

**SURAT PERNYATAAN
HKI**

**PEMANFAATAN AIoT UNTUK INTEGRASI KOLAM IKAN AIR TAWAR DAN
PERTANIAN HORTIKULTURA BERBASIS IRIGASI NUTRISI OTOMATIS**



NAMA:

Dr. Jonathan E. Koehuan, ST, MP, Alfred G.O. Kase, S.Pi, M.Si, Ph.D, Dr. Ir. Jemmy

J. S. Dethan, MP

UNIVERSITAS KRISTEN ARTHA WACANA KUPANG

2026

SURAT PENCATATAN CIPTAAN

Dalam rangka perlindungan ciptaan di bidang ilmu pengetahuan, seni dan sastra berdasarkan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta, dengan ini menerangkan:

Nomor dan tanggal permohonan : EC002026021754, 4 Februari 2026

Pencipta

Nama : **Dr. Jonathan E. Koehuan, ST, MP, Alfred G.O. Kase, S.Pi, M.Si, Ph.D dkk**

Alamat : Jl. Lantana Dalam No.10 Naikoten I - Kupang, Kota Raja, Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur, 85118

Kewarganegaraan : Indonesia

Pemegang Hak Cipta

Nama : **Dr. Jonathan E. Koehuan, ST, MP, Alfred G.O. Kase, S.Pi, M.Si, Ph.D dkk**

Alamat : Jl. Lantana Dalam No.10 Naikoten I - Kupang, Kota Raja, Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur, 85118

Kewarganegaraan : Indonesia

Jenis Ciptaan : **Laporan Penelitian**

Judul Ciptaan : **PEMANFAATAN AIoT UNTUK INTEGRASI KOLAM IKAN AIR TAWAR DAN PERTANIAN HORTIKULTURA BERBASIS IRIGASI NUTRISI OTOMATIS**

Tanggal dan tempat diumumkan untuk pertama kali di wilayah Indonesia atau di luar wilayah Indonesia : 4 Februari 2026, di Kota Kupang

Jangka waktu perlindungan : Berlaku selama hidup Pencipta dan terus berlangsung selama 70 (tujuh puluh) tahun setelah Pencipta meninggal dunia, terhitung mulai tanggal 1 Januari tahun berikutnya.

Nomor Pencatatan : 001129905

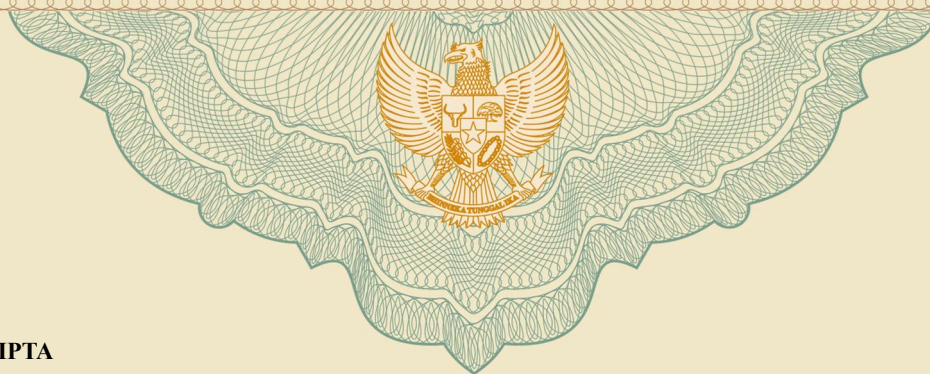
adalah benar berdasarkan keterangan yang diberikan oleh Pemohon.

Surat Pencatatan Hak Cipta atau produk Hak terkait ini sesuai dengan Pasal 72 Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta.



a.n. MENTERI HUKUM
DIREKTUR JENDERAL KEKAYAAN INTELEKTUAL
u.b
Direktur Hak Cipta dan Desain Industri

Agung Damarsasongko,SH.,MH.
NIP. 196912261994031001



LAMPIRAN PENCIPTA

No	Nama	Alamat
1	Dr. Jonathan E. Koehuan, ST, MP	Jl. Lantana Dalam No.10 Naikoten I - Kupang Kota Raja, Kota Kupang
2	Alfred G.O. Kase, S.Pi, M.Si, Ph.D	Kelurahan Oebufu, Kecamatan Oebobo, Kota Kupang, NTT Oebobo, Kota Kupang
3	Dr. Ir. Jemmy J. S. Dethan, MP	Jl. Suprpto No 39 Oebobo Kupang NTT Oebobo, Kota Kupang

LAMPIRAN PEMEGANG

No	Nama	Alamat
1	Dr. Jonathan E. Koehuan, ST, MP	Jl. Lantana Dalam No.10 Naikoten I - Kupang Kota Raja, Kota Kupang
2	Alfred G.O. Kase, S.Pi, M.Si, Ph.D	Kelurahan Oebufu, Kecamatan Oebobo, Kota Kupang, NTT Oebobo, Kota Kupang
3	Dr. Ir. Jemmy J. S. Dethan, MP	Jl. Suprpto No 39 Oebobo Kupang NTT Oebobo, Kota Kupang



LAPORAN AKHIR PENELITIAN UNGGULAN UNIVERSITAS



**PEMANFAATAN AIoT UNTUK INTEGRASI KOLAM IKAN AIR
TAWAR DAN PERTANIAN HORTIKULTURA BERBASIS IRIGASI
NUTRISI OTOMATIS**

TIM PENGUSUL

Dr. JONATHAN E. KOEHUAN, ST, MP (7063748649130090) KETUA
ALFRED G.O. KASE, SPi, MSi, Ph.D (7859747648130112) ANGGOTA
Dr. IR. JEMMY J. S. DETHAN, MP (4439746647130090) ANGGOTA

UNIVERSITAS KRISTEN ARTHA WACANA

Desember 2025

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Penelitian : PEMANFAATAN AIoT UNTUK INTEGRASI KOLAM IKAN
AIR TAWAR DAN PERTANIAN HORTIKULTURA
BERBASIS IRIGASI NUTRISI OTOMATIS

Ketua :

- a) Nama Lengkap : Dr. Jonathan E. Koehuan, ST, MP
- b) NIDN : 0831077001
- c) SINTA ID : 6644876
- d) Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
- e) Program Studi : Mekanisasi Pertanian
- f) Nomor HP : 081339196670
- g) Alamat surel (e-mail) : jekoehuan@gmail.com

Anggota (1) :

- a) Nama Lengkap : Alfred G.O. Kase, SPi, MSi, Ph.D
- b) NIDN : 7859747648130112
- c) SINTA ID : 6654323
- d) Program Studi : Manajemen Sumber Daya Perairan

Anggota (2) :

- a) Nama Lengkap : Dr. Ir. Jemmy J. S. Dethan, MP
- b) NIDN : 0807016801
- c) SINTA ID : 6663140
- d) Program Studi : Mekanisasi Pertanian

Lama kegiatan : 3 bulan

Biaya penelitian : Rp. 23.000.000,-

Kupang, Juli 2025

Menyetujui
Kepala Lembaga Penelitian UKAW

Ketua Tim Peneliti,

Alfred G.O. Kase, SPi, MSi, PhD
NIDN : 0827056901

(Dr. Jonathan E. Koehuan, ST, MP)
NIDN : 0831077001

IDENTITAS DAN URAIAN UMUM

1. Judul Penelitian: **PEMANFAATAN AIoT UNTUK INTEGRASI KOLAM IKAN AIR TAWAR DAN PERTANIAN HORTIKULTURA BERBASIS IRIGASI NUTRISI OTOMATIS**

2. Tim Peneliti

No.	Nama	Jabatan	Bidang Keahlian	Prodi/Fakultas	Alokasi Waktu (jam / minggu)
1	Dr. Jonathan E. Koehuan, ST, MP	Ketua (dosen)	Teknik Pertanian	Mekanisasi Pertanian	8
2	Alfred G.O. Kase, SPi, MSi, Ph.D	Anggota 1 (dosen)	MSDP	MSDP	6
3	Dr. Ir. Jemmy J. S. Dethan, MP	Anggota 2 (dosen)	Teknik Pertanian	Mekanisasi Pertanian	6
4	Roni Bunga Rihi	Anggota 3 (mahasiswa)	Mekanisasi Pertanian	Mekanisasi Pertanian	4
5	Putri Pandie	Anggota 4 (mahasiswa)	Mekanisasi Pertanian	Mekanisasi Pertanian	4

2. Obyek Penelitian Sensor Pertumbuhan Tanaman:
3. Masa Pelaksanaan: 3 bulan
4. Biaya yang disetujui : Rp. 23.000.000,-
5. Lokasi Penelitian: Lab Mekanisasi Pertanian
6. Temuan yang ditargetkan: Efisiensi air dan nutrisi tanaman
7. Kontribusi mendasar pada bidang ilmu : Mkenaisasi Pertanian Teknik Tanah Air
8. Jurnal ilmiah sasaran yang menjadi sasaran: JWLD Q2
9. Rencana luaran : jurnal ilmiah dan Hak Kekayaan Intelektual :

e . Sistematika Laporan Akhir Penelitian Unggulan Universitas / Fakultas

Laporan Akhir Penelitian
Halaman Sampul
Halaman Pengesahan
Identitas Dan Uraian Umum
Abstrak
Daftar Isi
Daftar Tabel (Bila ada)
Daftar Gambar (Bila ada)
Daftar Lampiran (Bila Ada)
BAB 1. Pendahuluan
BAB 2. Tinjauan Pustaka
BAB 3. Metode Penelitian
BAB 4. Hasil Dan Pembahasan
BAB 5. Kesimpulan dan Saran
Daftar Pustaka
Lampiran

PENDAHULUAN

LATAR BELAKANG

Pengelolaan air dan tanah merupakan aspek fundamental dalam sistem pertanian berkelanjutan, terutama di wilayah tropis yang memiliki karakteristik lingkungan sangat dinamis. Kondisi iklim tropis—ditandai oleh suhu tinggi, curah hujan tidak merata, serta tingkat evaporasi yang besar—menyebabkan kelembapan dan salinitas tanah berubah cepat dari waktu ke waktu. Pada lahan skala kecil seperti pekarangan dan kebun hortikultura rumah tangga, perubahan kondisi tanah yang cepat ini sering kali tidak diimbangi dengan praktik irigasi yang tepat, sehingga menimbulkan berbagai masalah agronomis seperti pemborosan air, pencucian nutrisi, akumulasi garam, dan penurunan produktivitas tanaman.

Tanaman sayuran daun kelompok Brassica, seperti pak-choi dan sawi, merupakan komoditas yang banyak dibudidayakan di Asia Tenggara dan memiliki nilai ekonomi cukup tinggi. Namun, tanaman ini sangat sensitif terhadap ketidakseimbangan air tanah dan peningkatan salinitas. Kelembapan yang terlalu rendah dapat menghambat pertumbuhan vegetatif, sementara akumulasi garam pada zona perakaran dapat memicu stres osmotik dan menurunkan kemampuan tanaman menyerap nutrisi. Oleh karena itu, sistem irigasi yang mampu menjaga stabilitas kelembapan dan kondisi kimia tanah sangat diperlukan untuk mendukung pertumbuhan optimal tanaman Brassica.

Selama ini, banyak petani kecil dan pekebun rumah tangga masih mengandalkan metode irigasi konvensional seperti penyiraman manual atau penggunaan timer dengan interval tetap. Metode tersebut tidak responsif terhadap perubahan nyata di dalam tanah dan sering kali tidak sesuai dengan kebutuhan fisiologis tanaman. Dalam jangka panjang, praktik irigasi yang tidak berbasis data ini berpotensi menimbulkan inefisiensi penggunaan air dan pupuk, mempercepat degradasi tanah, serta menurunkan hasil panen.

Perkembangan teknologi irigasi presisi menawarkan solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut. Salah satu pendekatan yang berkembang pesat adalah penggunaan fuzzy logic sebagai sistem pengambilan keputusan otomatis. Fuzzy logic mampu memproses variabel lingkungan yang bersifat tidak pasti, nonlinier, dan saling berinteraksi—seperti kelembapan tanah, konduktivitas listrik (EC), dan pH—menjadi tindakan irigasi dan fertigation yang lebih presisi. Keunggulan fuzzy logic terletak pada kemampuannya memberikan respon adaptif tanpa memerlukan model matematis kaku, sehingga lebih sesuai digunakan dalam lingkungan

tropis yang berubah cepat.

Meskipun berbagai penelitian telah mengaplikasikan fuzzy logic dalam rumah kaca atau lingkungan terkendali, kajian di kondisi lapangan terbuka tropis—terutama pada sistem tanam kontainer yang umum digunakan petani kecil—masih sangat terbatas. Selain itu, sebagian besar sistem irigasi cerdas yang dilaporkan hanya mengandalkan satu atau dua parameter tanah, sehingga belum mampu mengatur irigasi, pemberian nutrisi, dan proses flushing secara simultan. Potensi integrasi multi-parameter tanah (kelembapan, EC, pH) dalam satu kerangka kontrol adaptif masih jarang dieksplorasi, padahal pendekatan ini memiliki potensi besar untuk meningkatkan stabilitas lingkungan perakaran dan efisiensi penggunaan sumber daya.

