

Perancangan Sistem Kendali Pompa *Submersible* Dengan *Fuzzy Type-2* Berbasis *IoT* Dan Android

DOI: <http://dx.doi.org/10.35889/jutisi.v15i4.3764>

Creative Commons License 4.0 (CC BY – NC)

Nafis Pratama Putra¹, Basuki Rahmat^{2*}, Eka Prakarsa Mandyartha³^{1,3}Informatika, UPN Veteran Jawa Timur, Surabaya, Indonesia²Magister Teknologi Informasi, UPN Veteran Jawa Timur, Surabaya, Indonesia

*e-mail Corresponding Author: basukirahmat.if@upnjatim.ac.id

Abstract

Rice, as a strategic commodity, faces major challenges due to climate change and the wasteful use of water in manual irrigation, which is only 30–50% efficient. This study developed a smart submersible pump irrigation system based on the Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2FLS), integrated with the Internet of Things (IoT) and an android mobile application. The system uses an ESP32 microcontroller as the main control unit, soil moisture sensors, rain sensors, and Type-2 fuzzy logic processing on the server to generate automated decisions that are more robust against sensor data uncertainty. Testing was conducted on rice paddy fields. The test results showed that the system was able to save up to 38.7% in water usage and up to 38.6% in electricity compared to manual irrigation. The android application functioned well for real-time monitoring and remote control. This study proves that the integration of IT2FLS, IoT, and mobile applications can improve rice paddy irrigation efficiency and support the implementation of smart farming.

Kata kunci: Interval Type-2 Fuzzy Logic; IoT; rice field irrigation; android app; submersible pump

Abstrak

Padi sebagai komoditas strategis menghadapi tantangan besar akibat perubahan iklim dan pemborosan air irigasi manual yang efisiensinya hanya 30–50%. Penelitian ini mengembangkan sistem irigasi cerdas pompa *submersible* berbasis *Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2FLS)* terintegrasi dengan *Internet of Things (IoT)* dan aplikasi *mobile* android. Sistem ini menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit kendali utama, sensor kelembapan tanah, sensor hujan, serta pemrosesan logika *fuzzy* tipe-2 pada server untuk menghasilkan keputusan otomatis yang lebih *robust* terhadap ketidakpastian data sensor. Pengujian dilakukan pada lahan sawah. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu menghemat penggunaan air hingga 38,7% dan listrik hingga 38,6% dibandingkan irigasi manual. Aplikasi android berfungsi dengan baik untuk monitoring *real-time* dan kontrol jarak jauh. Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi *IT2FLS*, *IoT*, dan aplikasi *mobile* dapat meningkatkan efisiensi irigasi sawah serta mendukung implementasi *smart farming*.

Kata kunci: Interval Type-2 Fuzzy Logic; IoT; irigasi sawah; aplikasi android; pompa *Submersible*

1. Pendahuluan

Padi merupakan komoditas strategis yang menjadi tulang punggung ketahanan pangan nasional di Indonesia [1],[2]. Sebagai makanan pokok utama masyarakat, padi tidak hanya mendukung kebutuhan pangan jutaan penduduk, tetapi juga menjadi sumber penghidupan utama bagi petani dan berkontribusi signifikan terhadap stabilitas ekonomi pertanian [3]. Oleh karena itu, peningkatan produktivitas dan efisiensi pengelolaan lahan sawah menjadi topik yang sangat penting untuk diteliti guna mendukung ketahanan pangan yang berkelanjutan di tengah tekanan pertumbuhan penduduk dan perubahan iklim.

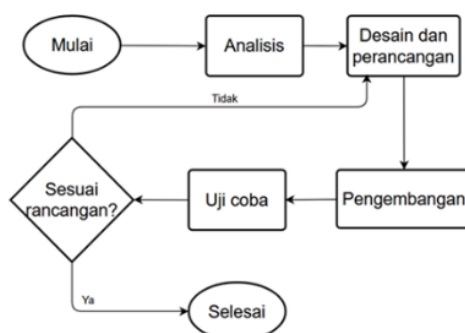
Sektor pertanian padi saat ini menghadapi berbagai tantangan, terutama perubahan iklim ekstrem dan kelangkaan sumber daya air pada musim kemarau [4]. Irigasi konvensional atau manual yang mengandalkan perkiraan petani cenderung menyebabkan pemborosan air yang signifikan dengan tingkat efisiensi hanya berkisar 30–50%, atau sebaliknya mengakibatkan kekurangan pasokan air pada fase-fase kritis pertumbuhan tanaman [5]. Hal ini berdampak pada penurunan produktivitas dan peningkatan biaya operasional petani [6]. Penggunaan pompa *submersible* untuk pengairan sawah telah banyak diterapkan, namun pengoperasiannya masih didominasi oleh sistem manual atau kontrol *on-off* sederhana [7]. Sistem kendali konvensional ini belum mampu mengakomodasi ketidakpastian parameter lingkungan yang bersifat dinamis dan non-linear, seperti variasi kelembapan tanah dan intensitas curah hujan [8]. Selain itu, logika *fuzzy* tipe-1 yang kerap digunakan masih memiliki keterbatasan dalam menangani tingkat ketidakpastian (*uncertainty*) yang tinggi pada data sensor akibat kondisi lingkungan yang berubah-ubah dan tidak pasti [9].

