

PERANCANGAN SISTEM PENYIRAMAN OTOMATIS HEMAT AIR BERBASIS KELEMBAPAN TANAH DAN ESP32 MENGGUNAKAN ALGORITMA THRESHOLD DYNAMIC DENGAN PROTOTYPING

Izpar Ramadhan¹, Halim Maulana²

^{1,2}Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Indonesia

Email: rmizfar20@gmail.com

ABSTRAK

Penyiraman tanaman pada media terbatas seperti pot dan polybag perlu dilakukan berdasarkan kondisi kelembapan tanah agar dapat mengurangi risiko kekurangan maupun kelebihan air. Penyiraman secara manual juga memiliki keterbatasan karena tidak selalu dapat menyesuaikan dengan kondisi kelembapan tanah secara aktual. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun prototype sistem penyiraman otomatis berbasis ESP32 dan sensor kelembapan tanah kapasitif, menerapkan algoritma Dynamic Threshold berbasis Exponential Moving Average (EMA), serta mengetahui tingkat kesesuaian respons sistem dan penggunaan air dibandingkan dengan Threshold Statis. Metode perancangan yang digunakan adalah Prototyping, yang meliputi perancangan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, integrasi sistem, dan pengujian prototype. Sistem membagi kondisi kelembapan tanah menjadi tiga zona, yaitu KERING, DINAMIS, dan BASAH. Pada zona DINAMIS, nilai threshold ditentukan menggunakan metode EMA sehingga dapat menyesuaikan perubahan nilai kelembapan tanah. Pengujian sistem dilakukan sebanyak 10 kali yang terdiri dari 2 pengujian pada zona KERING, 4 pengujian pada zona DINAMIS, dan 4 pengujian pada zona BASAH. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh respons pompa sesuai dengan keputusan sistem dengan tingkat kesesuaian sebesar 100%. Pada pengujian penggunaan air, Threshold Statis menggunakan air sebesar 33,37 mL dengan durasi pompa ON selama 1 detik, sedangkan Dynamic Threshold menggunakan air sebesar 233,59 mL dengan durasi pompa ON selama 7 detik. Berdasarkan kondisi pengujian tersebut, Dynamic Threshold belum menunjukkan penggunaan air yang lebih hemat dibandingkan Threshold Statis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Dynamic Threshold berbasis EMA telah dapat diterapkan untuk pengolahan threshold dan pengendalian pompa secara adaptif, meskipun keunggulan dalam penghematan air belum terbukti pada kondisi pengujian yang dilakukan. Kata Kunci: *ESP32, Kelembapan Tanah, Dynamic Threshold, Exponential Moving Average, Penyiraman Otomatis, Prototyping.*

ABSTRACT

Watering plants in limited media such as pots and polybags needs to be carried out based on soil moisture conditions to reduce the risk of both water deficiency and excess. Manual watering also has limitations because it cannot always adapt to actual soil moisture conditions. This study aims to design and develop an ESP32-based automatic watering system prototype using a capacitive soil moisture sensor, implement a Dynamic Threshold algorithm based on Exponential Moving Average (EMA), and determine the system response accuracy and water usage compared with a Static Threshold. The design method used was Prototyping, which included hardware design, software development, system integration, and prototype testing. The system divides soil moisture conditions into three zones, namely DRY, DYNAMIC, and WET. In the DYNAMIC zone, the threshold value is determined using the EMA method so that it can adapt to changes in soil moisture values. System testing was conducted 10 times, consisting of 2 tests in the DRY zone, 4 tests in the DYNAMIC zone, and 4 tests in the WET zone. The test results showed that all pump responses corresponded to the system decisions, resulting in a response

accuracy of 100%. In the water usage test, the Static Threshold used 33.37 mL of water with a pump ON duration of 1 second, while the Dynamic Threshold used 233.59 mL of water with a pump ON duration of 7 seconds. Based on the test conditions, the Dynamic Threshold did not demonstrate lower water usage than the Static Threshold. The results indicate that the EMA-based Dynamic Threshold can be implemented for adaptive threshold processing and pump control, although its water-saving advantage was not demonstrated under the testing conditions.

Keywords: ESP32, Soil Moisture, Dynamic Threshold, Exponential Moving Average, Automatic Watering, Prototyping.

PENDAHULUAN

Penyiraman menjadi salah satu aspek penting dalam kegiatan pertanian dan budidaya tanaman karena air berfungsi sebagai media transportasi unsur hara dari tanah menuju seluruh bagian tanaman. Ketersediaan air dalam jumlah yang sesuai dan pada waktu yang tepat berpengaruh terhadap berbagai proses fisiologis tanaman, termasuk fotosintesis, pemeliharaan turgor sel, serta produktivitas tanaman secara keseluruhan (Siregar dan Meliala, 2021). Meskipun demikian, praktik penyiraman yang dilakukan oleh sebagian besar petani dan pecinta tanaman hias masih mengandalkan cara konvensional, terutama penyiraman secara manual berdasarkan jadwal tertentu. Cara tersebut belum mampu merespons perubahan kondisi lingkungan secara aktual sehingga berpotensi menyebabkan pemberian air yang berlebihan (*over-watering*) maupun kekurangan air (*under-watering*) (Wijaya dan Harsono, 2022).

Permasalahan pengendalian kelembapan menjadi semakin penting pada tanaman yang dibudidayakan menggunakan media terbatas, seperti pot dan *polybag*. Media tanam dalam pot atau *polybag* memiliki volume yang jauh lebih terbatas dibandingkan lahan terbuka sehingga kemampuan media dalam menyangga perubahan kondisi lingkungan juga relatif rendah. Kondisi tersebut menyebabkan media tanam lebih mudah mengalami perubahan akibat suhu lingkungan, kecepatan angin, dan paparan radiasi matahari secara langsung yang dapat meningkatkan proses evaporasi (Hidayat, 2020). Kondisi tanah yang mengalami kekeringan dalam waktu relatif cepat dapat menyebabkan tanaman mengalami stres kekeringan (*water stress*) dan menghambat proses penyerapan unsur hara. Sebaliknya, pemberian air secara berlebihan pada media dengan sistem drainase yang kurang baik dapat menyebabkan ruang pori tanah dipenuhi air sehingga ketersediaan oksigen bagi akar berkurang atau mengalami anoksia. Kondisi tersebut dapat meningkatkan risiko kerusakan hingga pembusukan akar tanaman (Pramata dan Sari, 2023).