Berdasarkan kondisi tersebut, perlu dikembangkan suatu sistem irigasi adaptif berbasis fuzzy logic yang mampu bekerja secara real-time untuk menjaga stabilitas fisik dan kimia tanah, sekaligus meminimalkan kehilangan air dan pupuk. Sistem ini diharapkan mampu mendukung peningkatan produktivitas tanaman Brassica dan mendukung praktik pertanian yang lebih efisien dan berkelanjutan, khususnya di lingkungan tropis dan pada skala usaha tani kecil.

TINJAUAN PUSTAKA

1. Pengelolaan Air, Tanah, dan Tantangan Agroekosistem Tropis

Pengelolaan sumber daya air dan tanah merupakan faktor kunci dalam pembangunan pertanian berkelanjutan, terutama di wilayah tropis yang memiliki tingkat evaporasi tinggi, curah hujan tidak menentu, serta karakteristik tanah yang heterogen. Kondisi tersebut menyebabkan dinamika kelembapan dan salinitas tanah berubah dengan cepat (FAO, 2017; Kramer & Mau, 2023). Pada sistem hortikultura skala kecil, praktik irigasi yang tidak terjadwal dengan baik dan pemupukan cair yang tidak konsisten dapat menimbulkan pemborosan air, pencucian unsur hara, peningkatan salinitas tanah, dan pada akhirnya menurunkan produktivitas tanaman (Sun et al., 2022).

Sayuran Brassica—seperti pak-choi dan sawi—banyak dibudidayakan di Asia Tenggara dan dikenal sensitif terhadap ketidakseimbangan air tanah serta akumulasi garam (Petric et al., 2022). Oleh karena itu, tanaman Brassica sering digunakan sebagai indikator efektivitas manajemen irigasi dan kondisi kimia-fisika tanah pada sistem produksi hortikultura intensif.

2. Keterbatasan Metode Irigasi Konvensional dan Perkembangan Teknologi Presisi

Metode irigasi konvensional seperti penyiraman manual atau penggunaan timer dengan interval tetap memiliki keterbatasan dalam menanggapi perubahan kondisi tanah secara real-time. Sistem semacam ini tidak mampu menyesuaikan suplai air dan nutrisi berdasarkan dinamika lingkungan yang cepat, terutama di lingkungan terbuka tropis (Arunadevi et al., 2022). Untuk itu, teknologi irigasi presisi mulai banyak dikembangkan dengan tujuan meningkatkan efisiensi penggunaan air, mengurangi degradasi tanah, serta memperbaiki kondisi perakaran melalui strategi pemberian air dan nutrisi yang lebih terukur (Pradipta et al., 2022).

Pendekatan kecerdasan buatan, terutama fuzzy logic, semakin banyak digunakan dalam pengambilan keputusan irigasi karena mampu menerjemahkan interaksi tanah–tanaman yang kompleks ke dalam aksi kontrol adaptif tanpa memerlukan model matematis yang kaku (Lopez-Jimenez et al., 2022). Fuzzy logic dianggap unggul dalam menangani ketidakpastian (uncertainty), variabilitas kondisi tanah, serta hubungan nonlinier antar-parameter lingkungan.

3. Aplikasi Fuzzy Logic pada Sistem Irigasi dan Kesenjangan Penelitian

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa fuzzy logic telah digunakan dalam sistem rumah kaca atau lingkungan terkendali untuk mengatur suhu, kelembapan, dan irigasi tanaman (Faniyi & Luo, 2023). Namun, penerapannya pada kondisi lapangan terbuka di wilayah tropis masih terbatas. Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada satu atau dua parameter tanah, seperti kelembapan atau salinitas saja (Dai et al., 2023).

Hanya sedikit studi yang mengintegrasikan beberapa parameter tanah sekaligus—seperti kelembapan (soil moisture), konduktivitas listrik (EC), dan pH—dalam satu sistem kontrol cerdas untuk mengelola irigasi, pemberian nutrisi, dan proses flushing secara bersamaan (Lou et al., 2022). Integrasi multi-parameter ini penting untuk menjaga stabilitas kimia-fisika tanah, mencegah akumulasi garam, serta meminimalkan kehilangan air dan pupuk.

Kesenjangan penelitian tersebut menunjukkan perlunya sistem irigasi adaptif berbasis fuzzy logic yang mampu bekerja secara efektif pada agroekosistem tropis di ruang terbuka maupun sistem tanam berbasis kontainer yang umum digunakan oleh petani kecil di Asia Tenggara. Sistem semacam ini diharapkan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi, serta mendukung praktik pertanian berkelanjutan di wilayah tropis.

METODE PENELITIAN

1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan selama 14 hari di lingkungan terbuka (outdoor) dengan kondisi iklim tropis khas Indonesia bagian timur. Tanaman uji adalah sayuran Brassica (pak-choi) yang dibudidayakan menggunakan polybag berdiameter 20 cm dan tinggi 25 cm berisi tanah topsoil lokal. Suhu harian berkisar antara 27–34°C, sedangkan kelembapan relatif berada pada rentang 65–85%.

2. Rancangan Percobaan

Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan tiga perlakuan dan tiga ulangan, sehingga terdapat 9 unit percobaan. Perlakuan irigasi sebagai berikut:

1. P1 (Manual): Penyiraman dilakukan secara manual oleh operator.
2. P2 (Timer): Irigasi dilakukan pada interval tetap sebanyak tiga kali per hari dengan durasi 1 menit per aplikasi.
3. P3 (Fuzzy Logic): Irigasi, pemberian nutrisi, dan flushing dikendalikan oleh sistem fuzzy logic berdasarkan pembacaan sensor tanah secara real-time.

Setiap polybag berfungsi sebagai satu unit percobaan dan diperlakukan secara independen.

3. Sistem Sensor dan Akuisisi Data

Pemantauan kondisi tanah dilakukan secara kontinu menggunakan sensor RS485 yang mampu mengukur:

- kelembapan tanah (Soil Moisture, %),
- konduktivitas listrik tanah (Electrical Conductivity, $\mu\text{S cm}^{-1}$),
- pH tanah,
- konsentrasi nitrogen, fosfor, dan kalium (mg kg^{-1}),
- suhu media tanam.

Data direkam setiap 30 menit melalui antarmuka USB–RS485 dan disimpan menggunakan aplikasi pencatat data.

3.1. Kalibrasi Sensor

EC: standar 84, 1413, dan 12.880 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (ISO 7888, 1985)

pH: larutan buffer pH 4.00, 6.86, dan 9.18 (ISO 10523, 2008)

Nitrogen: metode Kjeldahl (ISO 11261, 1995)

Akurasi sensor dievaluasi menggunakan koefisien determinasi (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE).

4. Sistem Kontrol Fuzzy Logic

Sistem fuzzy terdiri atas tiga variabel input dan tiga output utama.

4.1 Input

Soil Moisture (SM)

Electrical Conductivity (EC)

pH tanah

4.2 Output

1. Intensitas irigasi (Water)
2. Dosis nutrisi (Nutrient)
3. Intensitas flushing (Flush)

Masing-masing variabel memiliki fungsi keanggotaan berbentuk segitiga dan trapesium. Sebanyak 27 aturan inferensi (rules) digunakan untuk menentukan respon irigasi–nutrisi–flushing berdasarkan kombinasi kondisi tanah. Defuzzifikasi menggunakan metode centroid dan menghasilkan sinyal berupa PWM (0–100%) yang merepresentasikan durasi dan volume pompa.

Tabel 1 menyajikan parameter fungsi keanggotaan (membership functions) untuk seluruh variabel input (SM, EC, pH) dan output (Water, Nutrient, Flush). Fungsi keanggotaan yang digunakan berupa kombinasi trapesium dan segitiga, yang dipilih karena menghasilkan transisi halus dan komputasi ringan sehingga sesuai untuk sistem pengambilan keputusan cepat pada pengaturan irigasi.

Tabel 1. Parameter fungsi keanggotaan variabel logika fuzzy

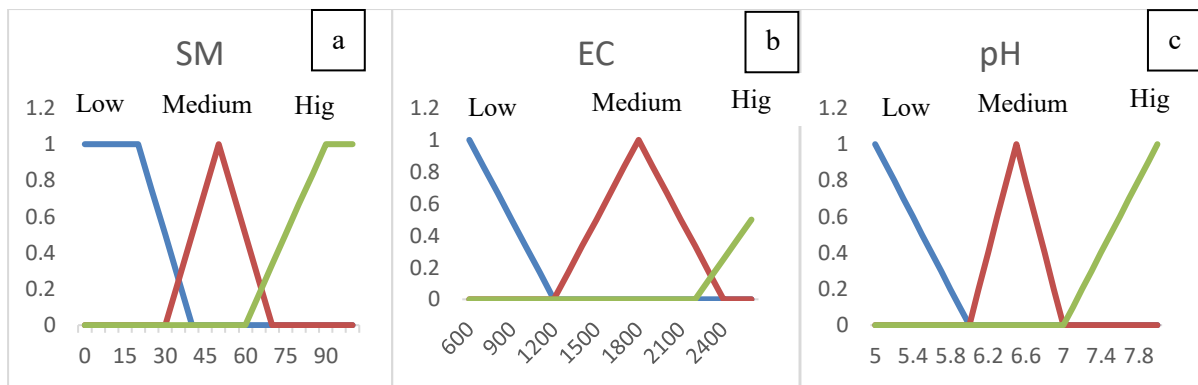
Variabel	Istilah Linguistik	Tipe MF	Parameter (x_1, x_2, x_3, x_4)
SM (%)	Rendah	Trapesium	(0, 0, 20, 35)
	Sedang	Segitiga	(30, 45, 60)
	Tinggi	Trapesium	(55, 70, 100, 100)
EC ($\mu\text{S/cm}$)	Rendah	Trapesium	(0, 0, 800, 1200)
	Sedang	Segitiga	(1000, 1600, 2200)
	Tinggi	Trapesium	(2000, 2500, 3000, 3000)
pH	Asam	Trapesium	(3.0, 3.0, 5.2, 5.7)
	Netral	Segitiga	(5.5, 6.2, 7.0)
	Basa	Trapesium	(6.8, 7.2, 8.0, 8.0)
Output (W, N, F)	Rendah	Segitiga	(0, 10, 30)
	Sedang	Segitiga	(20, 50, 80)
	Tinggi	Segitiga	(70, 85, 100)

Basis aturan fuzzy terdiri atas 27 aturan inferensi (Tabel 2) yang mengintegrasikan tiga parameter utama (SM–EC–pH) untuk menentukan tingkat pemberian air, nutrisi, dan bilasan. Aturan mencakup seluruh kombinasi level input sehingga model dapat merespons kondisi media secara adaptif dan berkelanjutan.

Table 2. fuzzy inference rules.

Rule	Soil Moisture	EC	pH	Water	Nutrient	Flush	pH Adjustment
R1	Low	Low	Acidic	High	High	Low	Add dolomite
R2	Low	Low	Neutral	High	High	Low	None
R3	Low	Low	Alkaline	High	High	Low	Add acid
R4	Low	Medium	Acidic	High	Medium	Low	Add dolomite
R5	Low	Medium	Neutral	High	Medium	Low	None
R6	Low	Medium	Alkaline	High	Medium	Low	Add acid
R7	Low	High	Acidic	High	Low	Medium	Add dolomite
R8	Low	High	Neutral	High	Low	High	None
R9	Low	High	Alkaline	High	Low	High	Add acid
R10	Medium	Low	Acidic	Medium	High	Low	Add dolomite
R11	Medium	Low	Neutral	Medium	High	Low	None
R12	Medium	Low	Alkaline	Medium	High	Low	Add acid
R13	Medium	Medium	Acidic	Medium	Medium	Low	Add dolomite
R14	Medium	Medium	Neutral	Medium	Medium	Low	None
R15	Medium	Medium	Alkaline	Medium	Medium	Low	Add acid
R16	Medium	High	Acidic	Low	Low	Medium	Add dolomite
R17	Medium	High	Neutral	Low	Low	High	None
R18	Medium	High	Alkaline	Low	Low	High	Add acid
R19	High	Low	Acidic	Low	High	Low	Add dolomite
R20	High	Low	Neutral	Low	High	Low	None
R21	High	Low	Alkaline	Low	High	Low	Add acid
R22	High	Medium	Acidic	Low	Medium	Low	Add dolomite
R23	High	Medium	Neutral	Low	Medium	Low	None
R24	High	Medium	Alkaline	Low	Medium	Low	Add acid
R25	High	High	Acidic	Low	Low	High	Add dolomite
R26	High	High	Neutral	Low	Low	High	None
R27	High	High	Alkaline	Low	Low	High	Add acid

Gambar 1 memperlihatkan struktur lengkap sistem fuzzy beserta fungsi keanggotaan untuk masing-masing variabel input. Visualisasi ini menunjukkan rentang operasi dan titik transisi antar kategori linguistik, yang menjadi dasar proses fuzzifikasi.