Beberapa penelitian terdahulu telah berupaya mengembangkan model sistem kendali pompa irigasi berbasis otomatis. Alat irigasi otomatis dari jarak jauh untuk tanaman seledri menggunakan mikrokontroler ATmega328p pada platform arduino, dilengkapi sensor DHT22 dan sensor kelembapan tanah, dengan pemantauan melalui program komputer [10]. Sistem monitoring pemupukan dan penyiraman tanaman otomatis berbasis *IoT* dengan memanfaatkan berbagai sensor (suhu, kelembapan tanah, kelembapan udara, dan pH) yang mengirim data ke server dan ditampilkan melalui website [11]. Sistem irigasi pintar menggunakan logika *fuzzy* tipe-1 dengan metode Mamdani yang memproses input suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya untuk mengendalikan pompa air secara otomatis [12]. Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah memberikan kontribusi dalam otomatisasi irigasi, masih terdapat gap yang signifikan, yaitu kurangnya kemampuan sistem dalam menangani ketidakpastian data sensor yang tinggi, keterbatasan integrasi pengendalian jarak jauh yang fleksibel melalui aplikasi *mobile* khusus untuk lahan sawah skala menengah, serta belum optimalnya pemanfaatan sensor hujan untuk pencegahan kelebihan air secara otomatis.

Untuk mengatasi permasalahan sebelumnya, penelitian ini mengusulkan *Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2FLS)* terintegrasi dengan teknologi *Internet of Things (IoT)* dan aplikasi *mobile* berbasis android sebagai state of the art. Dibandingkan dengan *fuzzy* tipe-1, *IT2FLS* lebih robust karena memiliki *Footprint of Uncertainty (FOU)* yang memungkinkan pemodelan dan penanganan ketidakpastian secara lebih akurat [13]. Integrasi dengan *IoT* memungkinkan akuisisi data *real-time* dari sensor kelembapan tanah dan sensor hujan melalui mikrokontroler ESP32 yang dikirim ke cloud server [14]. Aplikasi android dapat membantu petani memantau kondisi lahan dan mengendalikan pompa *submersible* dari jarak jauh secara fleksibel [15]. Pendekatan ini didukung oleh berbagai studi sebelumnya yang menunjukkan keunggulan *IT2FLS* dalam sistem kendali non-linear dan dinamis, serta potensi *IoT* dalam mewujudkan *smart agriculture*. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi *IT2FLS* dengan *IoT* dan aplikasi android yang dirancang khusus untuk irigasi sawah skala menengah, dilengkapi sensor hujan, sehingga mampu memberikan keputusan otomatis yang lebih akurat, mengurangi pemborosan air, dan meningkatkan efisiensi pengelolaan lahan sawah secara berkelanjutan.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan *prototyping* berbasis *Internet of Things (IoT)*. Metode ini dipilih karena memungkinkan untuk mengembangkan, mengimplementasikan, serta menguji sistem secara bertahap dan iteratif sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Fokus utama penelitian adalah perancangan sistem kendali pompa *submersible* yang cerdas serta sistem kinerjanya menggunakan *Interval Type-2 Fuzzy Logic (IT2FLS)* sebagai metode pengambilan keputusan. Pendekatan ini dipilih karena sistem yang dikembangkan melibatkan integrasi yang kompleks antara perangkat keras (*hardware*), sensor lingkungan, algoritma kecerdasan buatan, konektivitas *IoT*, dan aplikasi *mobile* dalam satu kesatuan sistem yang harus beroperasi secara *real-time* di lingkungan sawah yang dinamis dan penuh ketidakpastian. Melalui pendekatan *prototyping*, segala permasalahan teknis dapat diidentifikasi dan diperbaiki sejak tahap awal sebelum diimplementasikan secara penuh. Proses penelitian dilakukan melalui lima tahapan utama, yaitu analisis kebutuhan, desain sistem, pengembangan perangkat dan perangkat lunak, implementasi, serta uji coba dan evaluasi kinerja.



