TECHNOVATAR Jurnal Teknologi, Industri dan Informasi
Vol. 2, No. 3, Juli 2024, pp. 1 - 14
Open Access:
https://journal.awatarapublisher.com/index.php/technovatar
ISSN: 3031-8874, DOI: 10.61434/technovatar.v2i3.394

SISTEM PENYIRAM TANAMAN OTOMATIS BERBASIS ARDUINO DENGAN PENERAPAN ALGORITMA FUZZY (STUDI KASUS: SMAN 1 BEBER)

Indra Surya Permana[1*], Aurelia Septia Apriani[2], Jaisyi Bagir Rafsyahid[3], Muhamad Fuad Aziz[4]
[1, 2, 3, 4] Program Studi Informatika, Fakultas Teknik, Institut Teknologi dan Kesehatan Mahardika, Cirebon, Indonesia

INFO ARTIKEL
Sejarah Artikel:
Diterima, 19 Agustus 2024
Direvisi, 24 Agustus 2024
Disetujui, 9 September 2024
KEYWORDS
Automatic plant watering system
Arduino
Fuzzy algorithm
Soil moisture
Agricultural automation

ABSTRACT
This study develops an Arduino-based automatic plant watering prototype for SMAN 1 Beber. The system combines a TMP36 temperature sensor, a soil moisture sensor, a DS3231 real-time clock, and a relay-controlled pump. Twelve fuzzy rules map temperature and a relative moisture index to singleton watering durations of 2–18 seconds. The output calculation selects the consequent associated with the largest rule firing strength. Pump calibration comprised ten repetitions at each duration of 5, 10, 15, and 20 seconds. Reanalysis of these measurements yielded an overall mean discharge of 35.20 ml/s, with mean discharge by duration ranging from 33.20 to 36.93 ml/s. In a separate two-container test, applying 350 ml increased the sensor reading by an average of 265 units. At 28.35°C and a moisture-index reading of 694.09, the dominant-rule calculation selected 6 seconds, matching the reported LCD display. Scheduled operation used 08:00, 13:00, and 17:00. The prototype demonstrates scheduled actuation and consistency of the reported calculation for one operating condition. The moisture index is not interpreted as calibrated volumetric water content. Water savings and maintenance of the target range require further testing with post-irrigation measurements and a comparison treatment.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

KATA KUNCI
Sistem penyiram tanaman otomatis
Arduino
Algoritma fuzzy
Kelembapan tanah
Otomatisasi pertanian

CORRESPONDING AUTHOR
Dr. Indra Surya Permana, M.M.
Program Studi Informatika, Fakultas Teknik, Institut Teknologi dan Kesehatan Mahardika
Jl. Taman Pemuda No. 2, Cirebon 45153, Jawa Barat, Indonesia
Email: indra.surya@itekesmahardika.ac.id

ABSTRAK
Penelitian ini mengembangkan prototipe penyiram tanaman otomatis berbasis Arduino untuk SMAN 1 Beber. Sistem menggabungkan sensor suhu TMP36, sensor kelembapan tanah, RTC DS3231, dan pompa yang dikendalikan relai. Sebanyak 12 aturan fuzzy memetakan suhu dan indeks kelembapan relatif menjadi konsekuen singleton berdurasi 2–18 detik. Keluaran ditentukan dari konsekuen aturan dengan kekuatan aktivasi terbesar. Kalibrasi pompa menggunakan sepuluh ulangan pada masing-masing durasi 5, 10, 15, dan 20 detik. Analisis ulang pengukuran menghasilkan debit rata-rata keseluruhan 35,20 ml/detik; rata-rata setiap kelompok durasi berkisar 33,20–36,93 ml/detik. Pada pengujian terpisah menggunakan dua wadah tanah, pemberian 350 ml air meningkatkan pembacaan sensor rata-rata 265 unit. Untuk suhu 28,35°C dan indeks kelembapan 694,09, perhitungan aturan dominan menghasilkan durasi 6 detik, sesuai tampilan LCD yang dilaporkan. Jadwal operasi ditetapkan pada pukul 08:00, 13:00, dan 17:00. Prototipe menunjukkan kemampuan aktuasi terjadwal dan konsistensi perhitungan pada satu kondisi operasi. Indeks sensor tidak ditafsirkan sebagai kadar air volumetrik yang telah dikalibrasi. Penghematan air dan kemampuan mempertahankan rentang target memerlukan pengujian lanjutan dengan pengukuran pascapenyiraman serta perlakuan pembanding.

PENDAHULUAN

Penyiraman merupakan bagian penting dalam pemeliharaan tanaman taman sekolah. Kebutuhan air berbeda menurut tanaman, media tanam, dan lingkungan, sehingga jadwal

tetap perlu dilengkapi informasi kondisi tanah. Tinjauan García dkk. (2020) menunjukkan bahwa sensor dan perangkat kendali merupakan komponen utama sistem irigasi cerdas. Meskipun demikian, penggunaan sensor saja belum membuktikan penghematan air; evaluasi perlu membandingkan kebutuhan tanaman, volume pemberian air, dan respons setelah penyiraman.