Gambar 1. Model logika fuzzy untuk variabel input: (a) Fungsi keanggotaan kelembaban tanah (SM); (b) Fungsi keanggotaan konduktivitas listrik (EC); (c) Fungsi keanggotaan pH.

Gambar 2 menampilkan permukaan aturan (rule surface response) untuk keluaran Water, yang menggambarkan bagaimana sistem menghasilkan keputusan tingkat irigasi berdasarkan perubahan simultan pada SM dan EC pada kondisi pH netral. Permukaan ini memudahkan interpretasi hubungan nonlinear antar variabel dan memastikan bahwa logika kontrol beroperasi secara konsisten terhadap dinamika media tanah.

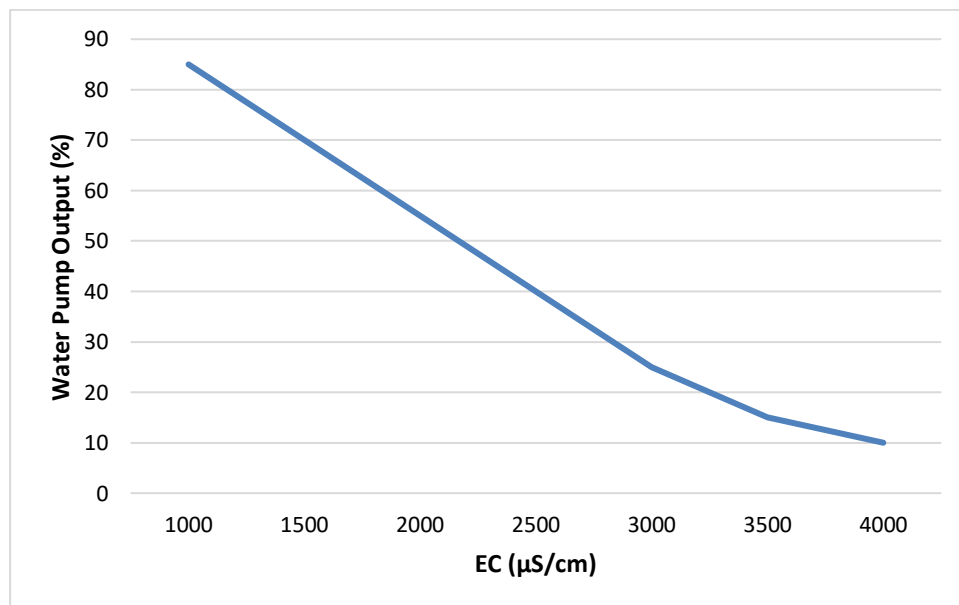


Figure 2. Rule response

3.7. Plant Measurements

Pengamatan tanaman meliputi:

Tinggi tanaman (cm): H3, H6, H9, H12, H15.

Jumlah daun dan diameter batang: pada H15.

Berat segar (FW) dan berat kering (DW): DW diperoleh dengan oven 65°C hingga konstan.

Indeks efisiensi:

$$WUE = DW / Total_Water_L$$

$$\text{NUE} = \text{DW} / \text{Total_N_applied_mg}$$

5. Pelaksanaan Irigasi dan Fertigasi

5.1 Perlakuan P1 dan P2

- Volume air berdasarkan perkiraan kebutuhan harian Brassica, yaitu 0,40–0,55 L per tanaman per hari.
- Nutrisi diberikan menggunakan larutan komersial sesuai dosis standar.

5.2 Perlakuan P3 (Fuzzy Logic)

Keputusan irigasi diatur otomatis oleh output fuzzy:

- Irigasi: aktif jika $\text{SM} < 30\%$
- Pemberian nutrisi: aktif ketika $\text{EC} < 1500 \mu\text{S cm}^{-1}$ dan $\text{SM} > 35\%$
- Flushing: aktif jika $\text{EC} > 2200 \mu\text{S cm}^{-1}$

Operator hanya mengeksekusi output PWM menjadi volume air/nutrisi (mL) sesuai nilai yang dihasilkan sistem. Total air dan nutrisi yang diberikan dicatat setiap hari.

6. Pengukuran Pertumbuhan Tanaman

Parameter pertumbuhan yang diamati:

- tinggi tanaman (Hari ke-3, 6, 9, 12, dan 14),
- jumlah daun (Hari ke-14),
- diameter batang (Hari ke-14).

Pada akhir penelitian, dilakukan pengukuran:

- biomassa segar (Fresh Weight),
- biomassa kering (Dry Weight) setelah dikeringkan pada oven 65°C hingga berat konstan.

7. Analisis Data

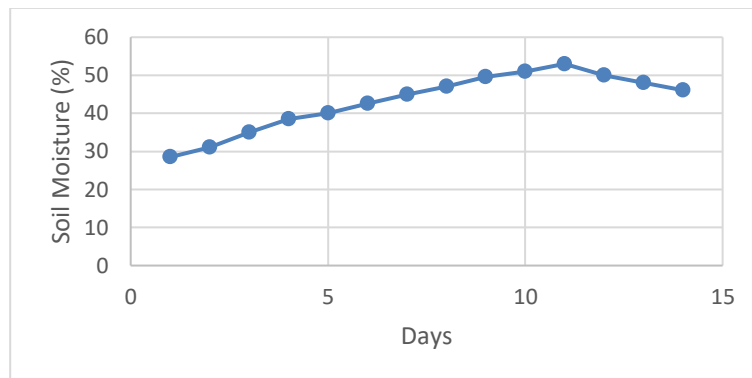
Data dianalisis menggunakan:

- ANOVA satu arah untuk mengetahui perbedaan antar perlakuan,
- Uji Duncan ($\alpha = 0,05$) untuk perbandingan lanjut,
- Analisis deskriptif untuk pola waktu kelembapan, EC, pH, nutrisi, dan keluaran fuzzy (PWM).
- Interpretasi mengikuti kerangka interaksi tanah–air–tanaman.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Dinamika Kelembapan Tanah pada Berbagai Perlakuan

Perubahan kelembapan tanah selama 14 hari menunjukkan pola yang berbeda antarperlakuan (Gambar 1).



Gambar 1. Variasi kelembapan tanah selama 14 hari pengamatan.

Pada irigasi manual (P1), nilai soil moisture berfluktuasi cukup tajam—kadang sangat rendah, lalu naik drastis setelah penyiraman. Hal ini dapat dimengerti karena keputusan penyiraman bergantung pada pengamatan visual operator, sehingga volume dan waktunya tidak konsisten.

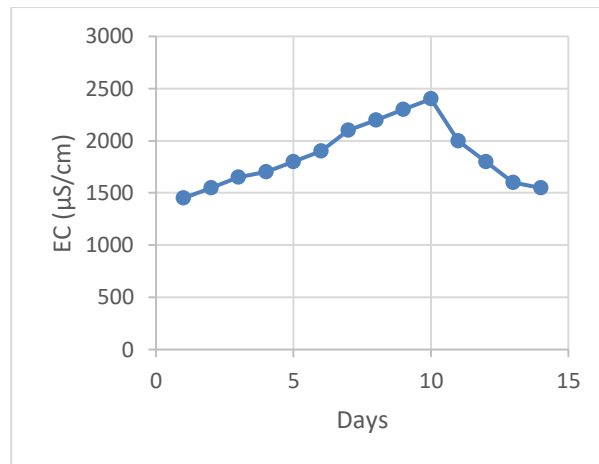
Pada irigasi berbasis timer (P2), fluktuasi cenderung lebih teratur, namun tetap menunjukkan puncak dan lembah yang jelas. Timer memberikan air sesuai jadwal, tanpa mempertimbangkan kondisi tanah; akibatnya, kadang terjadi penyiraman berlebih saat tanah masih basah atau penyiraman kurang ketika tanah telah mengering.

Sementara itu, pada sistem fuzzy-adaptif (P3), kelembapan tanah terjaga pada kisaran optimal 32–44%. Ketika moisture turun, output fuzzy secara otomatis meningkatkan pemberian air; ketika mendekati batas optimal, output air diturunkan. Respons adaptif ini menghasilkan pola kelembapan yang jauh lebih stabil dan mendekati kebutuhan tanaman sebenarnya. Temuan ini sejalan dengan laporan Zhao et al. (2023), bahwa pengendalian irigasi berbasis fuzzy cenderung lebih lembut (smooth) dan tidak menghasilkan lonjakan tajam.

4.2. Perubahan EC dan Pengendalian Salinitas

Polanya EC meningkat perlahan pada awal percobaan (Gambar 2) akibat akumulasi nutrisi setelah beberapa siklus fertigation. Namun, setiap perlakuan menunjukkan karakteristik yang berbeda:

P1 (manual): EC meningkat tajam hingga $\pm 2600 \mu\text{S}/\text{cm}$ karena volume nutrisi tidak proporsional dengan air, sehingga garam menumpuk.



Gambar 2. Dinamika konduktivitas listrik (EC) tanah selama siklus fertigasi.

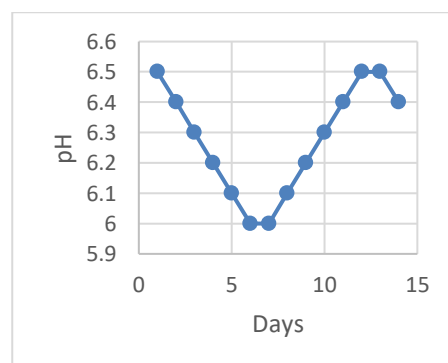
P2 (timer): EC naik lebih stabil, tetapi tetap bisa menyentuh 2400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

P3 (fuzzy): EC terkontrol dengan baik; ketika nilai melebihi ambang fuzzy (± 2200 $\mu\text{S}/\text{cm}$), sistem memicu flush, sehingga EC kembali turun.

Setelah hari ke-10, penurunan EC pada P3 menunjukkan kemampuan fuzzy dalam menyeimbangkan akumulasi garam dengan pelepasan (leaching) terukur. Ini penting karena salinitas berlebih dapat menghambat penyerapan air dan nutrisi oleh akar. Dengan demikian, fuzzy terbukti mampu menjaga lingkungan akar tetap aman.

4.3. Stabilitas pH Tanah

Nilai pH tanah (Gambar 3) relatif stabil pada seluruh perlakuan. Pada P1, pH sempat turun hingga 5.7, kemungkinan akibat pemberian nutrisi terlalu pekat. P2 menunjukkan kecenderungan sedikit lebih basa dibanding P1.



Gambar 3. Variasi pH tanah di bawah kendali sistem fuzzy.

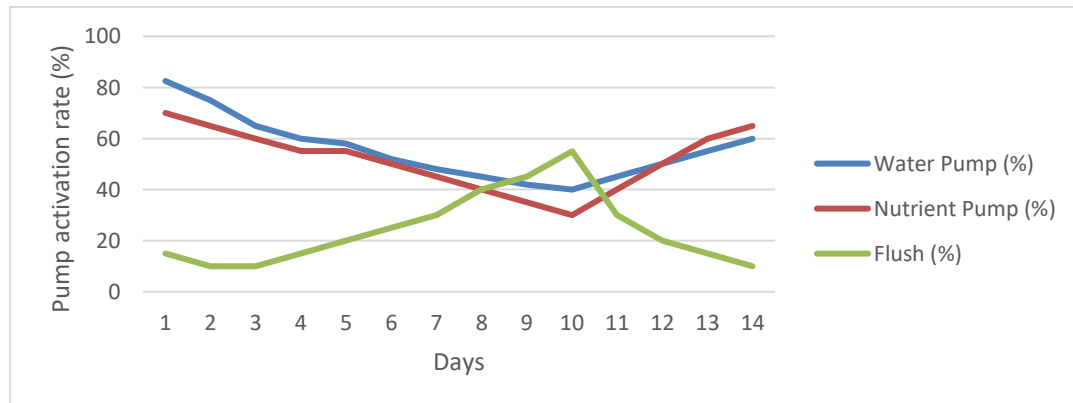
Pada P3, pH stabil dalam kisaran 6.0–6.6. Fluktuasi kecil yang terjadi mengikuti dinamika nutrisi dan air: peningkatan EC biasanya menurunkan pH sementara, dan irigasi menyebabkan sedikit peningkatan pH. Karena fuzzy mengatur air dan nutrisi secara seimbang, perubahan pH menjadi lebih

halus dan tetap sesuai kisaran optimal tanaman Brassica.

Stabilitas ini juga menunjukkan bahwa sensor bekerja akurat dan feedback fuzzy konsisten.

4.4. Perilaku Output: Air, Nutrisi, dan Flush

Gambar 4 memperlihatkan bagaimana duty cycle untuk air, nutrisi, dan flush berubah selama percobaan. Pada hari-hari awal ketika moisture masih rendah, output air tinggi (>80%). Seiring kelembapan meningkat, output air diturunkan secara bertahap.



Gambar 4. Pola aktivasi pompa air, nutrisi, dan flush oleh pengendali fuzzy.

