intelligent Fuzzy Logic Based Management,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 116745–116764, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3585303.
- [30] T. Li *et al.*, “Self-Powered Multidirectional Strain Sensor for Electronic Skin Based on Coiled Carbon Nanotube Yarns,” *IEEE Sens. J.*, vol. 24, no. 3, pp. 2577–2587, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2023.3342792.
- [31] R. Ma, W. Zhang, R. Ma, W. Ni, S. Jiang, and S. Jiang, “Design and Verification of a Novel Sampling System for Lunar Water Ice Exploration,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 18938–18946, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3247963.
- [32] K. Abedi, R. Ansari, and M. K. Hassanzadeh-Aghdam, “Effects of aspect ratio and arrangement of PZT-7A piezoelectric fillers on energy harvesting performance of PVDF composite cantilevers,” *Proc. Inst. Mech.*

- Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 239, no. 17 Special Issue: Materials, processes, and procedures: looking for a more sustainable world, pp. 6968–6982, 2025, doi: 10.1177/09544062251343709.
- [33] T. Alhmiedat, “Fingerprint-Based Localization Approach for WSN Using Machine Learning Models,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 5, 2023, doi: 10.3390/app13053037.
- [34] E. Nagarathinam *et al.*, “Maximizing Solar Potential Using the Differential Grey Wolf Algorithm for PV System Optimization,” *Energy Eng. J. Assoc. Energy Eng.*, vol. 121, no. 8, pp. 2129–2142, 2024, doi: 10.32604/ee.2024.052280.
- [35] S. Wu, N. Chen, A. Xiao, P. Zhang, C. Jiang, and W. Zhang, “AI-Empowered Virtual Network Embedding: A Comprehensive Survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 2024, doi: 10.1109/COMST.2024.3424533.
- [36] C. M. Coman, B. C. Toma, M. A. Constantin, and A. Florescu, “Ground Level LiDAR as a Contributing Indicator in an Environmental Protection Application,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 106277–106288, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3319453.
- [37] M. M. Salleh *et al.*, “FLOOR TILE ENERGY HARVESTER: DESIGN STRATEGIES, PRODUCT DEVELOPMENT AND PERFORMANCE ANALYSIS,” *ASEAN Eng. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 39–49, 2025, doi: 10.11113/aej.V15.21944.
- [38] C. Pereira Dos Santos *et al.*, “DFT to study the structural, optoelectronic and mechanical properties of CuNiPd and Cu2PPd2 alloys,” *J. Alloys Compd.*, vol. 1038, 2025, doi: 10.1016/j.jallcom.2025.182830.
- [39] X. Liu, H. Gao, L. Sun, and J. Yao, “Generic Air-Gen Effect in Nanoporous Materials for Sustainable Energy Harvesting from Air Humidity,” *Adv. Mater.*, vol. 36, no. 12, 2024, doi: 10.1002/adma.202300748.
- [40] Y. Deng and M. Dong, “Design and Optimization of Heterogeneous Coded Distributed Computing With Nonuniform File Popularity,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 24, no. 10, pp. 10456–10473, 2025, doi: 10.1109/TMC.2025.3570907.
- [41] Z. Liao and X. Liao, “Authentication of musical speech devices based on RF fingerprint recognition,” *Int. J. Web Eng. Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 177–197, 2025, doi: 10.1504/IJWET.2025.146731.
- [42] I. Ruiz-García *et al.*, “Sustainable Occupancy Sensing Platform via Triboelectric and Piezoresistive Pressure Sensors,” *IEEE Sensors Lett.*, vol. 9, no. 8, 2025, doi: 10.1109/LSSENS.2025.3589020.
- [43] P. Xu, S. Jia, Y. Zhang, X. Li, and C. Jiang, “Experimental and data-driven optimization of vortex-induced vibration for marine energy harvesting,” *Ocean Eng.*, vol. 324, 2025, doi: 10.1016/j.oceaneng.2025.120683.
- [44] Y. Cao, B. Zhou, C. Y. Chung, Z. Shuai, Z. Hua, and Y. Sun, “Dynamic Modelling and Mutual Coordination of Electricity and Watershed Networks for Spatio-Temporal Operational Flexibility Enhancement under Rainy Climates,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 14, no. 5, pp. 3450–3464, 2023, doi: 10.1109/TSG.2022.3223877.
- [45] Y. Zhang, X. Li, Q. He, M. Hameed, and J. Briscoe, “Hybrid energy harvester integrating ZnO piezoelectric nanogenerator with perovskite solar cell demonstrating the piezo-phototronic effect,” *Nano Energy*, vol. 141, 2025, doi: 10.1016/j.nanoen.2025.111120.
- [46] A. Abu-Baker, A. Alshamali, and Y. Shawaheen, “Energy-Efficient Cluster-Based Wireless Sensor Networks Using Adaptive Modulation: Performance Analysis,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 141766–141777, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3118672.
- [47] X. Chen, Y. Lin, B. Chen, R. Duan, Z. Zhou, and C. Lu, “Enhancing the Thermoelectric Performance of Sustainable Cellulose-Based Ionogels Through Water Content Regulation,” *Small*, vol. 21, no. 11, 2025, doi: 10.1002/smll.202412336.
- [48] Z. Zhou *et al.*, “iMGC: Interactive Multiple Graph Clustering With Constrained Laplacian Rank,” *IEEE Trans. Human-Machine Syst.*, vol. 53, no. 2, pp. 427–437, 2023, doi: 10.1109/THMS.2022.3227181.
- [49] K. Xia, Y. Liu, and S. Yuan, “Arc Fault Diagnosis Method for Brush Slip Ring System of Doubly-Fed Induction Generator Based on Image Recognition,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 93848–93858, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3424567.
- [50] M. R. Alam, S. Saha, M. B. Bostami, M. S. Islam, M. S. Aadeeb, and A. K. M. M. Islam, “A Survey on IoT Driven Smart Parking Management System: Approaches, Limitations and Future Research Agenda,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 119523–119543, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3327306.