Kemajuan teknologi otomasi dan *Internet of Things* (IoT) memberikan peluang untuk mengembangkan sistem penyiraman yang mampu menyesuaikan pemberian air berdasarkan kondisi media tanam secara aktual. Salah satu perangkat yang dapat digunakan sebagai pusat kendali adalah ESP32 karena memiliki prosesor *dual-core* dengan kecepatan hingga 240 MHz, SRAM internal yang mendukung proses komputasi algoritma secara lokal, serta konektivitas WiFi dan Bluetooth hemat energi (*Low Energy*) yang telah terintegrasi dalam perangkat (Al-Khowarizmi, 2024). Dengan

kemampuan tersebut, ESP32 dapat digunakan untuk mengakuisisi data dari sensor kelembapan tanah, melakukan pemrosesan data secara langsung (*on-chip*), serta mengendalikan pompa air DC melalui modul *relay*. Integrasi berbagai komponen tersebut memungkinkan proses pemantauan kondisi tanah dan pengendalian penyiraman dilakukan secara otomatis berdasarkan data yang diperoleh dari lingkungan.

Keandalan sistem penyiraman otomatis juga sangat ditentukan oleh karakteristik sensor yang digunakan untuk memperoleh informasi kelembapan tanah. Sistem penyiraman otomatis dengan biaya relatif rendah pada umumnya masih menggunakan sensor kelembapan tanah tipe resistif. Sensor tersebut bekerja dengan mendeteksi perubahan kelembapan berdasarkan aliran arus listrik di antara dua probe logam yang ditempatkan secara langsung pada media tanah (Kurniawan dan Budiman, 2022). Penggunaan probe logam secara terus-menerus pada kondisi tanah yang lembap dan mengandung pupuk menyebabkan sensor resistif rentan mengalami korosi elektrokimia. Kondisi tersebut dapat menyebabkan penurunan akurasi pembacaan dalam periode penggunaan tertentu (Kurniawan dan Budiman, 2022). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini menggunakan *Capacitive Soil Moisture Sensor v2.0* yang bekerja berdasarkan perubahan konstanta dielektrik tanah dengan memanfaatkan medan frekuensi tinggi tanpa menggunakan permukaan logam terbuka yang bersentuhan langsung dengan tanah. Karakteristik tersebut menjadikan sensor kapasitif lebih tahan terhadap korosi dan berpotensi mempertahankan kestabilan pembacaan dalam penggunaan jangka panjang (Nugroho, 2023).

Walaupun teknologi sensor kapasitif dan ESP32 telah digunakan dalam berbagai pengembangan sistem penyiraman otomatis, sebagian sistem masih menerapkan mekanisme pengendalian berdasarkan nilai ambang batas (*threshold*) yang bersifat statis. Pada mekanisme tersebut, pompa air dikendalikan menggunakan aturan sederhana, yaitu pompa diaktifkan ketika nilai kelembapan berada di bawah batas tertentu dan dinonaktifkan ketika nilai kelembapan berada di atas batas tersebut. Mekanisme yang bersifat tetap ini memiliki keterbatasan dalam merespons perubahan kondisi lingkungan yang dinamis, khususnya ketika terjadi perubahan cuaca yang ekstrem. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan algoritma *Dynamic Threshold* sebagai pendekatan pengendalian yang membagi kondisi kelembapan tanah ke dalam tiga zona keputusan yang bersifat adaptif.

Pada kondisi kelembapan tanah yang sangat rendah, yaitu kurang dari 40%, sistem dirancang untuk segera mengaktifkan pompa air sebagai upaya mengurangi risiko kelayuan permanen pada jaringan tanaman. Sebaliknya, ketika kelembapan tanah berada di atas 70%, pompa akan dinonaktifkan untuk mencegah kondisi tanah terlalu jenuh air yang dapat meningkatkan risiko pembusukan akar. Sementara itu, pada rentang kelembapan 40% hingga 70% digunakan zona transisi dinamis, di mana keputusan penyiraman tidak hanya ditentukan berdasarkan satu nilai ambang tetap, tetapi mempertimbangkan hasil perhitungan *Exponential Moving Average* (EMA)

(Utomo, 2025). Pemanfaatan rata-rata bergerak berbobot terhadap data kelembapan sebelumnya memungkinkan sistem menganalisis perubahan kadar air tanah dan menentukan keputusan penyiraman secara lebih adaptif. Pendekatan tersebut juga memungkinkan penyiraman ditunda ketika kondisi lingkungan memungkinkan, misalnya hingga sore hari, sehingga potensi kehilangan air akibat penguapan dapat diminimalkan (Santoso, 2025).

Berdasarkan permasalahan dan kebutuhan pengembangan sistem tersebut, penelitian ini diarahkan pada perancangan sistem penyiraman otomatis yang mampu mengoptimalkan penggunaan air melalui pemantauan kelembapan tanah dan pengendalian berbasis ESP32. Penelitian ini mengangkat judul “Perancangan Sistem Penyiraman Otomatis Hemat Air Berbasis Kelembapan Tanah dan ESP32 Menggunakan Algoritma Threshold Dynamic dengan Prototyping.” Pengembangan sistem menggunakan pendekatan *Prototyping* karena memungkinkan proses perancangan perangkat keras (*hardware*), pengembangan kode program (*software*), pengujian laboratorium, evaluasi, dan penyempurnaan sistem dilakukan secara berulang. Siklus pengembangan tersebut memberikan kesempatan untuk mengidentifikasi kekurangan sistem sejak tahap awal dan melakukan perbaikan sebelum sistem diterapkan secara lebih luas (Gunawan, 2023).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa (*engineering research*) yang berfokus pada perancangan dan pembuatan *prototype* sistem penyiraman otomatis berbasis ESP32 yang mampu mengatur penyiraman tanaman berdasarkan kondisi kelembapan tanah. Metode pengembangan yang digunakan adalah *prototyping*, karena memungkinkan proses perancangan, pembuatan, pengujian, evaluasi, dan penyempurnaan sistem dilakukan secara bertahap. *Prototype* dikembangkan dalam skala sederhana dengan tetap merepresentasikan fungsi utama sistem, yaitu membaca kelembapan tanah, mengolah data, menentukan keputusan penyiraman, dan mengendalikan pompa air secara otomatis. Perancangan sistem melibatkan *Capacitive Soil Moisture Sensor V2.0* sebagai perangkat akuisisi data kelembapan tanah, ESP32 sebagai pusat pengendali, LCD sebagai media keluaran informasi, modul *relay* sebagai pengendali aktuator, serta pompa air sebagai perangkat penyiraman. Perangkat lunak yang digunakan meliputi Arduino IDE untuk pemrograman ESP32 dan algoritma *Dynamic Threshold* untuk mengatur logika pengendalian penyiraman. Tahapan penelitian meliputi studi literatur dan identifikasi masalah, perancangan *prototype*, implementasi, pengujian, evaluasi, serta penyempurnaan sistem.