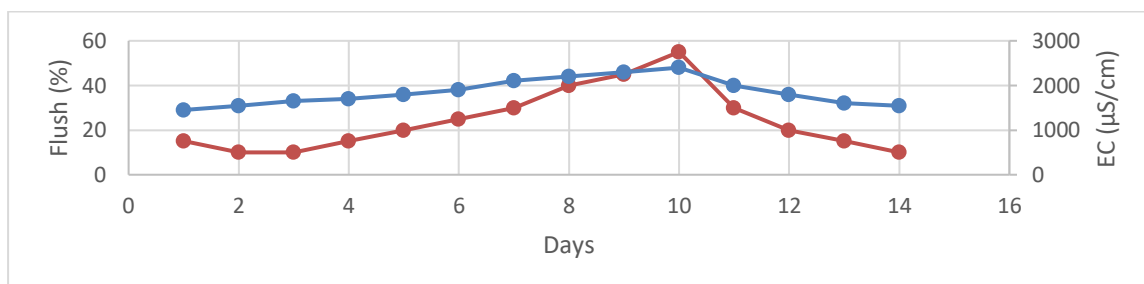
Output nutrisi berada pada tingkat sedang pada awal pertumbuhan, lalu turun ketika EC meningkat.

Flush diaktifkan hanya ketika EC melampaui ambang fuzzy pada hari sekitar ke-10. Aktivasi selektif ini penting untuk mengontrol salinitas tanpa membuang air secara berlebihan.

Respons berurutan dan saling menyeimbangkan seperti ini hanya mungkin terjadi pada sistem adaptif seperti fuzzy.

4.5. Hubungan EC dan Aktivasi Flush

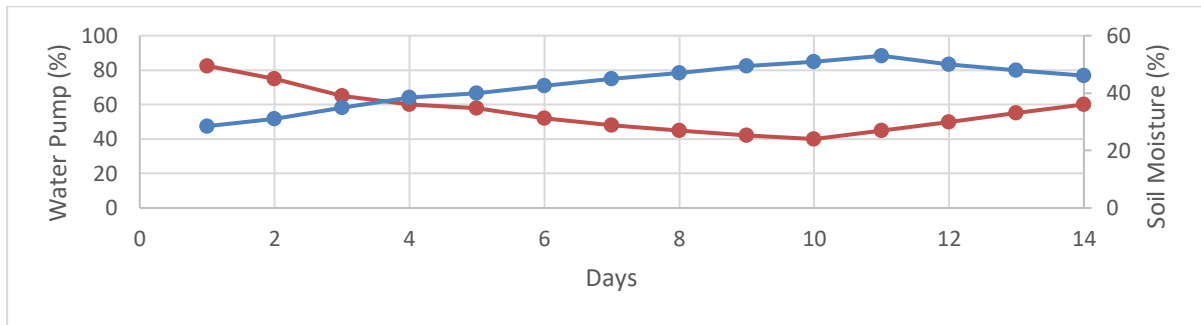
Gambar 5 menegaskan hubungan negatif antara EC dan aktivitas flush. Ketika EC naik akibat akumulasi nutrisi dan terbatasnya perkolasi, duty cycle flush meningkat. Setelah flushing, EC turun kembali. Dengan demikian, fuzzy mampu mempertahankan salinitas pada tingkat aman tanpa kehilangan terlalu banyak air—berbeda dari flush berbasis timer yang biasanya tidak efisien.



Gambar 5. Hubungan antara EC tanah dan intensitas flushing.

4.6. Hubungan Moisture dan Output Air

Gambar 6 menunjukkan hubungan terbalik antara kelembapan tanah dan intensitas penyiraman. Ketika moisture berada di bawah 30%, duty cycle air meningkat tajam. Begitu moisture mencapai 40–45%, output air menurun.

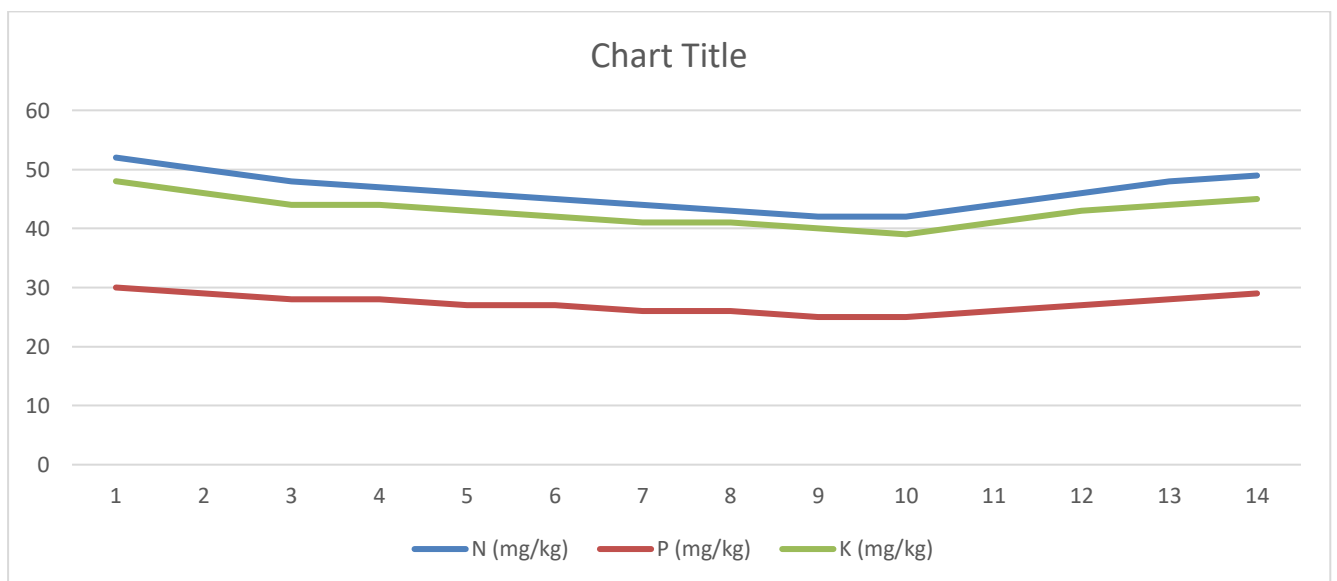


Gambar 6. Hubungan antara kelembapan tanah dan output pompa air.

Hal ini menunjukkan bahwa fuzzy benar-benar “membaca” kondisi tanah: bukan mengikuti jadwal tetap seperti timer, dan tidak bergantung pada persepsi operator seperti manual. Pendekatan ini sangat relevan di daerah tropis yang memiliki laju evaporasi tinggi.

4.7. Dinamika N, P, dan K

Pola dinamika unsur hara N, P, dan K yang ditampilkan pada Gambar 7 menunjukkan kecenderungan yang realistis sesuai perilaku kimiawi masing-masing unsur di dalam tanah.



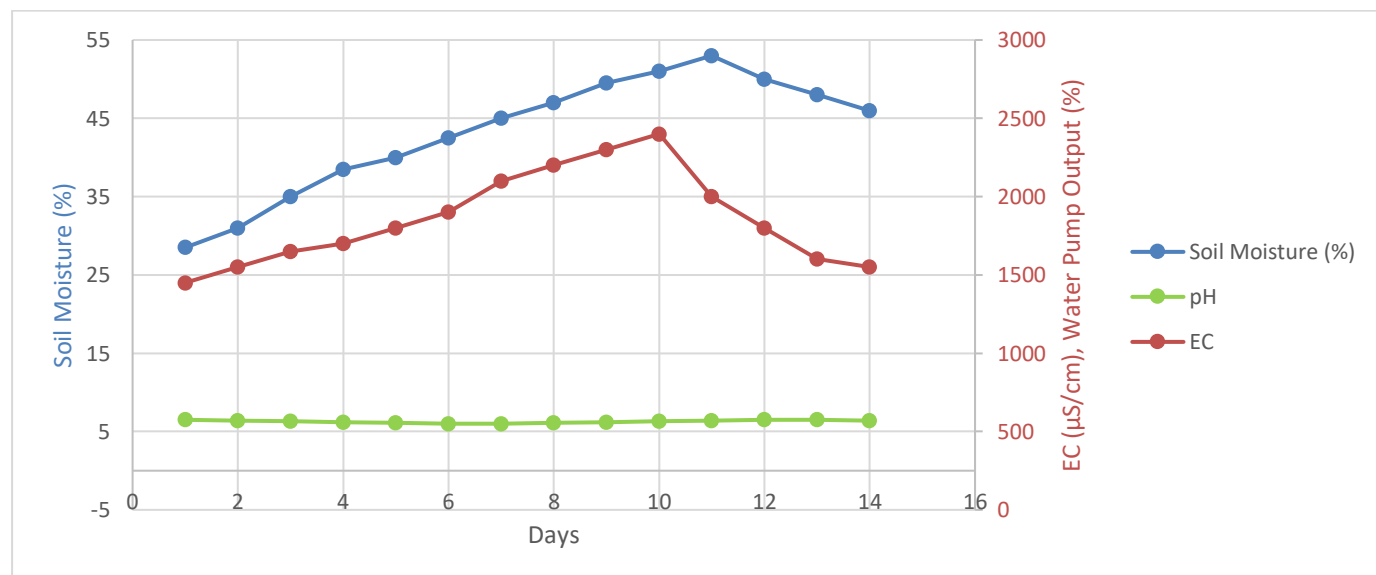
Gambar 7. Fluktuasi konsentrasi hara N–P–K selama percobaan fertigasi.

Konsentrasi nitrogen (N) terlihat meningkat pada fase awal percobaan, terutama ketika pompa nutrisi aktif mengikuti keputusan fuzzy. Namun, setelah hari ke-10, kadar N mulai menurun seiring meningkatnya laju serapan tanaman yang memasuki fase pertumbuhan vegetatif intensif. Sebaliknya, fosfor (P) dan kalium (K) menunjukkan fluktuasi yang jauh lebih stabil karena mobilitas keduanya lebih rendah di dalam tanah, sehingga perubahan konsentrasinya tidak sedinamis nitrogen.

Pada perlakuan P3 (irigasi adaptif berbasis fuzzy), ketiga kurva unsur hara terlihat lebih halus dan tidak menampilkan lonjakan atau penurunan yang ekstrem. Pola yang stabil ini menunjukkan bahwa mekanisme pemberian nutrisi berbasis fuzzy mampu mengatur penambahan larutan hara secara lebih proporsional terhadap kondisi aktual tanah. Dengan demikian, tanaman memperoleh suplai nutrisi yang konsisten tanpa mengalami kekurangan maupun kelebihan unsur hara, sekaligus meminimalkan risiko akumulasi garam yang sering muncul pada sistem fertigasi konvensional.

4.8. Interaksi Tiga Parameter: SM, EC, dan Output Air

Gambar 8 menampilkan interaksi simultan antara soil moisture, EC, dan keluaran pompa air dalam satu sumbu waktu. Ketiga parameter tersebut menunjukkan pola yang sangat koheren, menggambarkan mekanisme kerja fuzzy controller dalam menyeimbangkan beberapa tujuan irigasi secara bersamaan.



Gambar 8. Interaksi kelembapan tanah, EC, dan output pompa air dalam sistem fuzzy.

Ketika EC mulai meningkat akibat akumulasi larutan hara, sistem secara otomatis menurunkan output air dan kemudian mengaktifkan fungsi flush untuk menurunkan tingkat salinitas. Sebaliknya, saat moisture turun di bawah zona optimal, fuzzy controller meningkatkan output air meskipun EC sedang naik, karena prioritas utama pada kondisi tersebut adalah pemulihan kelembapan tanah agar tetap

mendukung kebutuhan fisiologis tanaman. Setelah flush aktif dan EC berangsur turun, ketiga parameter kembali stabil, membentuk siklus regulasi yang terkontrol.

Pola interaksi ini menunjukkan bagaimana sistem fuzzy mampu menjalankan multi-objective control: menjaga kelembapan tetap dalam kisaran optimum, mengendalikan akumulasi garam melalui flush yang bersifat adaptif, dan secara tidak langsung mengatur ritme pemberian nutrisi melalui kontrol terhadap EC. Semua proses ini terjadi secara berkelanjutan dalam satu kerangka kerja logika fuzzy, sehingga menghasilkan fertigation yang lebih efisien, stabil, dan responsif dibandingkan metode manual atau berbasis timer.

4.9. Pertumbuhan Tanaman, Biomassa, WUE, dan NUE

Hasil pengamatan biomassa disajikan pada Tabel 3, menunjukkan bahwa perlakuan P3 (irigasi adaptif berbasis fuzzy) secara konsisten memberikan pertumbuhan terbaik dibandingkan dua perlakuan lainnya.