Pembacaan sensor harus dikaitkan dengan karakteristik tanah sebelum digunakan sebagai dasar kendali. Nagahage dkk. (2019) memvalidasi sensor kapasitif melalui kalibrasi terhadap kadar air acuan. Placidi dkk. (2020) mengkarakterisasi sensor kelembapan berbiaya rendah, sedangkan Placidi dkk. (2021) menghubungkan keluaran sensor dengan model kadar air dan kondisi tanah. Pada sistem berbasis kadar air volumetrik, de Moura Campos dkk. (2021) menguji ambang pemicu irigasi dan efisiensi penggunaan air pada tomat. Studi tersebut mendasari pemisahan indeks sensor, ambang kendali, dan hasil agronomis dalam penelitian ini.

Di SMAN 1 Beber, pemeliharaan taman mencakup penyiraman oleh siswa dan petugas sekolah. Kesibukan kegiatan sekolah dan pergantian musim dapat menghambat keteraturan pelaksanaannya. Penyiraman menggunakan ember atau selang juga memerlukan keterlibatan petugas secara langsung. Kebutuhan pengembangan dalam penelitian ini adalah perangkat yang dapat mengaktifkan pompa pada jadwal tertentu dengan mempertimbangkan suhu dan pembacaan kelembapan. Besarnya pemborosan air atau kerusakan tanaman akibat penyiraman manual tidak diukur, sehingga tidak digunakan sebagai hasil pembanding.

Mikrokontroler memungkinkan pembacaan sensor dan pengendalian pompa secara lokal. Logika fuzzy memetakan masukan melalui derajat keanggotaan antara 0 dan 1 untuk menyusun keputusan kendali. Sugandi dan Armentaria (2021) menggabungkan suhu dan kelembapan tanah untuk menentukan durasi penyiraman, sedangkan Singh dkk. (2022) menggunakan empat variabel lingkungan. Wahjuni dkk. (2022) menguji irigasi tetes berbasis fuzzy Sugeno pada cabai. Pemilihan masukan dan aturan perlu disesuaikan dengan tujuan pengujian serta keterbatasan perangkat.

Tabel 1 membandingkan pendekatan kendali yang dekat dengan penelitian ini. Mursalin dkk. (2020) memanfaatkan sensor kelembapan tanah, sementara Wahjuni dkk. (2022) menerapkan kendali fuzzy pada irigasi tetes cabai. Di luar kendali lokal, Glória dkk. (2020) mengembangkan pengelolaan irigasi berbasis Internet of Things, dan Tsiropoulos dkk. (2022) mengembangkan penjadwalan irigasi dengan perangkat otonom yang memperhatikan ketersediaan sumber air. Penelitian ini berfokus pada integrasi suhu, indeks kelembapan, RTC, dan karakterisasi debit pompa pada prototipe taman sekolah. Kontribusinya berupa evaluasi integrasi lokal, bukan algoritma fuzzy baru atau sistem IoT.

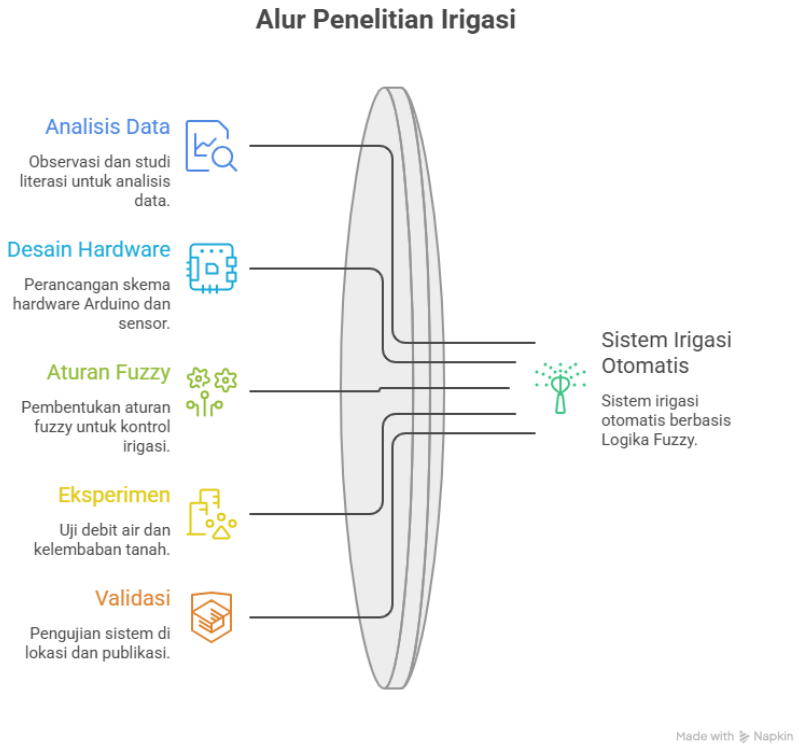
Tabel 1 Sintesis perbandingan penelitian terdahulu (State of the Art)