Implementasi *prototype* dilakukan dengan mengintegrasikan ESP32, *Capacitive Soil Moisture Sensor V2.0*, LCD, modul *relay*, dan pompa air sesuai rancangan perangkat keras dan perangkat lunak yang telah ditentukan. Sistem menggunakan algoritma *Dynamic Threshold* untuk menentukan keputusan penyiraman secara adaptif berdasarkan perubahan nilai kelembapan tanah. Data yang diperoleh dari sensor

diproses oleh ESP32 untuk menentukan nilai *threshold* terbaru, kemudian nilai kelembapan tanah dibandingkan dengan *threshold* tersebut. Apabila kondisi tanah dianggap kering, pompa air akan diaktifkan, sedangkan apabila tanah masih lembap, pompa akan dimatikan. Hasil pengolahan data ditampilkan melalui LCD sebagai media monitoring lokal dan dapat dikirimkan melalui jaringan WiFi untuk mendukung monitoring melalui aplikasi atau web. Dengan demikian, sistem tidak hanya menjalankan proses penyiraman secara otomatis, tetapi juga mendukung penerapan konsep *Internet of Things* (IoT). Pengujian dilakukan terhadap pembacaan sensor kelembapan tanah, penerapan algoritma *Dynamic Threshold*, serta kinerja aktuator pompa air untuk memastikan setiap komponen dapat bekerja secara terintegrasi sesuai fungsi yang telah dirancang.

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi dan pengujian langsung terhadap *prototype* sistem penyiraman otomatis. Data yang dikumpulkan berupa nilai kelembapan tanah yang dibaca sensor serta respons pompa air selama proses pengujian. Variabel bebas penelitian adalah nilai kelembapan tanah, variabel terikat berupa kondisi aktuator pompa air (ON/OFF), sedangkan variabel kontrol meliputi jenis media tanam, jenis tanaman, sumber air, dan nilai ambang batas kelembapan tanah. Pengujian dilakukan pada kondisi tanah kering, lembap, dan basah dengan 10 kali percobaan. Sistem menggunakan ketentuan bahwa apabila kelembapan tanah kurang dari 40%, pompa menyala (ON), apabila kelembapan lebih dari 70%, pompa mati (OFF), sedangkan pada rentang 40–70% sistem bekerja berdasarkan perhitungan algoritma *Dynamic Threshold*. Sistem dinyatakan berhasil apabila pompa dapat bekerja sesuai kondisi kelembapan tanah dengan tingkat keberhasilan minimal 90% (Kumar *et al.*, 2021). Selain itu, dilakukan pengamatan terhadap kestabilan pembacaan sensor dan kemampuan algoritma *Dynamic Threshold* dalam menyesuaikan nilai ambang kelembapan tanah secara adaptif (Zhang *et al.*, 2018). Penelitian dilaksanakan di wilayah Glugur Darat, Kota Medan, pada semester genap tahun akademik 2024/2025, dengan evaluasi hasil pengujian digunakan sebagai dasar penyempurnaan perangkat keras maupun perangkat lunak apabila ditemukan ketidaksesuaian selama proses pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Rancang Bangun Prototype Sistem Penyiraman Otomatis

Hasil penelitian berupa *prototype* sistem penyiraman otomatis yang mengintegrasikan sensor kelembapan tanah kapasitif, ESP32, modul relay, pompa air, LCD, serta komponen pendukung lainnya. Sistem dirancang untuk membaca kondisi kelembapan tanah dan mengendalikan proses penyiraman secara otomatis berdasarkan hasil pengolahan data pada ESP32.

Sensor kelembapan tanah digunakan sebagai perangkat masukan untuk memperoleh informasi kondisi media tanam. Data tersebut diterima dan diproses oleh ESP32 untuk menentukan tindakan yang dilakukan oleh sistem. Hasil pengolahan kemudian digunakan untuk mengendalikan relay dan pompa air, sedangkan

informasi kondisi sistem ditampilkan melalui LCD.

a. Implementasi Keseluruhan Prototype

Prototype direalisasikan dalam sebuah kotak perangkat (*enclosure*) yang digunakan sebagai tempat komponen elektronik utama. Pada bagian depan perangkat dipasang LCD sebagai media tampilan, sedangkan komponen pengendali ditempatkan pada bagian dalam agar rangkaian lebih terorganisasi dan terlindungi.



Gambar 1 Prototype Sistem Penyiraman Otomatis Berbasis ESP32

b. Implementasi Sensor dan ESP32

Sensor kelembapan tanah kapasitif digunakan sebagai perangkat masukan untuk mendeteksi kondisi kelembapan media tanam. Data sensor diterima oleh ESP32 dan digunakan sebagai dasar pengolahan serta pengambilan keputusan penyiraman otomatis.



Gambar 2 Sensor Kelembapan Tanah Kapasitif

ESP32 digunakan sebagai pusat pengendali sistem. Mikrokontroler ini

menerima data yang berasal dari sensor kelembapan tanah, kemudian menjalankan program yang telah ditanamkan untuk melakukan proses pengolahan dan menentukan kondisi penyiraman.

Selain memproses data sensor, ESP32 juga mengatur keluaran sistem berupa relay, pompa air, dan LCD. Dengan demikian, ESP32 berfungsi sebagai penghubung antara bagian masukan, proses pengolahan, dan bagian keluaran pada prototype.



Gambar 3 Mikrokontroler ESP32 pada Prototype

c. Implementasi Relay dan Pompa Air

Modul relay berfungsi sebagai penghubung antara sinyal kendali ESP32 dengan pompa air. Berdasarkan keputusan sistem, relay mengatur kondisi pompa menjadi ON atau OFF sehingga air dapat dialirkan menuju media tanam sesuai kebutuhan.

Ketika sistem menghasilkan keputusan untuk melakukan penyiraman, ESP32 memberikan perintah kepada relay sehingga pompa air berada pada kondisi ON. Pada kondisi tersebut, pompa mengalirkan air melalui selang menuju media tanam. Sebaliknya, ketika sistem menentukan bahwa penyiraman tidak diperlukan, relay mengubah kondisi pompa menjadi OFF.