Tabel 3. Kinerja Pertumbuhan Tanaman dan Efisiensi Penggunaan Sumber Daya pada Berbagai Perlakuan Irigasi

Parameter	P1 Manual	P2 Timer	P3 Fuzzy
Height_D15 (cm)	18.4 ± 1.2	20.1 ± 1.0	23.8 ± 1.4
Leaf count	7.2 ± 0.8	8.1 ± 0.6	9.4 ± 0.7
Stem diameter (mm)	4.6 ± 0.3	4.9 ± 0.4	5.5 ± 0.4
FW (g)	42.1 ± 3.4	47.8 ± 2.9	55.4 ± 3.1
DW (g)	4.9 ± 0.3	5.6 ± 0.4	6.4 ± 0.5
Total_Water_L	7.8 ± 0.6	9.5 ± 0.3	6.2 ± 0.4
Total_N_applied_mg	162 ± 12	180 ± 10	148 ± 14
WUE (g DW/L)	0.63	0.59	1.03
NUE (g DW/mg N)	0.03	0.031	0.043

Tanaman pada P3 memiliki tinggi tanaman tertinggi, jumlah daun terbanyak, serta diameter batang yang lebih besar, menandakan kondisi fisiologis yang lebih optimal. Selain itu, berat segar dan berat kering juga mencapai nilai tertinggi pada P3, menunjukkan bahwa tanaman memperoleh suplai air dan nutrisi secara lebih efisien dan tepat waktu.

Dari sisi efisiensi input, perlakuan P3 menghasilkan Water Use Efficiency (WUE) yang hampir dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan P1 dan P2. Efisiensi ini dicapai karena fuzzy controller hanya mengaktifkan pompa berdasarkan kebutuhan aktual tanaman, bukan berdasarkan interval tetap atau observasi visual. Hal serupa juga terlihat pada Nutrient Use Efficiency (NUE), di mana P3 memberikan nilai tertinggi. Hal ini menandakan bahwa nutrisi yang diberikan lebih banyak diserap

tanaman dan lebih sedikit terbuang akibat pencucian atau pemberian berlebih.

Hasil analisis statistik melalui ANOVA dan dilanjutkan dengan uji Duncan menunjukkan bahwa P3 berbeda nyata ($p < 0.05$) dari P1 dan P2 pada sebagian besar parameter pertumbuhan dan efisiensi. Temuan ini mengonfirmasi bahwa sistem irigasi berbasis fuzzy mampu memberikan kombinasi terbaik antara suplai air, suplai nutrisi, dan pengendalian salinitas, sehingga meningkatkan performa agronomis dan efisiensi input secara signifikan.

4.10. Validasi Sensor

Nilai R^2 , RMSE, dan MAPE dari sensor menunjukkan bahwa sensor cukup akurat dan dapat diandalkan. Hal ini penting karena fuzzy mengandalkan input sensor untuk pengambilan keputusan. Validasi ini memastikan hasil fuzzy bukan kebetulan, tetapi benar-benar berdasarkan pembacaan lapangan yang valid.

Tabel 4. Akurasi dan Presisi Sensor Berdasarkan Pembandingan dengan Nilai Referensi

Parameter	R^2	RMSE	MAPE
EC	0.98	48 $\mu\text{S/cm}$	3.80%
pH	0.94	0.12	2.10%
N	0.88	11 mg/kg	6.50%

4.11. Interpretasi Umum dan Implikasi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa irigasi adaptif berbasis fuzzy memberikan kinerja terbaik dibandingkan irigasi manual (P1) dan timer (P2). Sistem fuzzy mampu menjaga kelembapan tanah tetap stabil pada zona optimum, menghindari fluktuasi ekstrem yang umum terjadi pada metode tradisional. Mekanisme adaptifnya juga efektif mencegah akumulasi garam dengan menurunkan output air dan mengaktifkan flush ketika EC meningkat, sehingga kondisi salinitas tetap aman bagi tanaman.

pH tanah terjaga dalam kisaran ideal, menunjukkan bahwa pengaturan air–nutrisi berbasis fuzzy membantu mempertahankan keseimbangan kimia tanah dan meningkatkan ketersediaan hara. Efisiensi penggunaan air (WUE) dan nutrisi (NUE) lebih tinggi dibandingkan P1 dan P2, menandakan bahwa sistem hanya memberikan input sesuai kebutuhan tanaman.

Kombinasi kontrol kelembapan, salinitas, dan nutrisi yang lebih presisi menghasilkan pertumbuhan tanaman terbaik pada P3, dengan tinggi, jumlah daun, diameter batang, serta berat segar dan kering yang lebih tinggi secara nyata (didukung ANOVA dan uji Duncan). Irigasi fuzzy terbukti lebih efisien, adaptif, dan produktif. Temuan ini memperlihatkan potensi besar penerapan fuzzy untuk pertanian presisi di wilayah tropis, terutama dalam upaya menghemat air dan nutrisi tanpa mengurangi hasil tanaman.

4.12. Keterbatasan Penelitian dan Arah Riset Selanjutnya

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama karena pengambilan data dilakukan secara manual dan durasi percobaan hanya 14 hari sehingga baru mencakup fase awal pertumbuhan. Selain itu, penelitian hanya menggunakan satu jenis tanaman dan aturan fuzzy yang diterapkan belum dioptimasi dengan pendekatan machine learning.

Ke depan, penelitian dapat dikembangkan melalui integrasi penuh sistem IoT, durasi percobaan yang lebih panjang hingga panen, pengujian pada lebih banyak komoditas, serta optimasi model fuzzy menggunakan metode kecerdasan buatan seperti ANFIS atau neuro-fuzzy untuk meningkatkan akurasi dan adaptivitas sistem.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem irigasi adaptif berbasis logika fuzzy mampu mengelola kondisi tanah secara lebih efektif dibandingkan metode manual (P1) maupun timer konvensional (P2). Integrasi tiga parameter utama—soil moisture (SM), electrical conductivity (EC), dan pH—memungkinkan pengambilan keputusan irigasi, pemberian nutrisi, dan flushing secara real-time berdasarkan kondisi aktual tanah.

Sistem fuzzy terbukti:

1. Menjaga kelembapan tanah lebih stabil pada kisaran optimal 30–45%, sehingga mendukung kondisi fisiologis akar yang lebih baik.
2. Mengontrol akumulasi salinitas, ditunjukkan oleh aktivasi flush yang responsif ketika EC melewati ambang 2200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
3. Mempertahankan pH tanah dalam kisaran ideal (6.0–6.6) tanpa fluktuasi ekstrem.
4. Menghemat air dan nutrisi, tercermin dari peningkatan Water Use Efficiency (WUE) dan Nutrient Use Efficiency (NUE), terutama pada P3.
5. Meningkatkan performa pertumbuhan tanaman, ditandai dengan tinggi tanaman, jumlah daun, diameter batang, biomassa segar dan kering yang signifikan lebih tinggi pada perlakuan P3.
6. Menghasilkan respons sistem yang stabil dan adaptif, di mana output Water, Nutrient, dan Flush menyesuaikan kondisi SM dan EC secara konsisten.

Perlakuan fuzzy (P3) memberikan hasil terbaik dari semua parameter yang diukur. Hal ini menegaskan bahwa logika fuzzy merupakan pendekatan yang efektif untuk mendukung sistem fertigation presisi, terutama pada lingkungan tropis dengan variabilitas kondisi tanah yang tinggi. Teknologi ini berpotensi diterapkan secara lebih luas pada budidaya tanaman hortikultura untuk meningkatkan efisiensi input dan produktivitas tanaman.

DAFTAR PUSTAKA

Arunadevi, K., Singh, M., Franco, D., Prajapati, V. K., Ramachandran, J., & Maruthi Sankar, G.

- R. (2022). Real Time Soil Moisture (RTSM) Based Irrigation Scheduling to Improve Yield and Water-Use Efficiency of Green Pea (*Pisum sativum* L.) Grown in North India. *Agronomy*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12020278>
- Barrow, N. J., & Hartemink, A. E. (2023). The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. *Plant and Soil*, 487(1–2), 21–37. <https://doi.org/10.1007/S11104-023-05960-5>
- Bogardi, I., Bardossy, A., Duckstein, L., & Pongracz, R. (2004). Fuzzy Logic in Hydrology and Water Resources. *Fuzzy Logic in Geology*, 153–VIII. <https://doi.org/10.1016/B978-012415146-8/50009-3>
- Dai, Z., Zhao, X., Yan, H., Qin, L., Niu, X., Zhao, L., & Cai, Y. (2023). Optimizing Water and Nitrogen Management for Green Pepper (*Capsicum annuum* L.) under Drip Irrigation in Sub-Tropical Monsoon Climate Regions. *Agronomy*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13010034>
- Faniyi, B., & Luo, Z. (2023). A Physics-Based Modelling and Control of Greenhouse System Air Temperature Aided by IoT Technology. *Energies*, 16(6), 1–18. <https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v16y2023i6p2708-d1096920.html>
- FAO. (2017). Water for sustainable food and agriculture. *United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat): Addis Ababa, Ethiopia. (2021), 52.* <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i7959en>
- García-Tejero, I. F., & Durán-Zuazo, V. H. (2022). Plant Water Use Efficiency for a Sustainable Agricultural Development. *Agronomy*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12081806>
- ISO 7888:1985. (1985). *ISO 7888:1985 - Water quality — Determination of electrical conductivity*. <https://www.iso.org/standard/14838.html>
- ISO 10523:2008. (2008). *ISO 10523:2008 - Water quality — Determination of pH*. <https://www.iso.org/standard/51994.html>
- ISO 11261:1995. (1995). *ISO 11261:1995 - Soil quality — Determination of total nitrogen — Modified Kjeldahl method*. <https://www.iso.org/standard/19239.html>
- Katuri, J. R., Trifonov, P., & Arye, G. (2019). Spatial distribution of salinity and sodicity in arid climate following long term brackish water drip irrigated olive orchard. *Water (Switzerland)*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/W11122556>
- Klar, A. E., & Fontes, E. W. D. S. (2003). WATER USE BY BROCCOLI PLANTS (*Brassica oleracea* F, var. *Italica*). *IRRIGA*, 8(1), 37–43. <https://doi.org/10.15809/IRRIGA.2003V8N1P37-43>

- Kramer, I., & Mau, Y. (2023). Review: Modeling the Effects of Salinity and Sodidity in Agricultural Systems. *Water Resources Research*, 59(6). <https://doi.org/10.1029/2023WR034750>
- Lopez-Jimenez, J., Vande Wouwer, A., & Quijano, N. (2022). Dynamic Modeling of Crop–Soil Systems to Design Monitoring and Automatic Irrigation Processes: A Review with Worked Examples. *Water (Switzerland)*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/W14060889>
- Lou, S., Hu, R. Q., Liu, Y., Zhang, W. feng, & Yang, S. Q. (2022). The formulation of irrigation and nitrogen application strategies under multi-dimensional soil fertility targets based on preference neural network. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-022-25133-1>
- Mamdani, E. H. (1974). APPLICATION OF FUZZY ALGORITHMS FOR CONTROL OF SIMPLE DYNAMIC PLANT. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(12), 1585–1588. <https://doi.org/10.1049/PIEE.1974.0328;SUBPAGE:STRING:ABSTRACT;JOURNAL:JOURNAL:PIEE;WEBSITE:WEBSITE:IET-SITE;ISSUE:ISSUE:DOI>
- Müllers, Y., Postma, J. A., Poorter, H., & van Dusschoten, D. (2022). Stomatal conductance tracks soil-to-leaf hydraulic conductance in faba bean and maize during soil drying. *Plant Physiology*, 190(4), 2279–2294. <https://doi.org/10.1093/PLPHYS/KIAC422>
- Patra, S. K., Poddar, R., Pramanik, S., Gaber, A., & Hossain, A. (2022). Crop and water productivity and profitability of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. italica) under gravity drip irrigation with mulching condition in a humid sub-tropical climate. *PLOS ONE*, 17(3), e0265439. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0265439>
- Petrić, I., Šamec, D., Karalija, E., & Salopek-Sondi, B. (2022). Beneficial Microbes and Molecules for Mitigation of Soil Salinity in *Brassica* Species: A Review. *Soil Systems*, 6(1). <https://doi.org/10.3390/SOILSYSTEMS6010018>
- Pitton, B. J. L., Wikramanayake, A. M., & Johnson, G. E. (2023). Mechanically-Incorporated Controlled-Release Fertilizer Results in Greater Nitrogen and Salt Leaching Losses from Soilless Substrate in Containers. *Horticulturae*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE9010042>
- Pivec, J., Brant, V., Bečka, D., & Cihlář, P. (2011). Consumptive use of water in *Brassica napus* L. from flowering to ripening stage under rainless region conditions. *Irrigation and Drainage*, 60(4), 493–498. <https://doi.org/10.1002/IRD.598;JOURNAL:JOURNAL:15310361;WGROU:STRING:PUBLICATION>

- Pradipta, A., Soupios, P., Kourgialas, N., Doula, M., Dokou, Z., Makkawi, M., Alfarhan, M., Tawabini, B., Kirmizakis, P., & Yassin, M. (2022). Remote Sensing, Geophysics, and Modeling to Support Precision Agriculture—Part 2: Irrigation Management. *Water (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/W14071157>
- Saha, A., Sedaghat, S., Gopalakrishnan, S., Waimin, J., Yermembetova, A., Glassmaker, N., Mousoulis, C., Shakouri, A., Wei, A., Rahimi, R., & Alam, M. A. (2023). A new paradigm of reliable sensing with field-deployed electrochemical sensors integrating data redundancy and source credibility. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-022-25920-W>
- Sun, W., Hamani, A. K. M., Si, Z., Abubakar, S. A., Liang, Y., Liu, K., & Gao, Y. (2022). Effects of Timing in Irrigation and Fertilization on Soil NO₃–N Distribution, Grain Yield and Water–Nitrogen Use Efficiency of Drip-Fertigated Winter Wheat in the North China Plain. *Water (Switzerland)*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/W14111780>
- Zhang, J., Guan, K., Peng, B., Pan, M., Zhou, W., Jiang, C., Kimm, H., Franz, T. E., Grant, R. F., Yang, Y., Rudnick, D. R., Heeren, D. M., Suyker, A. E., Bauerle, W. L., & Miner, G. L. (2021). Sustainable irrigation based on co-regulation of soil water supply and atmospheric evaporative demand. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/S41467-021-25254-7>