No.	Peneliti dan tahun	Fokus Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil yang Dicapai	Kelemahan / Kesenjangan
1	Mursalin dkk. (2020)	Penyiram otomatis sensor kelembapan	Logika fuzzy, Arduino Uno, sensor kelembapan tanah, LCD	Alat berfungsi baik menyiram tanaman otomatis	Hanya satu variabel input (kelembapan); suhu belum diintegrasikan.
2	Wahjuni dkk. (2022)	Irigasi tetes tanaman cabai	Fuzzy Sugeno, Arduino Uno, sensor kelembapan dan suhu	Mengatur penyiraman pada pengujian cabai di rumah kaca	Konteks tanaman dan media berbeda; hasilnya tidak langsung membuktikan kinerja prototipe taman sekolah.
3	Penelitian Ini	Penyiram tanaman otomatis adaptif SMAN 1 Beber	Kendali fuzzy berkonsekuen singleton, Arduino Uno, TMP36, sensor kelembapan, RTC DS3231	Aktuasi terjadwal dan debit pompa rata-rata 35,20 ml/detik	Pengujian terbatas pada prototipe; efektivitas agronomis belum dibandingkan.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan prototipe penyiram tanaman otomatis di taman SMAN 1 Beber dan mengevaluasi debit pompa, respons pembacaan kelembapan, serta kesesuaian satu contoh perhitungan kendali dengan tampilan perangkat. Pengukuran suhu dan indeks kelembapan digunakan sebagai masukan basis aturan fuzzy, sedangkan RTC menentukan waktu aktivasi. Ruang lingkup evaluasi mencakup pengujian fungsional dan analisis ulang data kalibrasi yang tersedia.

METODE PENELITIAN

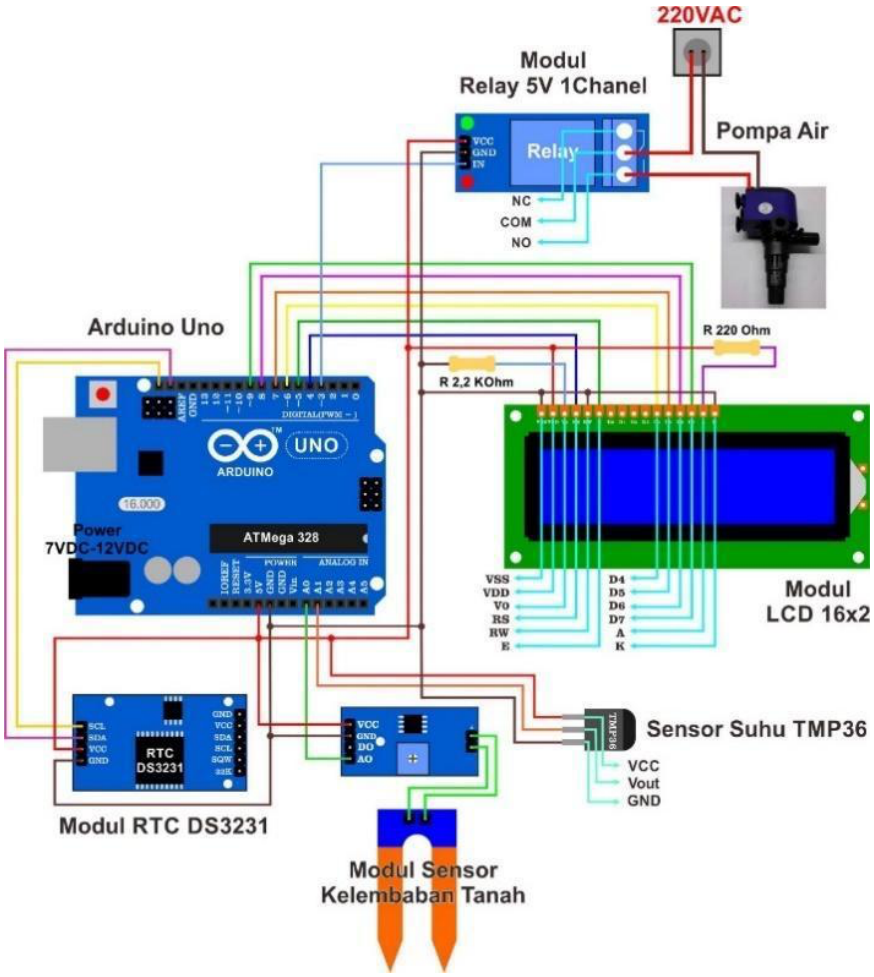
Penelitian menggunakan pendekatan pengembangan prototipe melalui analisis kebutuhan dan literatur, perancangan perangkat keras, penyusunan aturan kendali, pengujian, dan evaluasi hasil (Gambar 1). Evaluasi meliputi kalibrasi debit pompa pada empat durasi dengan sepuluh ulangan per durasi, uji perubahan pembacaan kelembapan pada dua wadah tanah, serta pemeriksaan satu contoh keluaran kendali saat perangkat beroperasi. Seluruh analisis menggunakan pengukuran yang disajikan dalam naskah.



Gambar 1 Diagram alir tahapan penelitian sistem irigasi otomatis

Penelitian dilakukan pada prototipe untuk taman SMAN 1 Beber, Kabupaten Cirebon. Arduino Uno berbasis ATmega328P berfungsi sebagai pengolah masukan dan pengendali aktuator. Sensor TMP36 dihubungkan ke A2 dan sensor kelembapan ke A3; RTC DS3231 menggunakan antarmuka I2C. Relai mengendalikan pompa 18 W pada sumber 220 VAC, sementara LCD 16 × 2 menampilkan waktu, suhu, pembacaan kelembapan, dan durasi penyiraman. Gambar 2 menyajikan skema perangkat dan Tabel 2 merangkum koneksi. Nomor pin RS LCD belum ditetapkan dalam tabel karena pencatatan awal bertumpang tindih dengan pin relai; keduanya memerlukan jalur kendali yang terpisah.