Gambar 4 Modul Relay sebagai Pengendali Pompa Air

Pompa air berfungsi sebagai aktuator yang menjalankan tindakan penyiraman pada prototype. Pompa tidak melakukan pengambilan keputusan secara langsung, tetapi bekerja berdasarkan kondisi relay yang dikendalikan oleh ESP32. Dengan mekanisme tersebut, proses penyiraman merupakan hasil akhir dari pengolahan data kelembapan tanah yang dilakukan oleh sistem.



Gambar 5 Pompa Air sebagai Aktuator Penyiraman

d. Implementasi LCD sebagai Media Tampilan

LCD digunakan sebagai perangkat keluaran untuk menampilkan informasi sistem secara langsung. Keberadaan LCD membantu pengguna memantau hasil pembacaan dan kondisi kerja prototype tanpa harus selalu menggunakan perangkat komputer.

Informasi yang ditampilkan pada LCD meliputi nilai hasil pembacaan kelembapan tanah, nilai *Dynamic Threshold*, kondisi pompa ON atau OFF, serta kondisi media tanam yang terdeteksi oleh sistem. Informasi tersebut digunakan untuk membantu mengamati hubungan antara data yang dibaca sensor dengan keputusan yang diberikan oleh sistem.

Dengan adanya LCD, perubahan kondisi sistem selama proses implementasi dan pengujian dapat diamati secara langsung. Tampilan ini juga membantu memastikan bahwa proses pembacaan, pengolahan data, dan pengendalian pompa menghasilkan keluaran yang dapat dipantau oleh pengguna.



Gambar 6 LCD sebagai Media Tampilan Sistem

e. Integrasi Sistem Penyiraman Otomatis

Seluruh komponen diintegrasikan menjadi satu sistem dengan alur kerja sensor membaca kelembapan tanah, ESP32 mengolah data, relay menerima perintah kendali, dan pompa menyalurkan air melalui selang menuju media tanam. Integrasi tersebut menghasilkan prototype yang dapat digunakan pada tahap pengujian algoritma dan kinerja sistem.



Gambar 7 Integrasi Keseluruhan Sistem Penyiraman Otomatis

Setelah seluruh komponen dihubungkan, sistem dapat menjalankan proses penyiraman mulai dari pembacaan kelembapan tanah sampai pengendalian pompa. Sensor membaca kondisi media tanam dan mengirimkan data ke ESP32 untuk diproses. Berdasarkan hasil pengolahan tersebut, ESP32 memberikan perintah kepada relay untuk mengatur pompa dalam kondisi ON atau OFF. Informasi nilai kelembapan dan status sistem juga ditampilkan melalui LCD untuk memudahkan pengamatan selama sistem digunakan.

Prototype yang telah terintegrasi kemudian digunakan untuk menerapkan algoritma *Dynamic Threshold* berbasis *Exponential Moving Average* (EMA). Implementasi algoritma tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan Keputusan.

2. Hasil Implementasi Algoritma Dynamic Threshold

Setelah seluruh komponen pada prototype terhubung dan dapat bekerja dengan baik, tahap berikutnya adalah menerapkan algoritma *Dynamic Threshold* pada ESP32. Algoritma ini digunakan untuk menentukan kapan pompa air harus menyala atau mati berdasarkan nilai kelembapan tanah yang dibaca oleh sensor.

Sistem membagi kondisi kelembapan menjadi tiga zona. Kelembapan $\leq 40\%$ dikategorikan sebagai zona KERING, kelembapan $> 40\%$ dan $< 70\%$ dikategorikan sebagai zona DINAMIS, sedangkan kelembapan $\geq 70\%$ dikategorikan sebagai zona BASAH. Pada zona DINAMIS, nilai threshold ditentukan menggunakan metode

Exponential Moving Average (EMA).

a. Hasil Pembacaan Sensor Kelembapan Tanah

Pengujian sensor dilakukan untuk mengetahui nilai kelembapan tanah yang terbaca pada beberapa kondisi media tanam. Sensor kelembapan tanah kapasitif membaca kondisi media, kemudian ESP32 mengolah hasil pembacaan tersebut menjadi nilai kelembapan dalam bentuk persentase.

Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan kondisi media tanam yang berbeda. Kondisi tersebut meliputi tanah kering, tanah dengan kelembapan sedang, dan tanah basah. Setiap hasil pembacaan dicatat untuk melihat perubahan nilai kelembapan yang diterima oleh sistem.

Tabel 1 Hasil Pembacaan Sensor Kelembapan Tanah

No	Nilai Sensor ADC	Kelembapan	Kondisi Tanah
1	2589	33.9%	KERING
2	2908	16.2%	KERING
3	2634	31.4%	KERING
4	1979	67.8%	DINAMIS
5	2099	61,2%	DINAMIS
6	2112	60.4%	DINAMIS
7	1881	77.2%	BASAH
8	1879	73,4%	BASAH
9	1800	77.8%	BASAH
10	1800	77.9%	BASAH

Berdasarkan Tabel di atas, pada pengamatan pertama diperoleh nilai ADC sebesar 2589 dengan kelembapan sebesar 33,9% sehingga termasuk zona KERING. Pada pengamatan keempat diperoleh ADC sebesar 1979 dengan kelembapan 67,8% sehingga termasuk zona DINAMIS. Sementara itu, pada pengamatan kedelapan diperoleh ADC sebesar 1879 dengan kelembapan 73,4% sehingga termasuk zona BASAH. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembacaan sensor dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan zona kondisi tanah

b. Hasil Perhitungan Dynamic Threshold Menggunakan EMA

Perhitungan *Dynamic Threshold* dilakukan ketika nilai kelembapan berada pada rentang 40% sampai 70%. Pada kondisi tersebut, sistem menggunakan metode *Exponential Moving Average* untuk menentukan nilai ambang berdasarkan nilai kelembapan saat ini dan nilai *Dynamic Threshold* sebelumnya

Hasil perhitungan EMA pada setiap pengujian zona DINAMIS selanjutnya disusun pada Tabel di bawah ini.

Tabel 2 Hasil Verifikasi Perhitungan Dynamic Threshold Menggunakan EMA

No.	ADC	Mi (%)	Ti-1 (%)	α	Ti (%)	Perbandingan	Pompa
1	2047	64,06	-	0,3	64,06	Mi = Ti	OFF
2	2047	64,06	64,06	0,3	64,06	Mi $\geq$ Ti	OFF
3	2161	57,72	64,06	0,3	62,16	Mi < Ti	ON
4	2430	42,78	62,16	0,3	56,34	Mi < Ti	ON

Kondisi pompa berdasarkan Tabel di atas, nilai Dynamic Threshold berubah mengikuti kelembapan aktual dan threshold sebelumnya. Pada pengamatan ketiga diperoleh kelembapan sebesar 57,72% dengan Previous Threshold sebesar 64,06%, sehingga diperoleh Dynamic Threshold sebesar 62,16%. Karena nilai kelembapan aktual lebih rendah dari Dynamic Threshold, sistem memberikan keputusan pompa ON.

c. Hasil Pengujian Respons Pompa

Pengujian respons pompa dilakukan untuk mengetahui kesesuaian antara keputusan yang dihasilkan oleh sistem dengan kondisi aktual pompa air. Pengujian mencakup tiga zona kelembapan, yaitu zona KERING, DINAMIS, dan BASAH. Pembagian zona tersebut digunakan untuk mengevaluasi apakah sistem mampu memberikan respons aktuator yang sesuai terhadap perubahan kondisi kelembapan tanah.