Gambar 1. Tahapan penelitian

Analisis kebutuhan dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan pengamatan langsung terhadap permasalahan irigasi sawah serta solusi yang dikembangkan berbasis *Internet of Things (IoT)*. Kebutuhan sistem secara keseluruhan dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu kebutuhan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Pemenuhan kebutuhan ini penting agar sistem kendali pompa *submersible* dan monitoring irigasi dapat beroperasi secara optimal, akurat, serta terintegrasi dengan baik antara aplikasi *mobile* dan *backend* server.

Tabel 1. Analisis kebutuhan *hardware*

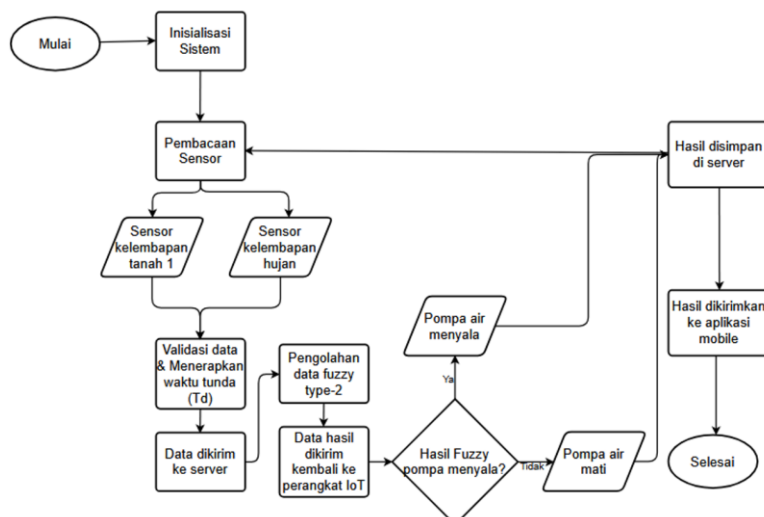
Komponen	Fungsi
ESP32	Mikrokontroler yang mengendalikan seluruh sistem.
Sensor Kelembapan Tanah	Mengukur tingkat kelembapan tanah.
Sensor Hujan	Mendeteksi kondisi hujan.
LCD 20X4 dengan I2C	Menampilkan data dari ESP32
Stepdown	Menurunkan tegangan DC
Adaptor (<i>Power Supply</i>)	Mengubah sumber listrik AC 220V PLN menjadi DC
Relay	Mengendalikan pompa <i>submersible</i>
Kabel Jumper	Penghubung antar komponen elektronik pada rangkaian
PCB	Mempermudah pemasangan komponen
Smartphone (<i>android</i>)	Perangkat pengguna untuk memantau dan mengontrol sistem

Tabel 2. Analisis kebutuhan *software*

Komponen	Fungsi
Arduino IDE	Mengembangkan, dan mengunggah kode program ke ESP32.
Aplikasi <i>mobile</i> (<i>Developed App</i>)	Antarmuka utama pengguna untuk memantau kondisi sensor, status pompa, dan mengontrol sistem secara <i>realtime</i> .
Web server	<i>Backend</i> untuk penyimpanan data dan API berbasis web.
Nginx	Mendistribusikan konten maupun permintaan ke <i>aplikasi server</i> .
Database (MySQL)	Menyimpan data sensor maupun relay.

Sistem ini menggunakan integrasi yang erat antara perangkat keras dan perangkat lunak agar seluruh komponen dapat beroperasi secara sinkron dan optimal. Aplikasi *mobile* berfungsi sebagai antarmuka monitoring bagi petani, sedangkan *backend* server bertugas menyimpan data secara aman agar dapat diakses. Logika *fuzzy* tipe-2 diterapkan pada bagian perangkat lunak untuk menghasilkan keputusan otomatis berdasarkan data *real-time* yang diperoleh dari sensor kelembapan tanah dan sensor hujan.

Selanjutnya *flowchart* tahapan alur kerja proses sistem, pada penelitian ini *flowchart* alur kerja sistem ditunjukkan pada *Figure 2*.