Pembacaan kelembapan diperlakukan sebagai indeks relatif. Arah dan besarnya perubahan mengikuti konfigurasi sensor yang digunakan; indeks tersebut tidak langsung dinyatakan sebagai persentase kadar air tanah. Kalibrasi sensor terhadap metode acuan merupakan tahap tersendiri sebelum pembacaan dapat ditafsirkan secara kuantitatif sebagai kadar air (Adla dkk., 2020).

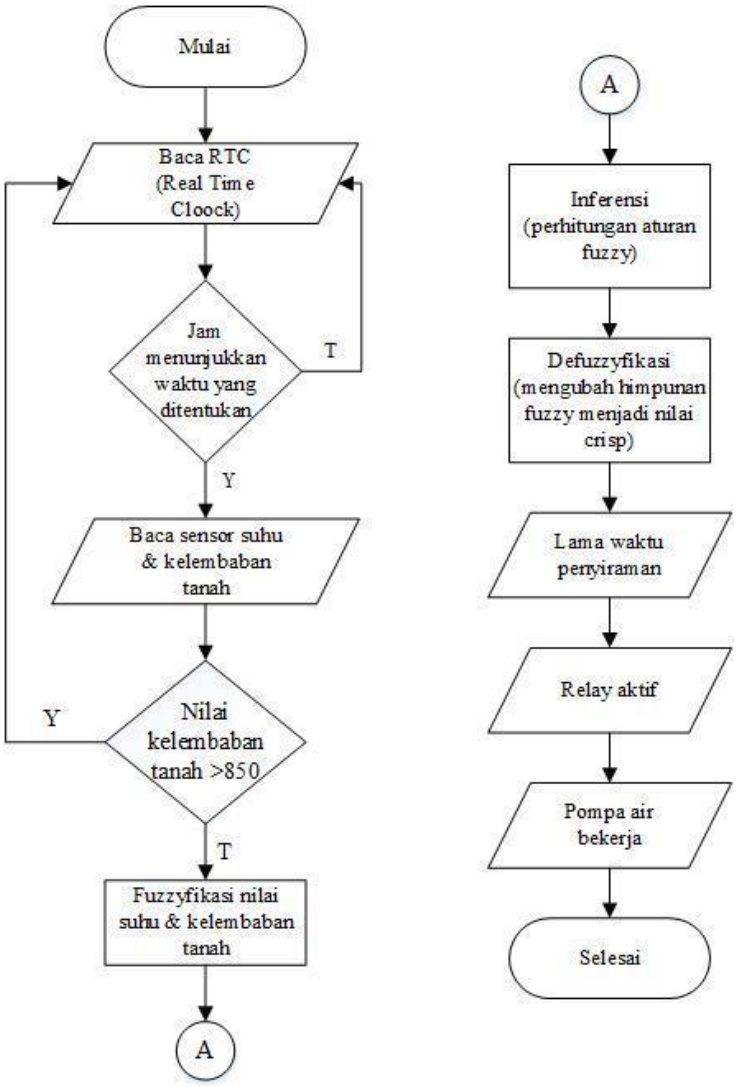


Gambar 2 Skema perangkat keras prototipe; penetapan pin RS LCD memerlukan verifikasi pengkabelan

Tabel 2 Konfigurasi pengkabelan pin Arduino Uno dengan modul periferal

Pin Arduino	Periferal / Modul	Keterangan Koneksi	Pin Arduino	Periferal / Modul	Keterangan Koneksi
SCL	RTC DS3231	Serial Clock (I2C)	A2	Sensor Suhu TMP36	Vout (Analog)
SDA	RTC DS3231	Serial Data (I2C)	5V / GND	Sensor Suhu TMP36	VCC / Ground
5V / GND	RTC DS3231	VCC / Ground	Pin 3 (Digital)	Relay 5V 1-Ch	IN (Signal Trigger)
A3	Sensor Moisture	AO (Analog Out)	5V / GND	Relay 5V 1-Ch	VCC / Ground
5V / GND	Sensor Moisture	VCC / Ground	Pin 4–8 (Digital)	LCD 16x2	E, D4, D5, D6, D7
Belum terverifikasi	LCD 16x2	RS; terpisah dari pin relai	5V / GND	LCD 16x2	VDD, Kontras, K, A

Gambar 3 menunjukkan alur kendali. RTC memicu pembacaan sensor pada pukul 08:00, 13:00, dan 17:00. Jadwal ini merupakan konfigurasi pengujian, bukan rekomendasi agronomi untuk semua tanaman. Jika indeks kelembapan melebihi 850, penyiraman dibatalkan. Pada kondisi lainnya, masukan diproses melalui fuzzifikasi, evaluasi 12 aturan, dan pemilihan konsekuen aturan dominan. Relai mengaktifkan pompa sesuai durasi terpilih. Ambang 850 diperlakukan sebagai batas operasional sensor; hubungan langsungnya dengan kondisi hujan atau kejenuhan tanah belum diukur.