Pada zona KERING, yaitu ketika kelembapan tanah berada di bawah <40%, sistem memberikan keputusan pompa ON. Pada zona BASAH, yaitu ketika kelembapan berada di atas >70%, sistem memberikan keputusan pompa OFF. Sementara itu, pada zona DINAMIS dengan rentang kelembapan >40% sampai <70%, keputusan pompa ditentukan berdasarkan hasil perbandingan antara kelembapan aktual dan nilai *Dynamic Threshold*

Hasil pengujian respons pompa ditunjukkan pada Tabel 4.3 dibawah ini:

Tabel 3 Hasil Pengujian Respons Pompa

No	Kelembapan	Zona	Keputusan	Pompa Aktual	Hasil
1	33,9%	Kering	ON	ON	Sesuai
2	31,4%	Kering	ON	ON	Sesuai
3	68,5%	Dinamis	OFF	OFF	Sesuai
4	45,3%	Dinamis	ON	ON	Sesuai
5	45,0%	Dinamis	ON	ON	Sesuai
6	59,0%	Dinamis	OFF	OFF	Sesuai
7	70,9%	Basah	OFF	OFF	Sesuai
8	73,4%	Basah	OFF	OFF	Sesuai
9	77,8%	Basah	OFF	OFF	Sesuai
10	77,9%	Basah	OFF	OFF	Sesuai

Berdasarkan Tabel di atas, seluruh kondisi pompa aktual sesuai dengan keputusan sistem. Pada zona KERING pompa berada dalam kondisi ON, sedangkan pada zona BASAH pompa berada dalam kondisi OFF. Pada zona DINAMIS, keputusan penyiraman ditentukan berdasarkan nilai Dynamic Threshold.

Ketika proses penyiraman telah dimulai, pompa dipertahankan dalam kondisi ON hingga kelembapan mencapai zona BASAH. Mekanisme ini digunakan untuk mengurangi perubahan kondisi pompa secara berulang akibat fluktuasi nilai kelembapan.

d. Hasil Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk mengevaluasi keterkaitan antara pembacaan sensor kelembapan tanah, proses pengolahan data pada ESP32, penentuan zona kelembapan, penerapan algoritma *Dynamic Threshold*, serta respons aktuator pompa. Pengujian ini menggunakan hasil sepuluh percobaan yang telah dilakukan pada kondisi KERING, DINAMIS, dan BASAH.

Pada sistem yang dikembangkan, sensor kelembapan tanah berfungsi sebagai sumber data utama. ESP32 membaca nilai sensor dan mengubahnya menjadi persentase kelembapan tanah. Nilai tersebut kemudian digunakan untuk menentukan zona kondisi media tanam. Zona KERING ditetapkan ketika kelembapan berada di bawah 40%, zona DINAMIS berada pada rentang 40% sampai 70%, dan zona BASAH ditetapkan ketika kelembapan lebih dari 70% hasil pengujian keseluruhan sistem ditunjukkan pada Tabel di bawah ini.

Tabel 4 Rekapitulasi Hasil Pengujian Keseluruhan Sistem

Zona	Jumlah pengujian	Respons Sesuai	Respons Tidak Sesuai	Tingkat Kesesuaian
Kering	2	2	0	100%
Dinamis	4	4	0	100%
Basah	4	4	0	100%
Total	10	10	0	100%

Berdasarkan Tabel di atas, seluruh 10 pengujian menghasilkan respons pompa yang sesuai dengan keputusan sistem. Zona KERING terdiri dari 2 pengujian, zona DINAMIS sebanyak 4 pengujian, dan zona BASAH sebanyak 4 pengujian. Tingkat kesesuaian respons aktuator mencapai 100%, sehingga telah memenuhi kriteria keberhasilan minimal sebesar 90%.

3. Hasil Pengujian Efisiensi Penggunaan Air

Pengujian efisiensi penggunaan air dilakukan untuk melihat perbedaan penggunaan air antara sistem Threshold Statis dan Dynamic Threshold.

Pengamatan dilakukan terhadap nilai kelembapan tanah, kondisi pompa, lama pompa bekerja, serta volume air yang digunakan selama penyiraman.

Volume air dihitung berdasarkan debit pompa dan lama pompa dalam kondisi ON menggunakan persamaan:

$$V = Q \times t$$

dengan V adalah volume air dalam mL, adalah debit pompa dalam mL/s, dan adalah durasi pompa ON dalam detik.

Sebelum pengujian kedua metode dilakukan, debit pompa terlebih dahulu diukur agar perhitungan volume air menggunakan nilai yang sesuai dengan kondisi pompa yang digunakan.

Tabel 5 Hasil Kalibrasi Debit Pompa Air

No	Total Waktu Pompa On	Volume Iir Terukur	Debit Air
1	10	332	33,20
2	10	334	33,40
3	10	335	33,50
Rata - Rata	10	333,67	33,37

Berdasarkan diatas, volume air yang diperoleh dari tiga kali pengukuran tidak memiliki perbedaan yang besar. Pada pengujian pertama diperoleh 332 mL, pengujian kedua 334 mL, dan pengujian ketiga 335 mL dalam waktu masing-masing 10 detik.

Debit rata-rata pompa dihitung sebagai berikut:

$$Q = \frac{33,20 + 33,40 + 33,50}{3}$$

$$Q = 33,37 \text{ mL/s}$$

Nilai 33,37 mL/s selanjutnya digunakan untuk menghitung volume air pada pengujian Threshold Statis dan Dynamic Threshold.

a. Pengujian Sistem Threshold Statis

Pada pengujian Threshold Statis digunakan nilai ambang tetap sebesar 50%. Nilai tersebut tidak berubah selama sistem bekerja. Pompa akan aktif jika kelembapan tanah berada di bawah 50%, sedangkan pompa akan mati ketika kelembapan sama dengan atau lebih besar dari 50%.