Gambar 2. Alur kerja sistem

Figure 2. menunjukkan alur operasional sistem kendali pompa *submersible* berbasis *Interval Type-2 Fuzzy Logic (IT2FLS)* yang terdiri dari tahapan-tahapan berikut:

1. Inisialisasi sistem, meliputi mikrokontroler ESP32, sensor hujan, sensor kelembapan tanah, modul komunikasi *IoT*, serta aktuator (relay).
2. Pengaturan parameter operasional, yaitu interval sampling (T_s), batas validasi sensor, dan waktu tunda (T_d) untuk meredam fluktuasi pembacaan sensor.
3. Memulai loop pemantauan selama sistem aktif.
4. Akuisisi data, yaitu pembacaan nilai curah hujan (H) dan nilai kelembapan tanah (SM).
5. Validasi data. Apabila terjadi kegagalan pembacaan atau nilai sensor berada di luar rentang yang valid, sistem menandai status error dan mempertahankan status pompa sebelumnya.
6. Stabilisasi pembacaan dengan menerapkan waktu tunda (T_d).
7. Pengiriman data ke server yang mencakup nilai curah hujan (H), nilai kelembapan tanah (SM), dan status pompa. Proses *fuzzy* tipe-2 dilakukan pada server.
8. Fuzzifikasi tipe-2, yaitu mengubah *input* H dan SM menjadi derajat keanggotaan interval pada setiap himpunan linguistik yang digunakan.
9. Inferensi aturan, yaitu evaluasi basis pengetahuan (*rule base*) berdasarkan kombinasi *input* (H dan SM) untuk menghasilkan keluaran *fuzzy* tipe-2.
10. Tipe Reduksi, yaitu proses reduksi keluaran tipe-2 menjadi tipe-1 menggunakan metode Karnik-Mendel (KM) untuk mendapatkan interval centroid.
11. Defuzzifikasi, yaitu mengubah hasil reduksi menjadi nilai tegas (*crisp value*) yang dinyatakan sebagai u .
12. Pengambilan keputusan kendali pompa yang dikirimkan kembali ke perangkat *IoT*:
 - a. Jika $u \geq \theta_{ON}$ dan kondisi mendukung irigasi (tidak hujan dan tanah kering), maka pompa dihidupkan (*ON*).
 - b. Jika $u \leq \theta_{OFF}$ dan kondisi tidak mendukung (curah hujan tinggi atau kelembapan tanah optimal), maka pompa dimatikan (*OFF*).
13. Eksekusi aktuator, yaitu mengirimkan sinyal ke relay dan kontaktor untuk menyalakan atau mematikan pompa sesuai keputusan.
14. Menunggu interval sampling (T_s), kemudian kembali ke tahap akuisisi data (langkah 4).

Aplikasi *mobile* yang dikembangkan, didukung oleh server, berfungsi sebagai antarmuka utama untuk pemantauan dan pengendalian sistem dari jarak jauh. Aplikasi dirancang untuk menampilkan data *real-time* dari sensor serta memungkinkan interaksi pengguna dalam mengontrol operasi sistem. Aplikasi *mobile* yang dikembangkan memiliki beberapa fungsi utama, yaitu:

- 1) Pemantauan *real-time*, yang menampilkan status terkini dari sensor kelembapan tanah dan sensor curah hujan. Data sensor yang telah diolah dikirimkan melalui *web service* ke *database* untuk selanjutnya ditampilkan pada aplikasi *mobile*.

- 2) Kontrol pompa, memungkinkan pengguna mengatur mode operasi pompa, terutama mode otomatis berbasis *Interval Type-2 Fuzzy Logic* untuk mengendalikan nyala dan mati pompa secara otomatis.
- 3) Riwayat pencatatan (*history log*), yang menyimpan data historis operasi pompa meliputi waktu nyala, durasi operasi, serta konsumsi daya listrik yang digunakan selama pompa aktif.
- 4) *Backend* server berfungsi sebagai pusat pengolahan dan penyimpanan data, sekaligus sebagai penghubung antara perangkat *IoT* dengan aplikasi *mobile*.



Gambar 3. Desain aplikasi *mobile*

2.1. Penerapan fuzzy tipe-2

1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan tahap awal dalam sistem kendali *fuzzy* yang mengubah nilai *crisp* (data numerik) dari hasil pembacaan sensor menjadi bentuk *fuzzy*. Pada *Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2FLS)*, proses ini menghasilkan interval derajat keanggotaan berupa $[\mu_L, \mu_U]$, yang dibatasi oleh *Upper Membership Function (UMF)* dan *Lower Membership Function (LMF)*. Pendekatan ini memungkinkan sistem menangani ketidakpastian yang lebih tinggi dibandingkan *fuzzy* tipe-1, sehingga meningkatkan ketangguhan pengambilan keputusan.