Gambar 3 Flowchart algoritma kendali sistem penyiram taman otomatis

Fuzzifikasi menggunakan empat himpunan suhu dan tiga himpunan indeks kelembapan. Sesuai Gambar 4, Dingin bernilai 1 hingga 19°C dan menurun linear menjadi 0 pada 23°C; Sejuk berbentuk segitiga dengan titik 19, 23, dan 27°C; Normal bertitik 23, 27, dan 31°C; Panas meningkat dari 0 pada 27°C menjadi 1 pada 31°C dan tetap 1 hingga batas domain 35°C. Sesuai Gambar 5, Kering bernilai 1 hingga 237 dan menurun menjadi

0 pada 380; Lembap meningkat dari 237 hingga 380, bernilai 1 pada 380–570, dan menurun menjadi 0 pada 712; Basah meningkat dari 0 pada 570 menjadi 1 pada 712, kemudian tetap 1 hingga 950. Dengan demikian, 35°C dan 950 merupakan batas domain gambar, sedangkan 31°C dan 712 adalah awal daerah saturasi keanggotaan.

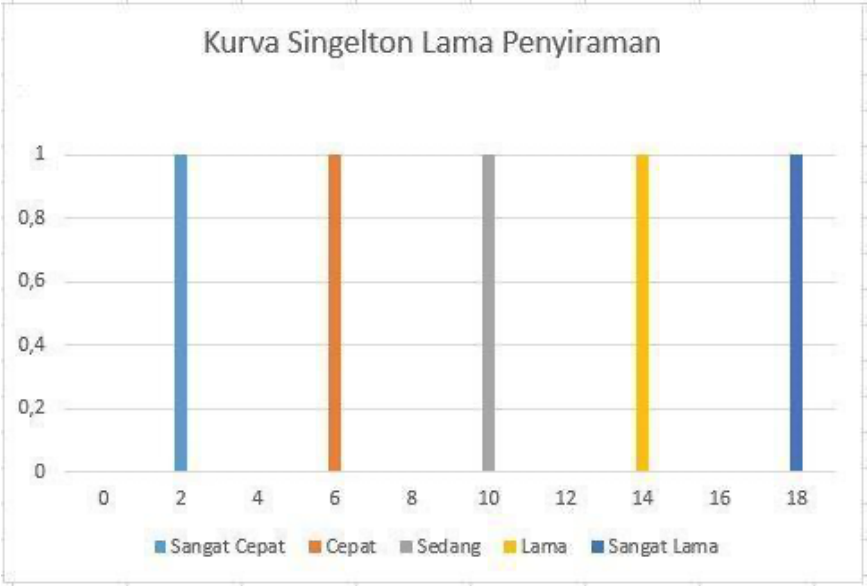


Gambar 4 Kurva fungsi keanggotaan variabel input suhu



Gambar 5 Kurva fungsi keanggotaan variabel input kelembapan tanah

Keluaran berupa lima konsekuen singleton: Sangat Cepat (2 detik), Cepat (6 detik), Sedang (10 detik), Lama (14 detik), dan Sangat Lama (18 detik), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Tabel 3 memuat 12 kombinasi aturan dari empat himpunan suhu dan tiga himpunan kelembapan. Setiap aturan menggunakan operator AND berupa minimum kedua derajat keanggotaan. Keluaran singleton juga digunakan pada sistem fuzzy Sugeno untuk irigasi (Wahjuni dkk., 2022). Dalam penelitian ini, prosedur pemilihan satu aturan dominan dinyatakan secara eksplisit agar tidak disamakan dengan agregasi rata-rata berbobot.



Gambar 6 Kurva singleton fungsi keanggotaan output lama waktu penyiraman

Tabel 3 Matriks 12 aturan inferensi fuzzy (Fuzzy Rules)

Kelembapan Tanah \ Suhu	Dingin	Sejuk	Normal	Panas
Kering	Sedang (10 s)	Sedang (10 s)	Lama (14 s)	Sangat Lama (18 s)
Lembap	Cepat (6 s)	Cepat (6 s)	Sedang (10 s)	Lama (14 s)
Basah	Sangat Cepat (2 s)	Sangat Cepat (2 s)	Cepat (6 s)	Cepat (6 s)

Kekuatan aktivasi aturan ke-i dihitung dengan $\alpha i = \min[\mu suhu(T), \mu kelembapan(M)]$. Untuk prosedur yang dianalisis dalam penelitian ini, keluaran ditentukan melalui $i^* = \text{argmax}i(\alpha i)$ dan $Z = zi^*$, dengan zi berupa durasi singleton. Prosedur tersebut disebut seleksi aturan dominan. Pada model Sugeno dengan agregasi rata-rata berbobot, keluaran diperoleh dari $Z = \Sigma(\alpha izi)/\Sigma\alpha i$ untuk $\Sigma\alpha i > 0$. Kedua prosedur tidak disamakan. Evaluasi contoh berikut mengikuti rumus seleksi aturan dominan yang sesuai dengan durasi 6 detik pada tampilan perangkat; perilaku saat bobot maksimum sama atau seluruh bobot nol tidak dievaluasi dalam pengujian ini.

DISKUSI DAN PEMBAHASAN

Kalibrasi debit menggunakan pompa submersible 18 W pada tegangan 220 VAC. Volume air dicatat pada durasi 5, 10, 15, dan 20 detik, masing-masing sebanyak sepuluh ulangan (Tabel 4). Debit setiap pengukuran dihitung dengan $Qij = Vij/tj$, dengan V dalam ml dan t dalam detik. Tabel 5 menyajikan perhitungan debit per ulangan. Rata-rata kelompok dihitung dari sepuluh nilai debit, sedangkan simpangan baku sampel menggunakan pembagi $n - 1$. Tabel 6 merangkum analisis ulang data yang sama; tidak ada pengukuran baru yang ditambahkan.