Logika yang digunakan adalah:

$$M_i < T_s \Rightarrow \text{Pompa} = \text{ON}$$

$$M_i \geq T_s \Rightarrow \text{Pompa} = \text{OFF}$$

Hasil pengamatan Threshold Statis ditunjukkan pada Tabel berikut ini:

Tabel 6 Hasil Pengujian Sistem Threshold Statis

No.	ADC	Kelembapan (M _i) (%)	Threshold Statis (%)	Pompa	Durasi ON (s)	Volume Air (mL)
1	2068	62,89	50,00	OFF	0,00	0,00
2	2135	59,17	50,00	OFF	0,00	0,00

3	2055	63,61	50,00	OFF	0,00	0,00
4	2227	54,06	50,00	OFF	0,00	0,00
5	2118	60,11	50,00	OFF	0,00	0,00
6	2350	47,22	50,00	ON	0,00	0,00
7	1997	66,83	50,00	OFF	1,00	33,37
8	1903	72,06	50,00	OFF	1,00	33,37
9	2047	64,06	50,00	OFF	1,00	33,37
10	2123	59,83	50,00	OFF	1,00	33,37
Nilai akhir					1,00	33,37

Berdasarkan tabel diatas, pada lima pengamatan awal kelembapan tanah masih berada di atas 50%, sehingga pompa tetap OFF. Perubahan terjadi pada pengamatan keenam ketika kelembapan turun menjadi 47,22%. Karena nilai tersebut lebih kecil dari Threshold Statis, pompa berubah menjadi ON.

b. Pengujian Sistem Dynamic Threshold

Pada Dynamic Threshold, nilai threshold tidak menggunakan satu nilai tetap. Threshold diperbarui berdasarkan nilai kelembapan tanah saat ini dan threshold sebelumnya menggunakan metode Exponential Moving Average (EMA). Dalam penelitian ini digunakan nilai , sesuai dengan metode Dynamic Threshold yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya.

Persamaan yang digunakan adalah:

$$T_i = \alpha M_i + (1 - \alpha) T_{i-1}$$

$$\alpha = 0.3$$

Perhitungan Dynamic Threshold dilakukan pada zona kelembapan 40% sampai 70%. Pada kondisi kering dan basah, sistem menggunakan keputusan langsung berdasarkan kondisi kelembapan tanah. Dengan merupakan nilai kelembapan tanah aktual dan merupakan nilai Threshold Statis.

Hasil pengujian *Dynamic Threshold* selanjutnya disajikan pada tabel dibawah ini

Tabel 7 Hasil Pengujian Sistem *Dynamic Threshold*

No.	ADC	(M _i) (%)	(T _{i-1}) (%)	(T _i) (%)	Zona	Pompa	Durasi ON (s)	Volume Air (mL)
1	2047	64,06	-	64,06	DINAMIS	OFF	0,00	0,00
2	2047	64,06	64,06	64,06	DINAMIS	OFF	0,00	0,00
3	2161	57,72	64,06	62,16	DINAMIS	ON	0,00	0,00
4	2430	42,78	62,16	56,34	DINAMIS	ON	1,00	33,37
5	2088	61,78	56,34	57,97	DINAMIS	ON	2,00	66,74
6	2021	65,50	57,97	60,23	DINAMIS	ON	3,00	100,11
7	2009	66,17	60,23	62,01	DINAMIS	ON	4,00	133,48

8	2047	64,06	62,01	62,62	DINAMIS	ON	5,00	166,85
9	2047	64,06	62,62	63,05	DINAMIS	ON	6,00	200,22
10	1811	77,17	-	-	BASAH	OFF	7,00	233,59
Nilai akhir							7,00	233,59

Data pada Tabel diatas menunjukkan bahwa sebagian besar pembacaan berada pada zona DINAMIS. Nilai dan berubah mengikuti nilai kelembapan tanah yang terbaca oleh sensor. Data tersebut berasal dari rangkaian pengujian Dynamic Threshold yang mencatat perubahan nilai threshold hingga kondisi media mencapai zona BASAH.

Pada pengamatan pertama, nilai threshold awal ditentukan berdasarkan kelembapan tanah saat itu:

Pada pengamatan ketiga diperoleh kelembapan sebesar 57,72% dengan Previous Threshold 64,06%. Nilai Dynamic Threshold dihitung sebagai berikut:

$$Ti = (0,3 \times 57,72) + (0,7 \times 64,06)$$

$$Ti = 62,16\%$$

$$57,72\% < 62,16\%$$

Pada pengamatan terakhir, kelembapan mencapai 77,17% sehingga masuk ke zona BASAH. Pada kondisi tersebut pompa berubah menjadi OFF. Total durasi pompa ON tercatat selama 7 detik.

Volume air yang digunakan adalah:

$$V = 33,37 \times 7$$

$$V = 233,59 \text{ mL}$$

c. Perbandingan Volume Air

Perbandingan dilakukan berdasarkan durasi pompa ON dan volume air yang digunakan pada kedua metode. Karena pompa yang digunakan sama, debit pada kedua metode juga sama yaitu 33,37 mL/s

Tabel 8 Perbandingan Penggunaan Air Threshold Statis dan Dynamic Threshold

Parameter	Threshold Statis	Dynamic Threshold	Selisih
Jumlah Data Pengamatan	10	10	0
Jumlah Aktivasi Pompa	1 kali	1 kali	0 kali
Total Durasi Pompa ON	1,00 s	7,00 s	-6,00 s
Debit Pompa	33,37 mL/s	33,37 mL/s	0,00 mL/s
Total Volume Air	33,37 mL	233,59 mL	-200,22 mL

Berdasarkan diatas, kedua metode sama-sama mengalami satu kali aktivasi pompa. Namun, durasi pompa ON pada Dynamic Threshold lebih lama, yaitu 7 detik, dibandingkan Threshold Statis sebesar 1 detik. Hal ini menyebabkan

Dynamic Threshold menggunakan air sebesar 233,59 mL, sedangkan Threshold Statis menggunakan 33,37 mL.

Perbedaan tersebut terjadi karena pada Dynamic Threshold pompa tetap melakukan penyiraman selama proses menuju kondisi BASAH, sedangkan pada Threshold Statis pompa berhenti setelah kelembapan melewati threshold tetap sebesar 50%.

d. Persentase Penghematan Air

Berdasarkan hasil perbandingan penggunaan air, Threshold Statis menggunakan air sebesar 33,37 mL, sedangkan Dynamic Threshold menggunakan 233,59 mL. Dari hasil tersebut terlihat bahwa penggunaan air pada Dynamic Threshold lebih besar dibandingkan Threshold Statis pada rangkaian pengujian yang dilakukan.