LAMPIRAN

Artikel untuk jurnal Journal of Water and Land Development (Q2)

Adaptive Fuzzy Control for Soil Moisture, Salinity, and Nutrient Regulation in *Brassica* Production Systems

Authors:

Affiliation:

✉ **Corresponding Author:**

Abstract:

Efficient irrigation and fertigation management are critical for optimizing water and nutrient use in small-scale vegetable production systems in tropical regions. This study evaluates the performance of a fuzzy logic-based adaptive irrigation system for *Brassica* cultivation under outdoor tropical conditions over a 14-day experimental period. Soil moisture, electrical conductivity (EC), pH, and N–P–K concentrations were continuously monitored using low-cost sensors integrated into a microcontroller platform. Three irrigation treatments were applied: manual watering (P1), timer-based irrigation (P2), and fuzzy logic irrigation–fertigation–flushing control (P3). Results showed that P3 maintained soil moisture within optimal agronomic ranges and effectively regulated EC through conditional flushing, preventing excessive salinity accumulation. Nutrient delivery under P3 also displayed smoother temporal dynamics due to real-time adjustment of nutrient dosing. These stabilized soil conditions supported superior plant growth in P3, reflected in higher biomass accumulation and significantly improved water use efficiency (WUE) and nutrient use efficiency (NUE) compared with P1 and P2. Multi-axis analysis further demonstrated coordinated responses among moisture, salinity, and irrigation output under fuzzy control. Sensor validation confirmed acceptable accuracy for field application, ensuring reliable data input for decision-making. Overall, the fuzzy logic system demonstrated strong potential for enhancing resource-use efficiency and improving leafy vegetable productivity in tropical smallholder settings.

Keywords: fuzzy irrigation, soil moisture, electrical conductivity, pH, *Brassica*, water-use efficiency, nutrient-use efficiency, precision agriculture, tropical soils

INTRODUCTION

Efficient management of water and soil resources is a critical component of sustainable agricultural development (FAO, 2017), particularly in tropical regions where high evaporative demand, erratic rainfall, and heterogeneous soil characteristics lead to rapid

fluctuations in moisture and salinity conditions (Kramer & Mau, 2023). In smallholder horticultural systems, improper irrigation scheduling and inconsistent fertigation practices often result in water wastage, nutrient leaching, soil salinization, and reduced crop productivity (Sun et al., 2022). *Brassica* vegetables, including pak-choi and mustard greens, are widely cultivated across Southeast Asia and are highly sensitive to soil water imbalance and salinity accumulation (Petrić et al., 2022), making them suitable indicators of irrigation management performance.

Conventional irrigation approaches—such as manual watering or fixed-interval timers—are limited in their ability to respond to real-time soil dynamics (Arunadevi et al., 2022). Precision irrigation technologies have therefore become increasingly important to optimize water allocation and mitigate soil degradation (Pradipta et al., 2022). Fuzzy logic has emerged as a promising decision-support framework due to its ability to translate complex, nonlinear soil–plant interactions into adaptive control actions without requiring rigid mathematical models (Lopez-Jimenez et al., 2022).

Several studies have applied fuzzy control in greenhouse or controlled environments (Faniyi & Luo, 2023); however, limited research has evaluated its performance under tropical open-field conditions or in small-scale container-based vegetable systems commonly used in Southeast Asia (Dai et al., 2023). Moreover, prior studies rarely integrate multi-parameter soil feedback (SM–EC–pH) to simultaneously regulate irrigation, nutrient dosing, and flushing cycles (Lou et al., 2022). These gaps highlight the need for adaptive control systems capable of maintaining soil physicochemical stability while minimizing water and fertilizer losses. The findings are expected to support sustainable land and water management practices for tropical horticulture and smallholder farming systems.

MATERIALS AND METHODS

EXPERIMENTAL SITE AND PLANT MATERIAL

The experiment was conducted for 14 days under tropical outdoor conditions typical of eastern Indonesia. The study employed pak-choi type *Brassica* (*Brassica* sp.) grown in plastic polybags (20 cm diameter, 25 cm height) filled with locally sourced topsoil. Each polybag was treated as an independent experimental unit. Environmental temperature ranged between 27–34°C with relative humidity between 65–85%.

EXPERIMENTAL DESIGN

A Completely Randomized Design (CRD) was applied with three irrigation treatments and three replications, resulting in nine experimental units. The treatments were as follows:

- P1 – Manual irrigation, performed by an operator

- P2 – Timer-based irrigation, applying water at fixed intervals (three events per day, 1 minutes per event).
- P3 – Adaptive fuzzy irrigation, controlled by fuzzy inference derived from real-time soil sensor readings (Bogardi et al., 2004; Mamdani, 1974).

Instead of evapotranspiration-based estimation, irrigation levels were set using empirical *Brassica* container water consumption of 0.40–0.55 L plant⁻¹ day⁻¹ (Klar & Fontes, 2003; Pivec et al., 2011). These values informed low (200 mL), medium (350 mL), and high (500 mL) reference thresholds for fuzzy decision boundaries.

SENSORS AND DATA ACQUISITION

Soil physicochemical properties were monitored using an RS485 capable of measuring soil moisture (SM, %), temperature, electrical conductivity (EC, $\mu\text{S cm}^{-1}$), pH, and nutrient concentrations (N, P, K in mg kg⁻¹). Readings were acquired every 10 minutes using a USB–RS485 interface and logged via a mobile application. EC calibration: standard solutions of 84, 1,413, and 12,880 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (ISO 7888:1985, 1985). pH calibration: buffers pH 4.00, 6.86, and 9.18 (ISO 10523:2008, 2008). N–P–K (ISO 11261:1995, 1995). Calibration accuracy was assessed using R², RMSE, and MAPE to ensure sensor reliability across the experiment.

FUZZY LOGIC CONTROL SYSTEM

The fuzzy system consisted of three input variables (SM, EC, pH) and three output variables (water, nutrient, flush pump intensities). Membership functions (triangular and trapezoidal) (Table 1). A total of 27 inference rules governed the relationships between soil conditions and irrigation/fertigation responses (Table 2). Fuzzification used trapezoidal and triangular functions (Figure 1); and defuzzification followed the centroid method, producing output duty cycles (0–100%) for pump actuation (Figure 2).

Table 1. Membership function parameters of fuzzy logic variables

Variable	Linguistic Term	MF Type	Parameter (x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₄)
SM (%)	Low	Trapezoidal	(0, 0, 20, 35)
	Medium	Triangular	(30, 45, 60)
	High	Trapezoidal	(55, 70, 100, 100)
EC ($\mu\text{S/cm}$)	Low	Trapezoidal	(0, 0, 800, 1200)
	Medium	Triangular	(1000, 1600, 2200)
	High	Trapezoidal	(2000, 2500, 3000, 3000)
pH	Acidic	Trapezoidal	(3.0, 3.0, 5.2, 5.7)
	Neutral	Triangular	(5.5, 6.2, 7.0)
	Alkaline	Trapezoidal	(6.8, 7.2, 8.0, 8.0)
Output (W, N, F)	Low	Triangular	(0, 10, 30)
	Medium	Triangular	(20, 50, 80)
	High	Triangular	(70, 85, 100)

Table 2. Fuzzy inference rules.

Rule	SM	EC	pH	Water	Nutrient	Flush	pH Adjustment
R1	Low	Low	Acidic	High	High	Low	Add dolomite
R2	Low	Low	Neutral	High	High	Low	None
R3	Low	Low	Alkaline	High	High	Low	Add acid
R4	Low	Medium	Acidic	High	Medium	Low	Add dolomite
R5	Low	Medium	Neutral	High	Medium	Low	None
R6	Low	Medium	Alkaline	High	Medium	Low	Add acid
R7	Low	High	Acidic	High	Low	Medium	Add dolomite
R8	Low	High	Neutral	High	Low	High	None
R9	Low	High	Alkaline	High	Low	High	Add acid
R10	Medium	Low	Acidic	Medium	High	Low	Add dolomite
R11	Medium	Low	Neutral	Medium	High	Low	None
R12	Medium	Low	Alkaline	Medium	High	Low	Add acid
R13	Medium	Medium	Acidic	Medium	Medium	Low	Add dolomite
R14	Medium	Medium	Neutral	Medium	Medium	Low	None
R15	Medium	Medium	Alkaline	Medium	Medium	Low	Add acid
R16	Medium	High	Acidic	Low	Low	Medium	Add dolomite
R17	Medium	High	Neutral	Low	Low	High	None
R18	Medium	High	Alkaline	Low	Low	High	Add acid
R19	High	Low	Acidic	Low	High	Low	Add dolomite
R20	High	Low	Neutral	Low	High	Low	None
R21	High	Low	Alkaline	Low	High	Low	Add acid
R22	High	Medium	Acidic	Low	Medium	Low	Add dolomite
R23	High	Medium	Neutral	Low	Medium	Low	None
R24	High	Medium	Alkaline	Low	Medium	Low	Add acid
R25	High	High	Acidic	Low	Low	High	Add dolomite
R26	High	High	Neutral	Low	Low	High	None
R27	High	High	Alkaline	Low	Low	High	Add acid

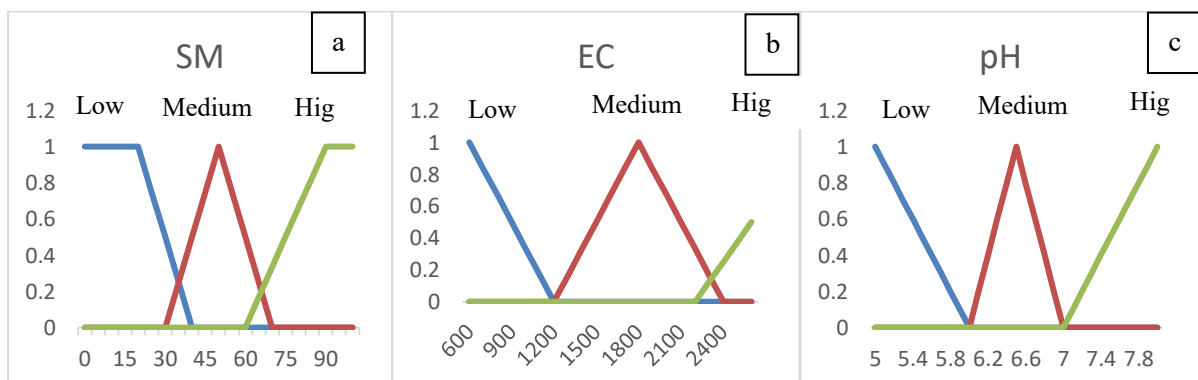


Fig. 1. Fuzzy logic model for input variables: (a) Soil moisture (SM) membership functions; (b) Electrical conductivity (EC) membership functions; (c) pH membership functions.

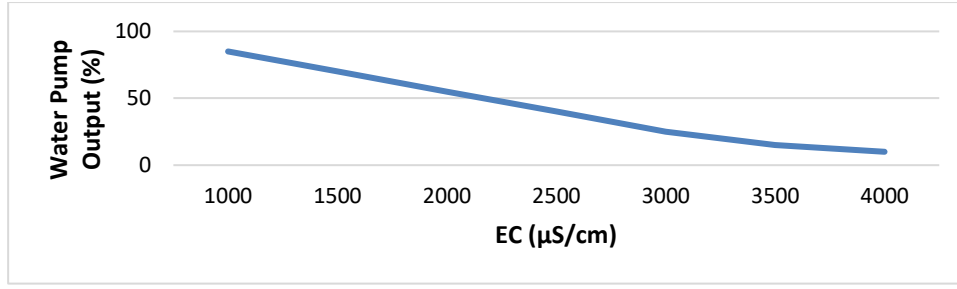


Figure 2. Rule response

IRRIGATION AND FERTIGATION PROCEDURES

In P3, irrigation decisions were automatically derived from fuzzy outputs:

- Watering action was triggered when SM < 30% (Water High).
- Nutrient dosing occurred when EC < 1500 $\mu\text{S cm}^{-1}$ and SM > 35% (Nutrient Medium).
- Flushing activated when EC > 2200 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Flush Medium–High).

Operators applied water and nutrient solutions manually according to the fuzzy-derived PWM output (scaled to mL per event). Total daily water input (L) and nutrient dosage (mg N) were recorded daily for all treatments.