Tabel 4 Hasil pengujian keluaran debit pompa air 18 Watt

Percobaan Ke-	5 Detik (ml)	10 Detik (ml)	15 Detik (ml)	20 Detik (ml)
1	160	380	580	720
2	160	350	540	720
3	170	350	540	640
4	180	360	530	710
5	160	330	530	700
6	160	360	530	750
7	180	340	580	700
8	160	380	580	680
9	170	350	570	720
10	160	340	560	710

Tabel 5 Perhitungan rata-rata debit keluaran air per detik

Percobaan Ke-	Debit 5 s (ml/s)	Debit 10 s (ml/s)	Debit 15 s (ml/s)	Debit 20 s (ml/s)	Rata-rata (ml/s)
1	32,00	38,00	38,67	36,00	36,17
2	32,00	35,00	36,00	36,00	34,75
3	34,00	35,00	36,00	32,00	34,25
4	36,00	36,00	35,33	35,50	35,71
5	32,00	33,00	35,33	35,00	33,83
6	32,00	36,00	35,33	37,50	35,21
7	36,00	34,00	38,67	35,00	35,92
8	32,00	38,00	38,67	34,00	35,67
9	34,00	35,00	38,00	36,00	35,75
10	32,00	34,00	37,33	35,50	34,71
Rata-rata Keseluruhan	—	—	—	—	35,20

Tabel 6 Ringkasan statistik debit berdasarkan data kalibrasi pada Tabel 4

Durasi (s)	n	Volume rata-rata (ml)	Debit rata-rata (ml/s)	SD debit (ml/s)
5	10	166,00	33,20	1,69
10	10	354,00	35,40	1,65
15	10	554,00	36,93	1,48
20	10	705,00	35,25	1,46

Catatan: SD adalah simpangan baku sampel dari sepuluh ulangan pada setiap durasi. Tabel ini merupakan analisis ulang data Tabel 4, bukan seri eksperimen tambahan.

Debit rata-rata keseluruhan dari 40 pengukuran adalah 35,1958 ml/detik, dibulatkan menjadi 35,20 ml/detik. Tabel 6 memperlihatkan perbedaan rata-rata antar-durasi, sehingga satu nilai debit digunakan sebagai pendekatan operasional dan bukan konstanta yang berlaku tepat untuk setiap penyiraman. Pengujian dua wadah tanah kering menggunakan masing-masing 350 ml air menghasilkan kenaikan pembacaan rata-rata 265 unit. Rasio 26,5 unit/detik diperoleh dengan membagi perubahan tersebut dengan interval 10 detik; rasio ini tidak menunjukkan bahwa respons tanah selalu linear. Rentang 617–712 dipakai sebagai target indeks sensor prototipe, bukan kadar air 65%–75%. Penetapan kadar air

gravimetrik atau volumetrik memerlukan kalibrasi terhadap metode acuan dan karakteristik tanah (Adla dkk., 2020; Basterrechea dkk., 2021).

Implementasi fisik sistem yang telah dirakit diuji coba langsung di taman SMAN 1 Beber. Modul LCD 16×2 menampilkan informasi pemantauan real-time yang mencakup identitas sistem, pembacaan jam dan kalender RTC, nilai sensor suhu dan kelembapan tanah, serta status keputusan durasi penyiraman, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7 Tampilan modul LCD 16x2 saat pengoperasian sistem penyiram otomatis

Contoh perhitungan menggunakan suhu 28,35°C dan indeks kelembapan 694,09 sebagaimana terbaca pada LCD (Gambar 7). Berdasarkan Gambar 4, μDingin = 0, μSejuk = 0, μNormal = (31 − 28,35)/(31 − 27) = 0,6625, dan μPanas = (28,35 − 27)/(31 − 27) = 0,3375. Berdasarkan Gambar 5, μKering = 0, μLembap = (712 − 694,09)/(712 − 570) = 0,1261, serta μBasah = (694,09 − 570)/(712 − 570) = 0,8739. Nilai disajikan dengan empat desimal; evaluasi aturan memakai nilai sebelum pembulatan.

Empat aturan memiliki bobot positif (Tabel 7). Aturan Normal–Basah memberikan bobot terbesar 0,6625 dengan konsekuen 6 detik. Delapan aturan lainnya berbobot nol karena salah satu masukan memiliki derajat keanggotaan nol. Penomoran aturan mengikuti urutan suhu Dingin, Sejuk, Normal, Panas; pada setiap suhu, urutan kelembapan adalah Kering, Lembap, Basah.

Tabel 7 Aturan aktif pada suhu 28,35°C dan indeks kelembapan 694,09

Aturan	Suhu	Kelembapan	αi	zi (s)
R8	Normal	Lembap	0,1261	10
R9	Normal	Basah	0,6625	6
R11	Panas	Lembap	0,1261	14
R12	Panas	Basah	0,3375	6

Seleksi aturan dominan menghasilkan Z = 6 detik, sesuai tampilan LCD untuk kasus yang diperiksa. Kesesuaian ini mendukung konsistensi perhitungan pada satu pasangan masukan, tanpa menyatakan akurasi 100% untuk seluruh kondisi. Sebagai pembanding

matematis, agregasi Sugeno rata-rata berbobot terhadap aturan aktif yang sama menghasilkan sekitar 7,21 detik. Nilai pembanding tersebut bukan keluaran perangkat atau hasil percobaan baru; perbedaan ini memperjelas alasan pemisahan istilah kedua prosedur.