Perbedaan penggunaan air tersebut dipengaruhi oleh lama pompa berada dalam kondisi ON. Pada Threshold Statis, pompa aktif selama 1 detik, sedangkan pada Dynamic Threshold pompa aktif selama 7 detik. Hal ini menyebabkan jumlah air yang dikeluarkan pada Dynamic Threshold menjadi lebih banyak.

Dengan demikian, pada pengujian ini Dynamic Threshold belum menunjukkan penghematan air dibandingkan Threshold Statis. Namun, hasil tersebut masih dipengaruhi oleh kondisi awal kelembapan media pada masing-masing pengujian. Oleh karena itu, hasil ini digunakan sebagai gambaran dari kondisi pengujian yang dilakukan dan belum dapat dijadikan kesimpulan umum bahwa Dynamic Threshold selalu menggunakan air lebih banyak.

Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, prototype sistem penyiraman otomatis berbasis ESP32 mampu menjalankan fungsi utama sesuai rancangan. Sensor kelembapan tanah digunakan sebagai masukan, kemudian data diproses oleh ESP32 untuk menentukan zona KERING, DINAMIS, atau BASAH dan menghasilkan keputusan terhadap kondisi pompa.

Pada pengujian respons sistem, seluruh **10 data pengujian** menghasilkan kondisi pompa yang sesuai dengan keputusan sistem. Zona KERING terdiri dari 2 pengujian, zona DINAMIS 4 pengujian, dan zona BASAH 4 pengujian. Tingkat kesesuaian respons aktuator mencapai **100%**, sehingga telah melebihi kriteria keberhasilan minimal sebesar 90%.

Penerapan Dynamic Threshold dengan metode Exponential Moving Average (EMA) juga dapat menghasilkan nilai threshold yang berubah berdasarkan kondisi kelembapan aktual dan threshold sebelumnya. Nilai pembobot yang digunakan adalah , sehingga perubahan threshold dapat mengikuti perubahan data kelembapan secara bertahap.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan Dynamic Threshold telah berhasil dari sisi pengolahan nilai threshold dan pengendalian pompa secara adaptif.

Namun, keunggulan dalam penghematan air belum dapat dibuktikan pada kondisi pengujian yang dilakukan karena penggunaan air Dynamic Threshold justru lebih besar.

a. Kelebihan Sistem

Sistem yang dikembangkan memiliki beberapa kelebihan. Pertama, proses penyiraman dapat berjalan secara otomatis berdasarkan kondisi kelembapan tanah sehingga tidak selalu membutuhkan pengendalian manual. Kedua, penggunaan tiga zona keputusan memungkinkan sistem memberikan respons berbeda pada kondisi KERING, DINAMIS, dan BASAH.

Pada zona DINAMIS, sistem menggunakan perhitungan EMA sehingga threshold tidak hanya menggunakan satu nilai tetap. Pendekatan ini membuat nilai Dynamic Threshold dapat menyesuaikan perubahan data kelembapan tanah. Selain itu, hasil pengujian menunjukkan respons pompa sesuai dengan keputusan sistem pada seluruh 10 data yang diuji dengan tingkat kesesuaian sebesar 100%.

Kelebihan lainnya adalah penggunaan air dapat dihitung berdasarkan durasi pompa ON dan debit pompa yang telah dikalibrasi. Dengan demikian, kinerja sistem tidak hanya diamati dari status ON dan OFF, tetapi juga dapat dianalisis berdasarkan jumlah air yang digunakan

b. Kekurangan Sistem

Sistem yang dikembangkan masih memiliki beberapa keterbatasan. Pada pengujian penggunaan air, Dynamic Threshold membutuhkan waktu pompa ON selama 7 detik dengan volume 233,59 mL, sedangkan Threshold Statis hanya membutuhkan 1 detik dengan volume 33,37 mL. Oleh karena itu, pada kondisi pengujian tersebut Dynamic Threshold belum memberikan penghematan air.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, prototype sistem penyiraman otomatis berbasis ESP32 dapat bekerja sesuai dengan rancangan. Sensor kelembapan tanah mampu memberikan data sebagai masukan sistem, kemudian ESP32 mengolah data tersebut untuk menentukan kondisi tanah dan mengendalikan pompa secara otomatis.

Penerapan Dynamic Threshold menggunakan metode Exponential Moving Average (EMA) juga dapat berjalan pada zona DINAMIS. Nilai threshold dapat berubah mengikuti nilai kelembapan tanah dan threshold sebelumnya. Dari 10 data pengujian respons pompa, seluruh kondisi aktual pompa sesuai dengan keputusan sistem sehingga diperoleh tingkat kesesuaian sebesar 100%.

Pada pengujian penggunaan air, Threshold Statis menggunakan air sebesar 33,37 mL dengan durasi pompa ON selama 1 detik. Sementara itu, Dynamic Threshold menggunakan air sebesar 233,59 mL dengan durasi pompa ON selama 7 detik. Berdasarkan hasil tersebut, Dynamic Threshold pada kondisi pengujian yang

dilakukan belum menunjukkan penggunaan air yang lebih hemat dibandingkan Threshold Statis.