PLANT GROWTH MEASUREMENTS

Plant height was measured on Days 3, 6, 9, 12, and 14. Leaf number and stem diameter were recorded on Day 14. At harvest, fresh weight was taken immediately, while dry weight was determined by oven-drying samples at 65°C to constant mass. WUE and NUE were computed as:

$$WUE = \frac{DW}{\text{Total Water Applied}} \quad (1)$$

$$NUE = \frac{DW}{\text{Total Nutrient Applied}} \quad (2)$$

DATA ANALYSIS

Data analysis was conducted using one-way ANOVA tested the effects of irrigation treatment on growth variables, biomass, water use, nutrient use, WUE, and NUE. Duncan tests were applied at $\alpha = 0.05$. Time-series patterns of SM, EC, pH, and nutrient dynamics were interpreted descriptively following soil-water-plant interaction analysis frameworks (Lopez-Jimenez et al., 2022).

RESULTS

SOIL MOISTURE, SALINITY, AND pH DYNAMICS

Soil moisture exhibited distinct temporal patterns across treatments during the 14-day experiment (Figure 3). Treatment P3 showed a rapid increase in moisture during the initial days, followed by stabilization within the agronomic threshold for *Brassica* species. In

contrast, P1 presented wider fluctuations, whereas P2 showed moderate variability. These differences arise from the varying ability of each system to regulate water input based on soil conditions. Stabilized moisture in P3 reflects adaptive real-time regulation, which is considered essential for minimizing short-term water stress in leafy vegetables (Müllers et al., 2022; Zhang et al., 2021).

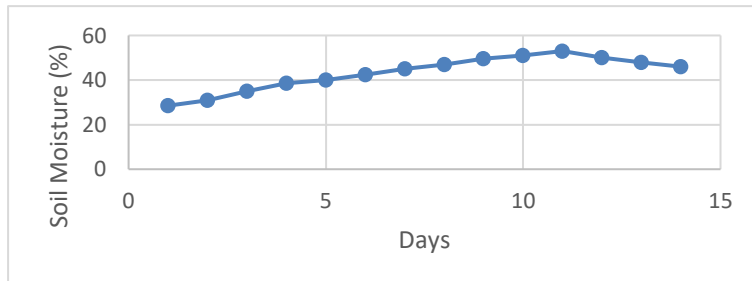


Figure 3. Temporal variation of soil moisture under three irrigation treatments.

Electrical conductivity (EC) increased during the early fertigation phase in all treatments and reached a peak around Day 10, after which it gradually declined (Figure 4). P3 exhibited a lower EC peak compared to P1 and P2. This trend is consistent with the activation of flushing events in P3, which diluted accumulated salts more effectively. EC management is crucial for preventing osmotic stress, and similar studies have demonstrated that adaptive flushing reduces salt accumulation in intensive fertigation systems (Pitton et al., 2023).

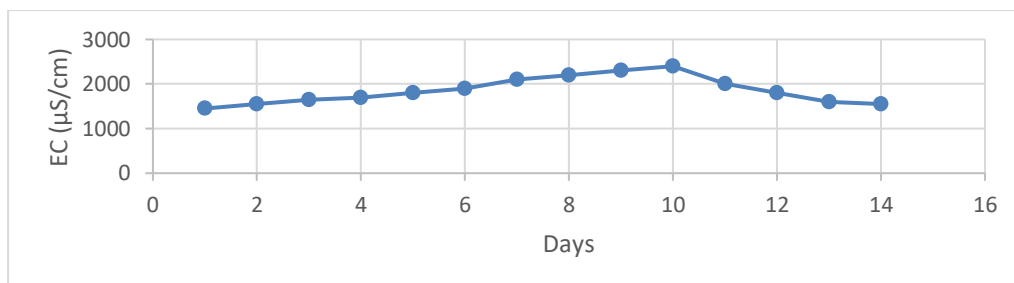


Figure 4. Soil electrical conductivity trends during the fertigation cycles.

Soil pH remained relatively stable between 6.0 and 6.6 across all treatments (Figure 5). The narrow pH range suggests that the nutrient solution and soil buffering capacity remained compatible throughout the experiment. Such stability supports optimal nutrient solubility and uptake in *Brassica* crops (Barrow & Hartemink, 2023).

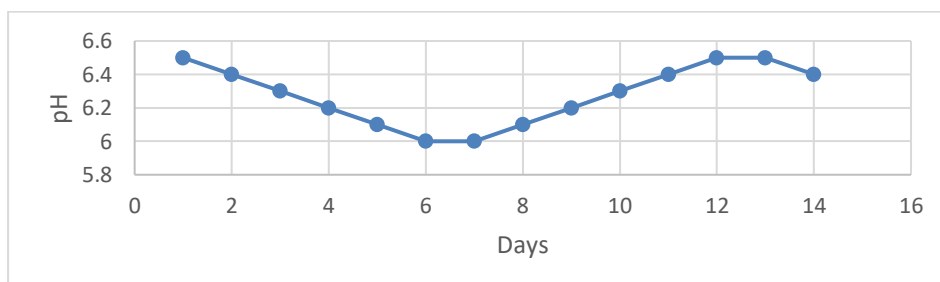


Figure 5. Soil pH variation during the experimental period.

IRRIGATION, NUTRIENT, AND FLUSH RESPONSES UNDER FUZZY CONTROL

Duty cycle variations of water, nutrient, and flush pumps under fuzzy control showed dynamic adjustment in response to soil sensor readings (Figure 6). This integrated response reflects the multi-criteria decision-making capability of fuzzy logic, enabling simultaneous regulation of water supply, nutrient dosing, and salinity mitigation. Similar control approaches have been reported to enhance fertigation precision in protected agriculture systems (Lopez-Jimenez et al., 2022).

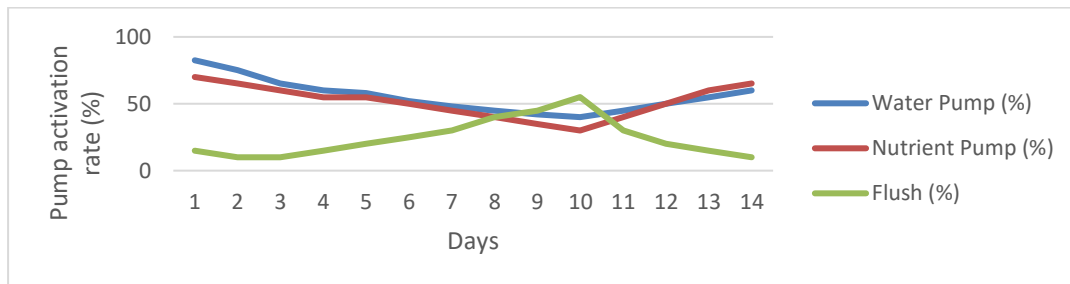


Figure 6. Water, nutrient, and flush pump activation rates (PWM %) over time.

A clear interaction between EC and flush output was observed, where increasing EC resulted in rising flush PWM values (Figure 7). Maximum flush activation coincided with EC peaks, in line with the rule-based design of the fuzzy controller. Comparable systems have demonstrated that real-time salinity-triggered flushing effectively reduces salt accumulation (Katari et al., 2019).

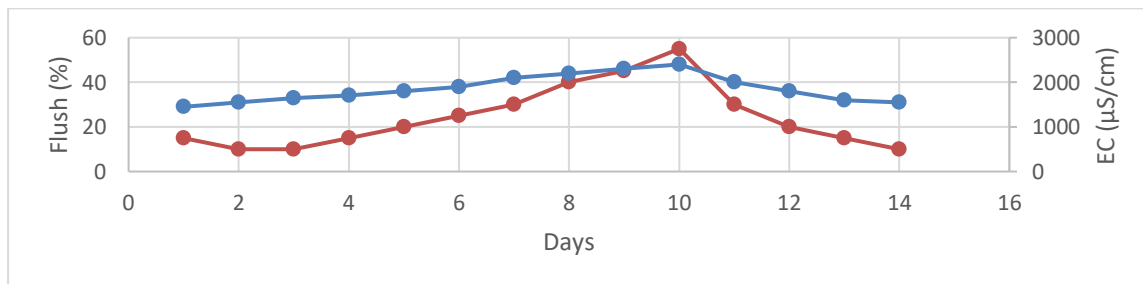


Figure 7. Relationship between soil EC and flushing intensity.

The moisture–irrigation relationship showed an inverse pattern: irrigation duty increased when soil moisture decreased and declined as moisture approached optimal levels (Figure 8). This confirms the prioritization of moisture maintenance within the fuzzy logic design. Moisture-driven modulation of irrigation has been widely recognized as a key factor in improving water efficiency in leafy vegetable cultivation (Sun et al., 2022).

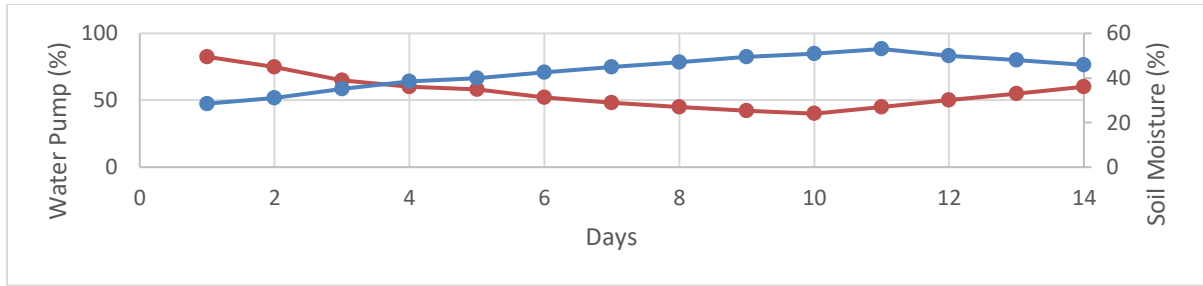


Figure 8. Relationship between soil moisture (%) and water pump output (%).

N-P-K NUTRIENT DYNAMICS AND INTEGRATED SOIL CINDITIONS

Daily N-P-K concentrations exhibited distinct fluctuation patterns, with nitrogen showing the highest variability (Figure 9). Nitrogen mobility and rapid plant uptake commonly lead to sharper variations in fertigated environments. P3 maintained smoother nutrient delivery patterns compared to P1 and P2, reflecting moderated nutrient dosing based on real-time soil conditions. Such condition-based nutrient management is known to enhance nutrient uptake efficiency and minimize nutrient loss (Lou et al., 2022).

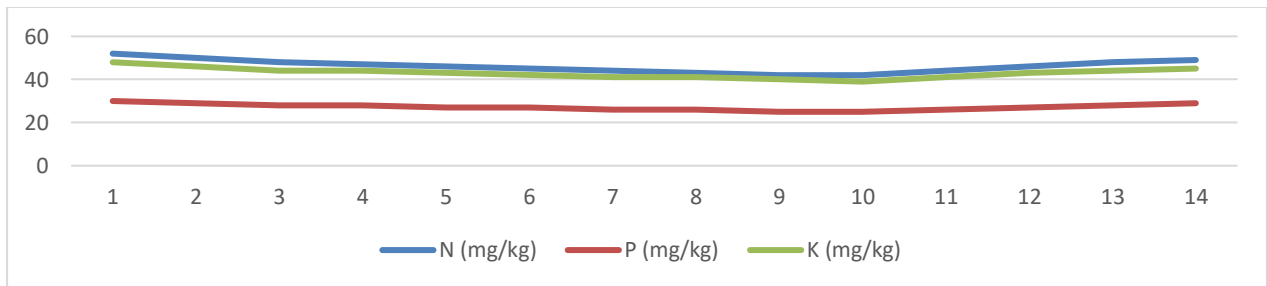


Figure 9. Variation of nitrogen, phosphorus, and potassium during fuzzy-controlled fertigation.

The integrated dynamics of soil moisture, EC, and irrigation duty are presented in the multi-axis plot (Figure 10). Decreases in soil moisture triggered an increase in irrigation output, while rising EC activated flushing events. This coordinated multi-objective regulation supports the maintenance of favorable root-zone conditions. Intelligent irrigation systems capable of managing moisture, salinity, and nutrient interactions simultaneously have been reported to significantly improve agronomic stability (Lopez-Jimenez et al., 2022).

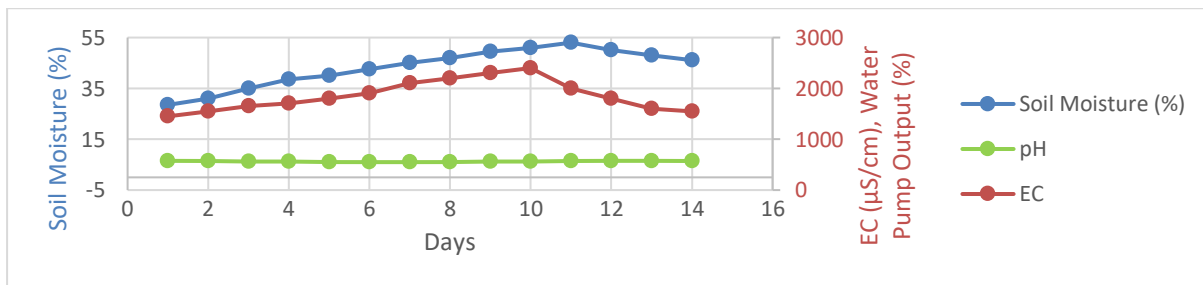


Figure 10. Multi-axis chart showing synchronized variation of moisture, EC, and irrigation output.