Pada indeks awal 694,09, pembacaan sudah berada dalam target operasional 617–712. Perkalian debit rata-rata 35,20 ml/detik dengan durasi 6 detik memberikan estimasi volume 211,2 ml. Jika rasio respons 26,5 unit/detik diekstrapolasi secara linear, pembacaan diperkirakan mencapai 853,09. Estimasi ini berada di atas target dan menunjukkan bahwa rasio dari uji dua wadah tidak dapat langsung dijadikan jaminan pemeliharaan kelembapan. Karena pembacaan pascapenyiraman tidak dicatat dalam data yang disajikan, keberhasilan mempertahankan target belum ditetapkan. Untuk pengembangan kendali, penyiraman perlu dievaluasi melalui pembacaan sebelum dan sesudah aktuasi, termasuk kemungkinan penghentian pompa saat target tercapai.

Stabilitas operasional dan keterbatasan pengujian

RTC menjalankan konfigurasi jadwal pukul 08:00, 13:00, dan 17:00. Pada pengoperasian kontinu 24 jam, penurunan kinerja mikrokontroler dan relai teramati. Fluktuasi suhu panel dan catu daya diperlakukan sebagai dugaan penyebab, karena pengukuran keduanya tidak disajikan. Penambahan ventilasi dan perbaikan regulasi tegangan merupakan usulan pengembangan yang masih memerlukan pengujian.

Pengujian debit mencakup sepuluh ulangan per durasi, tetapi respons tanah hanya diringkas dari dua wadah dan keputusan kendali diperiksa pada satu contoh masukan. Jenis tanaman, karakteristik tanah, ukuran wadah, periode penelitian, serta galat sensor terhadap metode acuan belum dilaporkan secara lengkap. Pembatasan ini memengaruhi reproduksibilitas dan generalisasi. Hasil efisiensi air pada sistem dengan pengukuran kadar air volumetrik, seperti de Moura Campos dkk. (2021), tidak dapat langsung dipindahkan ke prototipe ini. Pengujian multi-variabel Singh dkk. (2022) juga menegaskan bahwa ruang kondisi lingkungan perlu diperluas sebelum menyimpulkan kinerja agronomis. Foto LCD memuat tanggal RTC 8 November 2016; tanpa catatan pengukuran, tanggal tampilan tersebut belum dapat digunakan untuk menetapkan periode penelitian.

Pengukuran pascapenyiraman diperlukan untuk menguji apakah target kelembapan dapat dipertahankan. Millán dkk. (2019) mengevaluasi penjadwalan irigasi berbasis sensor pada tanaman plum, sedangkan Yousif dan Abdalgader (2022) menggabungkan pengujian dan pemodelan dalam sistem pemantauan serta penyiraman. Pendekatan tersebut memberikan acuan bagi evaluasi lanjutan, tetapi hasilnya tidak menggantikan data pascapenyiraman yang belum tersedia pada prototipe ini.

KESIMPULAN

Prototipe penyiram tanaman berbasis Arduino Uno mengintegrasikan sensor suhu, indeks kelembapan tanah, penjadwalan RTC, dan kendali pompa dengan 12 aturan fuzzy. Analisis ulang 40 pengukuran kalibrasi menghasilkan debit rata-rata 35,20 ml/detik dengan variasi antar-durasi. Pengujian dua wadah menunjukkan perubahan rata-rata 265 unit

setelah pemberian 350 ml air. Pada suhu 28,35°C dan indeks 694,09, seleksi aturan dominan menghasilkan durasi 6 detik yang sesuai tampilan LCD. Kontribusi penelitian terletak pada integrasi prototipe, karakterisasi debit, serta pemeriksaan satu contoh keputusan kendali. Efisiensi penggunaan air dan kestabilan rentang kelembapan belum dapat disimpulkan dari pengujian ini.

Pengembangan berikutnya diarahkan pada kalibrasi sensor terhadap kadar air tanah acuan, pembacaan pascapenyiraman, pengujian lintas kondisi masukan, dan perbandingan konsumsi air dengan penyiraman manual. Dokumentasi kode, pengkabelan, kondisi tanah, serta tegangan dan suhu panel diperlukan untuk mengevaluasi replikasi dan stabilitas. Integrasi sensor lingkungan tambahan atau pemantauan jarak jauh dapat dipertimbangkan setelah fungsi kendali dasar dan keandalan perangkat teruji.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh hibah Penelitian Dosen Institut Teknologi dan Kesehatan (ITEKes) Mahardika tahun pelaksanaan 2024. Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) ITEKes Mahardika atas dukungan pendanaan dan fasilitasi riset, serta kepada Kepala Sekolah, dewan guru, dan staf SMAN 1 Beber atas izin penelitian, kerja sama, dan penyediaan fasilitas lokasi studi kasus.

KONTRIBUSI PENULIS

Para penulis menyatakan kontribusi mereka terhadap penelitian dan penyusunan manuskrip ini dalam format CRediT (Contributor Roles Taxonomy) sebagai berikut. Dr. Indra Surya Permana, M.M.: Conceptualization, Methodology, Formal Analysis, Supervision, Project Administration, dan Writing - Original Draft; Aurelia Septia Apriani: Investigation, Data Curation, dan Resources; Jaisyi Bagir Rafsyahid: Software, Hardware Prototyping, dan Validation; serta Muhamad Fuad Aziz: Formal Analysis, Investigation, dan Writing - Review & Editing. Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir dari naskah ini.