DAFTAR PUSTAKA

- Bavitra, K., Raman, S., & Prakash, R. (2025). IoT-based soil moisture monitoring system using ESP32 for smart irrigation. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 16(2), 45–53.
- Bolton, W. (2015). *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering* (6th ed.). Pearson Education.
- Budiman, F. (2024). Implementasi Purwarupa Wireless Sensor Network untuk Monitoring dan Penyiraman Otomatis pada Tanaman Mint Menggunakan ESP32 Berbasis IoT-LoRa. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12(3), 2113–2121.
- CandraGipta, W. (2026). Pengembangan Irrigation System Berbasis IoT Menggunakan ESP32 dan Sensor Kelembapan Tanah untuk Efisiensi Air dan Pertanian. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 14(3).
- Dzulkufli, D., Ahmad, M., & Yusuf, R. (2016). Analysis of soil moisture effects on plant growth in small-scale irrigation systems. *International Journal of Agricultural Research*, 11(4), 201–208.
- Effendi, R., Pratama, A., & Kurniawan, D. (2022). Implementasi Exponential Moving Average pada sistem monitoring kelembapan tanah berbasis IoT. *Jurnal Teknologi Informasi dan Komputer*, 8(3), 120–128.
- Espressif Systems. (2019). *ESP32 Series Datasheet*. Espressif Systems.
- FAO. (2017). *Water for Sustainable Food and Agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gamal, Y., Soltan, A., Said, L. A., Radwan, A. G., & Member, S. (2025). Smart Irrigation Systems: Overview. *IEEE Access*, 13, 66109–66121.
- Gardner, C. M. K., Robinson, D., & Blyth, K. (2016). Soil water content measurement for irrigation management. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 89(2), 101–110.
- Hafizh, M., Ramadhan, I., & Putra, A. (2025). Sistem penyiraman otomatis berbasis sensor kelembapan tanah untuk efisiensi penggunaan air. *Jurnal Teknologi Pertanian Modern*, 5(1), 12–20.
- Hidayat, T., & Santoso, B. (2020). Implementasi pompa air otomatis pada sistem penyiraman berbasis mikrokontroler. *Jurnal Elektro dan Informatika*, 9(1), 33–40.
- Kumar, R., Singh, P., & Sharma, V. (2021). Smart irrigation system using IoT and soil moisture sensor for water conservation. *International Journal of Smart Agriculture*, 6(1), 15–24.
- Li, X., & Chen, Y. (2020). Adaptive dynamic threshold algorithm for intelligent control systems. *Journal of Automation and Control Engineering*, 8(3), 155–162.
- Mahendra, T., & Ihsan, M. (2026). IoT-Based Soil Moisture Monitoring and Automatic Watering System. *Jurnal Teknologi dan Open Source*, 9(1).
- Mendrofa, R. K. I., Latifa, U., & Setiawan, M. A. (2026). Rancang Bangun Sistem Irigasi

- Otomatis berbasis ESP32 dan Sensor Kelembapan Tanah untuk Monitoring Real-Time. *EPIC Journal of Electrical Power Instrumentation and Control*, 9(1), 534–546. <https://doi.org/10.32493/epic.v9i1.60045>.
- Michael, A. M. (2016). *Irrigation Theory and Practice (3rd ed.)*. Vikas Publishing House.
- Nugroho, A., & Prasetyo, D. (2019). Sistem penyiraman otomatis berbasis mikrokontroler menggunakan sensor kelembapan tanah. *Jurnal Informatika dan Sistem Kontrol*, 4(2), 55–63.
- Nursan, M. M., & Mustamin. (2026). Rancang Bangun Sistem Irigasi Cerdas Berbasis Sensor Kelembapan Tanah dan ESP32 untuk Efisiensi Air pada Tanaman Padi. *Pendas: Jurnal Ilmiah Pendidikan Dasar*, 11(2).
- Ogata, K. (2017). *Modern Control Engineering (5th ed.)*. Pearson.
- Pamungkas, R., Ullah, A., Faizal, A., & Zarory, H. (2025). Sistem Penyiraman Pintar dan Monitoring Tanaman Sawi Otomatis Berbasis ESP32 dan Sensor Kelembapan Tanah Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani. *Jurnal Al-Azhar Indonesia Seri Sains dan Teknologi*, 10(2).
- Pratiwi, S. D., Sugianto, R. A., & Pane, M. A. S. (2026). IoT-Based Soil Moisture Monitoring and Automatic Irrigation System Using ESP32 and YL-69 Sensors for Oil Palm Seedlings in the Main Nursery. *Sisfo: Jurnal Ilmiah Sistem Informasi*.
- Pressman, R. S. (2014). *Software Engineering: A Practitioner's Approach (8th ed.)*. McGraw-Hill Education.
- Rahardjo, V. A., & Setiyadi, D. (2021). Implementasi Sensor Pengukur Kelembapan Tanah dan Penyiraman Otomatis serta Monitoring pada Kebun Tanaman Cabai Rawit. *Aisyah Journal of Informatics and Electrical Engineering*, 3(2), 1–10.
- Rahim, Y. A. A., Sumarsono, J., & Abdullah, S. H. (2025). Rancang Bangun Sistem Irigasi Tetes Menggunakan Soil Moisture SEN0308 Berbasis Mikrokontroler ESP32. *Journal of Agricultural Engineering and Technology*, 3(1).
- Rahman, F., Hidayah, N., & Saputra, R. (2021). Monitoring and automatic irrigation system based on IoT technology. *Journal of Information Systems Engineering*, 7(2), 88–96.
- Saputra, M. J., & Suryono, R. R. (2025). Implementasi Teknologi Irigasi Tetes pada Tanaman Jagung Menggunakan Sensor Soil Moisture dan Mikrokontroler ESP32. *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, 5(1). <https://doi.org/10.57152/malcom.v5i1.1642>.
- Sari, N., Wijaya, A., & Putri, D. (2021). Implementasi ESP32 pada sistem monitoring dan kontrol berbasis Internet of Things. *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 9(4), 210–218.
- Singh, R., Patel, V., & Kumar, S. (2020). Automatic irrigation control system using environmental monitoring sensors. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 13(5), 1020–1027.
- Stiawan, M. I. R., & Supardi, Z. A. I. (2024). Smart Farming - Merancang Alat Penyiram Tanaman Otomatis Berbasis Kelembapan Tanah dan Waktu Menggunakan Mikrokontroler ESP32. *Inovasi Fisika Indonesia*, 13(3), 124–132.

<https://doi.org/10.26740/ifi.v13n3.p124-132>.

- Sutanto, H. (2018). *Manajemen Penyiraman Modern dalam Pertanian Berkelanjutan*.
- Utomo, S. (2025). Analisis Metode Exponential Moving Average dalam Penentuan Ambang Batas Dinamis pada Sistem IoT. *Jurnal Sistem Informasi dan Teknologi Komputer*, 10(1), 45–53.
- Westari, D., & Ilman, S. (2024). Sistem Penyiraman Tanaman Otomatis Berbasis IoT Menggunakan ESP32, Moisture Sensor, DHT22 Sensor dan Blynk. *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Informatika*, 3(4).
- Wijaya, F. (2022). Analisis performa ESP32 pada sistem otomasi berbasis Internet of Things. *Jurnal Teknologi Elektro dan Komputer*, 11(2), 67–75.
- Yu, L., et al. (2021). Review of research progress on soil moisture sensor technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(4), 32–42.
- Zakaria, Y., Al Munawaroh, I. H., Widyaningsih, S. N., & Apriliyanto, E. (2026). Testing and Evaluation of an IoT-Based Smart Irrigation System for Soil Moisture Monitoring. *Journal of Computer Science and Informatics Engineering*, 5(2).
- Zhang, Y., Liu, H., & Wang, T. (2018). Dynamic threshold method for adaptive decision systems in smart environments. *International Journal of Intelligent Systems*, 33(7), 1445–1458.