Variabel masukan yang digunakan dalam sistem ini adalah kelembapan tanah (0–100%) dan curah hujan (0–25 mm). Himpunan linguistik untuk kelembapan tanah terdiri dari tiga kategori yaitu Kering, Lembab, dan Basah, sedangkan untuk curah hujan terdiri dari empat kategori yaitu Ringan, Sedang, Lebat, dan Sangat Lebat. Fungsi keanggotaan dibentuk menggunakan kombinasi fungsi linear dan segitiga. Batas atas (UMF) dan batas bawah (LMF). MF Segitiga:

$$\mu [x,a,b] = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a < x \leq 20 \\ \frac{c-x}{c-b}; & b < x < c \\ 0; & x \geq c \end{cases} \quad (1)$$

2. Inferensi

Pada tahap inferensi, setiap aturan dalam basis pengetahuan dievaluasi menggunakan interval derajat keanggotaan yang dihasilkan dari proses fuzzifikasi. Proses ini menghitung kekuatan aktivasi (*firing strength*) setiap aturan dan melakukan agregasi untuk menghasilkan keluaran *fuzzy* tipe-2. Sistem menggunakan masukan dari sensor kelembapan tanah (SM) serta sensor curah hujan untuk menghasilkan keputusan pengendalian pompa secara otomatis.

Basis aturan disusun dalam bentuk *IF-THEN*, yang merupakan kombinasi dari 3 kondisi kelembapan tanah pada dua sensor dengan 4 tingkat curah hujan. Aturan-aturan ini dirancang berdasarkan prinsip pengelolaan irigasi padi untuk menghasilkan keputusan nyala atau mati pompa yang tepat sesuai kondisi lingkungan.

3. Reduksi tipe (*type reduction*)

Keluaran inferensi berupa himpunan *fuzzy* tipe-2 yang masih mengandung ketidakpastian. Tahap reduksi tipe dilakukan untuk mengubah himpunan tipe-2 menjadi tipe-1 menggunakan algoritma Karnik-Mendel (KM). Algoritma ini menghasilkan interval *centroid* [c_L , c_R] yang merepresentasikan rentang nilai keluaran dengan mempertimbangkan ketidakpastian.

1. Langkah Inisialisasi c_L ($t = 0$) :

$$c_L^{(0)} = \frac{\sum_{j=1}^N x_j \times \bar{\mu}_{aggr}(x_j)}{\sum_{j=1}^N \bar{\mu}_{aggr}(x_j)} \quad (2)$$

2. Langkah Inisialisasi c_L ($t \geq 0$) :

$$c_L^{(t+1)} = \frac{\sum_{j=1}^N x_j \times \bar{\mu}_{aggr}(x_j) + \sum_{j=k+1}^N x_j \times \underline{\mu}_{aggr}(x_j)}{\sum_{j=1}^N \bar{\mu}_{aggr}(x_j) + \sum_{j=k+1}^N \underline{\mu}_{aggr}(x_j)} \quad (3)$$

3. Langkah Inisialisasi c_R ($t = 0$) :

$$c_R^{(0)} = \frac{\sum_{j=1}^N x_j \times \underline{\mu}_{aggr}(x_j)}{\sum_{j=1}^N \underline{\mu}_{aggr}(x_j)} \quad (4)$$

4. Langkah Inisialisasi c_R ($t \geq 0$) :

$$c_R^{(t+1)} = \frac{\sum_{j=1}^N x_j \times \underline{\mu}_{aggr}(x_j) + \sum_{j=k+1}^N x_j \times \bar{\mu}_{aggr}(x_j)}{\sum_{j=1}^N \underline{\mu}_{aggr}(x_j) + \sum_{j=k+1}^N \bar{\mu}_{aggr}(x_j)} \quad (5)$$