PERNYATAAN KETERSEDIAAN DATA

Data primer hasil eksperimen kalibrasi sensor, pengujian debit pompa, serta dokumentasi prototipe yang mendukung temuan dalam penelitian ini tersedia dari penulis korespondensi atas permintaan yang wajar.

PERNYATAAN BEBAS KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan finansial maupun hubungan personal yang dapat mempengaruhi keabsahan hasil penelitian yang dilaporkan dalam naskah ini.

PERNYATAAN ETIKA PENELITIAN DAN PUBLIKASI

Para penulis menyatakan bahwa penelitian dan penulisan naskah ini telah mematuhi prinsip etika penelitian ilmiah, orisinalitas karya, serta bebas dari segala bentuk fabrikasi data dan plagiasi.

PERNYATAAN PEMANFAATAN TEKNOLOGI ASISTIF

Dalam penyiapan naskah, kecerdasan buatan generatif dan teknologi asistif digunakan untuk penyuntingan bahasa, penataan naskah, penelusuran dan pemeriksaan referensi, serta bantuan pemeriksaan konsistensi perhitungan berdasarkan data yang tersedia. Penggunaan tersebut tidak menghasilkan pengukuran eksperimen baru. Tim penulis telah meninjau seluruh perubahan dan bertanggung jawab penuh atas keakuratan, integritas, serta versi akhir naskah.

REFERENSI

Adla, S., Rai, N. K., Karumanchi, S. H., Tripathi, S., Disse, M., & Pande, S. (2020). Laboratory calibration and performance evaluation of low-cost capacitive and very low-cost resistive soil moisture sensors. *Sensors*, 20(2), 363. https://doi.org/10.3390/s20020363

Basterrechea, D. A., Rocher, J., Parra, M., Parra, L., Marin, J. F., Mauri, P. V., & Lloret, J. (2021). Design and calibration of moisture sensor based on electromagnetic field measurement for irrigation monitoring. *Chemosensors*, 9(9), 251. https://doi.org/10.3390/chemosensors9090251

de Moura Campos, H., de Oliveira, H. F. E., Mesquita, M., de Castro, L. E. V., & Ferrarezi, R. S. (2021). Low-cost open-source platform for irrigation automation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, 106481. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106481

García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2020). Iot-based smart irrigation systems: an overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. *Sensors*, 20(4), 1042. https://doi.org/10.3390/s20041042

Glória, A., Dionisio, C., Simões, G., Cardoso, J., & Sebastião, P. (2020). Water management for sustainable irrigation systems using Internet-of-Things. *Sensors*, 20(5), 1402. https://doi.org/10.3390/s20051402

Millán, S., Casadesús, J., Campillo, C., Moñino, M. J., & Prieto, M. H. (2019). Using soil moisture sensors for automated irrigation scheduling in a plum crop. *Water*, 11(10), 2061. https://doi.org/10.3390/w11102061

Mursalin, S. B., Sunardi, H., & Zulkifli, Z. (2020). Sistem penyiraman tanaman otomatis berbasis sensor kelembaban tanah menggunakan logika fuzzy. *Jurnal Ilmiah Informatika Global*, 11(1), 47–54. https://doi.org/10.36982/jiig.v11i1.1072

Nagahage, E. A. A. D., Nagahage, I. S. P., & Fujino, T. (2019). Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. *Agriculture*, 9(7), 141. https://doi.org/10.3390/agriculture9070141

Placidi, P., Morbidelli, R., Fortunati, D., Papini, N., Gobbi, F., & Scorzoni, A. (2021). Monitoring soil and ambient parameters in the IoT precision agriculture scenario: an original modeling approach dedicated to low-cost soil water content sensors. *Sensors*, 21(15), 5110. https://doi.org/10.3390/s21155110

Placidi, P., Gasperini, L., Grassi, A., Cecconi, M., & Scorzoni, A. (2020). Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. *Sensors*, 20(12), 3585. https://doi.org/10.3390/s20123585

Singh, A. K., Tariq, T., Ahmer, M. F., Sharma, G., Bokoro, P. N., & Shongwe, T. (2022). Intelligent control of irrigation systems using fuzzy logic controller. *Energies*, 15(19), 7199. https://doi.org/10.3390/en15197199

Sugandi, B., & Armentaria, J. (2021). Sistem penyiraman tanaman otomatis menggunakan metode logika fuzzy. *Journal of Applied Electrical Engineering*, 5(1), 5–8. https://doi.org/10.30871/jaee.v5i1.2991

Tsiropoulos, Z., Skoubris, E., Fountas, S., Gravalos, I., & Gemtos, T. (2022). Development of an energy efficient and fully autonomous low-cost IoT system for irrigation scheduling in water-scarce areas using different water sources. *Agriculture*, 12(7), 1044. https://doi.org/10.3390/agriculture12071044

Wahjuni, S., Wulandari, W., & Kholili, M. (2022). Development of fuzzy-based smart drip irrigation system for chili cultivation. *JUITA: Jurnal Informatika*, 10(1), 115–125. https://doi.org/10.30595/juita.v10i1.12998

Yousif, J. H., & Abdalgader, K. (2022). Experimental and mathematical models for real-time monitoring and auto watering using IoT architecture. *Computers*, 11(1), 7. https://doi.org/10.3390/computers11010007