PLANT GROWTH PERFORMANCE

Plant growth metrics differed significantly among treatments, with P3 showing consistently higher values (Table 3). Improved growth performance in P3 is attributed to more stable soil moisture, better salinity control, and balanced nutrient supply, which collectively enhance physiological growth processes. Previous studies have shown that optimized soil conditions in adaptive irrigation systems promote biomass accumulation in *Brassica* species (Patra et al., 2022).

Table 3. Growth performance and efficiency indices under different irrigation treatments.

Parameter	P1 Manual	P2 Timer	P3 Fuzzy
Height_D15 (cm)	18.4 ± 1.2	20.1 ± 1.0	23.8 ± 1.4
Leaf count	7.2 ± 0.8	8.1 ± 0.6	9.4 ± 0.7
Stem diameter (mm)	4.6 ± 0.3	4.9 ± 0.4	5.5 ± 0.4
FW (g)	42.1 ± 3.4	47.8 ± 2.9	55.4 ± 3.1
DW (g)	4.9 ± 0.3	5.6 ± 0.4	6.4 ± 0.5
Total_Water_(L)	7.8 ± 0.6	9.5 ± 0.3	6.2 ± 0.4
Total_N_applied_(mg)	162 ± 12	180 ± 10	148 ± 14
WUE (g DW/L)	0.63	0.59	1.03
NUE (g DW/mg N)	0.03	0.031	0.043

WATER AND NUTRIENT USE EFFICIENCY

WUE and NUE were highest in P3 compared to P1 and P2. The real-time adjustment of water and nutrient supply enabled minimal wastage and improved synchrony between plant demand and input provision. These results align with precision fertigation studies demonstrating that sensor-driven irrigation improves resource-use efficiency (García-Tejero & Durán-Zuazo, 2022).

SENSOR VALIDATION

Validation metrics for the EC, pH, and NPK sensors used in this study are presented in Table 4. The R², RMSE, and MAPE values indicate acceptable accuracy for real-time monitoring applications. Reliable sensor performance is essential to support the accuracy of the fuzzy control system, as sensor errors directly influence decision outcomes. Similar validation performance has been reported for low-cost sensors integrated into smart fertigation systems (Saha et al., 2023).

Table 4. Sensor validation metrics for EC, pH, and N–P–K measurements.

Parameter	R ²	RMSE	MAPE
EC	0.98	48 µS/cm	3.80%
pH	0.94	0.12	2.10%
N	0.88	11 mg/kg	6.50%

CONCLUSIONS

Fuzzy adaptive irrigation proved more efficient and responsive than manual and timer-based systems. By using real-time soil moisture, EC, and pH data, the controller maintained optimal moisture, prevented salinity buildup, and stabilized pH. These conditions promoted better plant growth and higher biomass, with the greatest water- and nutrient-use efficiency achieved under the fuzzy treatment. Statistical analysis confirmed its superiority across key variables. Fuzzy irrigation shows strong potential for precision fertigation in tropical conditions, and further work should test full crop cycles, automate data logging, and refine the rule base with advanced computational methods.

REFERENCES

- Arunadevi, K., Singh, M., Franco, D., Prajapati, V. K., Ramachandran, J., & Maruthi Sankar, G. R. (2022). Real Time Soil Moisture (RTSM) Based Irrigation Scheduling to Improve Yield and Water-Use Efficiency of Green Pea (*Pisum sativum* L.) Grown in North India. *Agronomy*, *12*(2). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12020278>
- Barrow, N. J., & Hartemink, A. E. (2023). The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. *Plant and Soil*, *487*(1–2), 21–37. <https://doi.org/10.1007/S11104-023-05960-5>
- Bogardi, I., Bardossy, A., Duckstein, L., & Pongracz, R. (2004). Fuzzy Logic in Hydrology and Water Resources. *Fuzzy Logic in Geology*, 153–VIII. <https://doi.org/10.1016/B978-012415146-8/50009-3>
- Dai, Z., Zhao, X., Yan, H., Qin, L., Niu, X., Zhao, L., & Cai, Y. (2023). Optimizing Water and Nitrogen Management for Green Pepper (*Capsicum annuum* L.) under Drip Irrigation in Sub-Tropical Monsoon Climate Regions. *Agronomy*, *13*(1). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13010034>
- Faniyi, B., & Luo, Z. (2023). A Physics-Based Modelling and Control of Greenhouse System Air Temperature Aided by IoT Technology. *Energies*, *16*(6), 1–18. <https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v16y2023i6p2708-d1096920.html>

- FAO. (2017). Water for sustainable food and agriculture. *United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat): Addis Ababa, Ethiopia.* (2021), 52.
<https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i7959en>
- García-Tejero, I. F., & Durán-Zuazo, V. H. (2022). Plant Water Use Efficiency for a Sustainable Agricultural Development. *Agronomy*, 12(8).
<https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12081806>
- ISO 7888:1985. (1985). *ISO 7888:1985 - Water quality — Determination of electrical conductivity.* <https://www.iso.org/standard/14838.html>
- ISO 10523:2008. (2008). *ISO 10523:2008 - Water quality — Determination of pH.* <https://www.iso.org/standard/51994.html>
- ISO 11261:1995. (1995). *ISO 11261:1995 - Soil quality — Determination of total nitrogen — Modified Kjeldahl method.* <https://www.iso.org/standard/19239.html>
- Katuri, J. R., Trifonov, P., & Arye, G. (2019). Spatial distribution of salinity and sodicity in arid climate following long term brackish water drip irrigated olive orchard. *Water (Switzerland)*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/W11122556>
- Klar, A. E., & Fontes, E. W. D. S. (2003). WATER USE BY BROCCOLI PLANTS (*Brassica oleracea* F, var. *Italica*). *IRRIGA*, 8(1), 37–43.
<https://doi.org/10.15809/IRRIGA.2003V8N1P37-43>
- Kramer, I., & Mau, Y. (2023). Review: Modeling the Effects of Salinity and Sodicity in Agricultural Systems. *Water Resources Research*, 59(6).
<https://doi.org/10.1029/2023WR034750>
- Lopez-Jimenez, J., Vande Wouwer, A., & Quijano, N. (2022). Dynamic Modeling of Crop–Soil Systems to Design Monitoring and Automatic Irrigation Processes: A Review with Worked Examples. *Water (Switzerland)*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/W14060889>
- Lou, S., Hu, R. Q., Liu, Y., Zhang, W. feng, & Yang, S. Q. (2022). The formulation of irrigation and nitrogen application strategies under multi-dimensional soil fertility targets based on preference neural network. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-022-25133-1>
- Mamdani, E. H. (1974). APPLICATION OF FUZZY ALGORITHMS FOR CONTROL OF SIMPLE DYNAMIC PLANT. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(12), 1585–1588.
<https://doi.org/10.1049/PIEE.1974.0328;SUBPAGE:STRING:ABSTRACT;JOURNAL:JOURNAL:PIEE;WEBSITE:WEBSITE:IET-SITE;ISSUE:ISSUE:DOI>
- Müllers, Y., Postma, J. A., Poorter, H., & van Dusschoten, D. (2022). Stomatal conductance tracks

soil-to-leaf hydraulic conductance in faba bean and maize during soil drying. *Plant Physiology*, 190(4), 2279–2294. <https://doi.org/10.1093/PLPHYS/KIAC422>

Patra, S. K., Poddar, R., Pramanik, S., Gaber, A., & Hossain, A. (2022). Crop and water productivity and profitability of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. italica) under gravity drip irrigation with mulching condition in a humid sub-tropical climate. *PLOS ONE*, 17(3), e0265439. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0265439>

Petrić, I., Šamec, D., Karalija, E., & Salopek-Sondi, B. (2022). Beneficial Microbes and Molecules for Mitigation of Soil Salinity in *Brassica* Species: A Review. *Soil Systems*, 6(1). <https://doi.org/10.3390/SOILSYSTEMS6010018>

Pitton, B. J. L., Wikramanayake, A. M., & Johnson, G. E. (2023). Mechanically-Incorporated Controlled-Release Fertilizer Results in Greater Nitrogen and Salt Leaching Losses from Soilless Substrate in Containers. *Horticulturae*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE9010042>

Pivec, J., Brant, V., Bečka, D., & Cihlár, P. (2011). Consumptive use of water in *Brassica napus* L. from flowering to ripening stage under rainless region conditions. *Irrigation and Drainage*, 60(4), 493–498. <https://doi.org/10.1002/IRD.598;JOURNAL:JOURNAL:15310361;WGROU:STRING:PUBLICATION>

Pradipta, A., Soupios, P., Kourgialas, N., Doula, M., Dokou, Z., Makkawi, M., Alfarhan, M., Tawabini, B., Kirmizakis, P., & Yassin, M. (2022). Remote Sensing, Geophysics, and Modeling to Support Precision Agriculture—Part 2: Irrigation Management. *Water (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/W14071157>

Saha, A., Sedaghat, S., Gopalakrishnan, S., Waimin, J., Yermembetova, A., Glassmaker, N., Mousoulis, C., Shakouri, A., Wei, A., Rahimi, R., & Alam, M. A. (2023). A new paradigm of reliable sensing with field-deployed electrochemical sensors integrating data redundancy and source credibility. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-022-25920-W>

Sun, W., Hamani, A. K. M., Si, Z., Abubakar, S. A., Liang, Y., Liu, K., & Gao, Y. (2022). Effects of Timing in Irrigation and Fertilization on Soil NO₃–N Distribution, Grain Yield and Water–Nitrogen Use Efficiency of Drip-Fertigated Winter Wheat in the North China Plain. *Water (Switzerland)*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/W14111780>

Zhang, J., Guan, K., Peng, B., Pan, M., Zhou, W., Jiang, C., Kimm, H., Franz, T. E., Grant, R. F., Yang, Y., Rudnick, D. R., Heeren, D. M., Suyker, A. E., Bauerle, W. L., & Miner, G. L. (2021). Sustainable irrigation based on co-regulation of soil water supply and atmospheric evaporative demand. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/S41467-021->

25254-7

SURAT PERNYATAAN KEABSAHAN KARYA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Jemmy J.S. Dethan
NIDN : 0807016801
Jabatan Fungsional : Lektor
Pangkat / Golongan : Penata IIIC
Instansi / Unit Kerja : Program Studi Mekanisasi Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian,
Universitas Kristen Artha Wacana Kupang

Dengan ini menyatakan dengan sebenar-benarnya dan penuh kesadaran bahwa karya intelektual yang saya ajukan untuk Penilaian Angka Kredit (PAK) pada butir kegiatan III.F.6 memiliki identitas sebagai berikut:

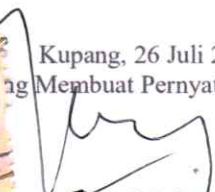
Judul Karya Intelektual : PEMANFAATAN AIoT UNTUK INTEGRASI KOLAM IKAN AIR
TAWAR DAN PERTANIAN HORTIKULTURA BERBASIS IRIGASI NUTRISI OTOMATIS
Jenis Kekayaan Intelektual : Hak Cipta (Jenis Ciptaan: Laporan Penelitian)
Nomor Permohonan : EC002026021754 (Tanggal 4 Februari 2026)
Nomor Pencatatan : 001129905
Tanggal Terbit Sertifikat : 4 Februari 2026
Status Pencipta : Anggota Tim Peneliti (Bersama Ketua Tim: Dr. Jonathan E. Koehuan, ST,
MP; dan Anggota: Alfred G.O. Kase, S.Pi, M.Si, Ph.D)

Menyatakan bahwa:

1. Karya tersebut di atas adalah benar-benar karya asli (orisinil) hasil pemikiran, penelitian, dan kreativitas kami tim peneliti Universitas Kristen Artha Wacana Kupang, bukan merupakan hasil plagiasi, duplikasi, atau saduran ilegal dari karya pihak lain.
2. Karya ini belum pernah digunakan atau diajukan sebelumnya untuk pemenuhan Angka Kredit pada jenjang jabatan fungsional yang sama atau di instansi lain.
3. Seluruh dokumen pendukung, berkas pemindaian (scan) Surat Pencatatan Ciptaan nomor 001129905, dan laporan fisik yang saya lampirkan adalah sah, valid, dan sesuai dengan dokumen aslinya.

Apabila di kemudian hari terbukti atau ditemukan indikasi bahwa pernyataan ini tidak benar, terjadi unsur plagiarisme, atau manipulasi data pada karya tersebut, saya bersedia menerima segala sanksi administratif, pembatalan angka kredit, maupun tuntutan hukum sesuai ketentuan perundang-undangan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar, sesungguhnya, dan tanpa ada paksaan dari pihak manapun untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Kupang, 26 Juli 2026
Membuat Pernyataan,

(Jemmy J.S. Dethan)
NIDN. 0807016801