4. Defuzzifikasi

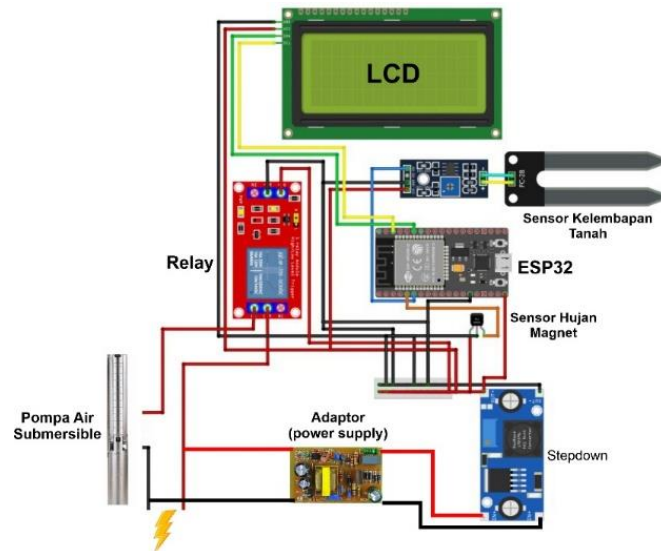
Pada tahap defuzzifikasi, interval *centroid* [c_L , c_R] yang dihasilkan dari proses reduksi tipe dikonversi menjadi satu nilai *crisp* tunggal (u) dengan menghitung rata-rata kedua batas tersebut. Nilai *crisp* ini selanjutnya digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan akhir untuk menentukan status pompa (*ON/OFF*) dengan membandingkannya terhadap *threshold* yang telah ditentukan.

$$y_{(crisp)} = \frac{c_L + c_R}{2} \quad (6)$$

2.2. Perancangan alat *IoT*

Dengan mikrokontroler ESP32 sebagai unit kendali utama, seluruh rangkaian sistem dirancang agar terintegrasi dengan baik antara sensor, relay, dan sumber daya, sehingga mendukung kinerja optimal sistem *IoT*. Berikut adalah penjelasan detail mengenai sambungan antar komponen:

1. Seluruh terminal *ground* (negatif) dari komponen terhubung ke pin GND ESP32.
2. Seluruh suplai tegangan positif (+) komponen terhubung ke pin 5V.
3. Relay modul terhubung ke pin GPIO5.
4. Layar LCD dihubungkan melalui modul I2C.
5. Pin SDA modul I2C LCD terhubung ke pin GPIO21.
6. Pin SCL modul I2C LCD terhubung ke pin GPIO22.
7. Sensor hujan (*magnetic reed switch*) terhubung ke pin GPIO34.
8. Pin AO (*Analog Output*) sensor kelembapan tanah terhubung ke pin GPIO35.
9. Sambungan *power supply* utama terhubung ke *input step-down voltage converter*.
10. Seluruh sensor mendapatkan suplai daya dari power supply yang telah diregulasi.



Gambar 4. Skema alat IoT

2.3. Skenario uji coba

Pengujian sistem irigasi cerdas berbasis *Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2FLS)* terintegrasi IoT dan aplikasi android dilakukan secara bertahap untuk memastikan seluruh komponen berfungsi dengan baik serta sistem mampu bekerja secara *real-time* di lapangan. Pengujian ini mencakup berbagai aspek mulai dari perangkat keras, logika kendali, integrasi komunikasi, dan antarmuka aplikasi:

1) Pengujian perangkat keras (*hardware*)

Pengujian perangkat keras meliputi akurasi dan kestabilan pembacaan sensor kelembapan tanah pada berbagai kondisi tanah (kering, lembab, dan basah), deteksi sensor hujan pada berbagai tingkat intensitas (ringan, sedang, lebat, dan sangat lebat), serta fungsi aktuator relay dan pompa *submersible* dalam menyalakan dan mematikan pompa sesuai perintah. Selain itu, diuji juga kinerja mikrokontroler ESP32 meliputi pembacaan sensor, komunikasi *Wi-Fi*, dan tampilan LCD.

2) Pengujian logika kendali *Interval Type-2 Fuzzy*

Pengujian logika kendali *Interval Type-2 Fuzzy* meliputi proses fuzzifikasi dengan Upper dan Lower Membership Function untuk *input* kelembapan tanah dan curah hujan, inferensi aturan (*rule base*) beserta agregasi *output fuzzy* tipe-2, serta proses *type reduction* menggunakan algoritma Karnik-Mendel. Selanjutnya dilakukan defuzzifikasi menjadi nilai *crisp* untuk menghasilkan keputusan *ON/OFF* pompa berdasarkan *threshold*, dan pengujian ketangguhan sistem dalam menangani ketidakpastian serta *noise* pada data sensor.

3) Pengujian integrasi IoT dan komunikasi

Pengujian integrasi IoT dan komunikasi mencakup pengiriman data sensor secara *real-time* ke server (kelembapan tanah, curah hujan, dan status pompa), sinkronisasi data antara perangkat IoT berbasis ESP32 dengan *backend* server serta aplikasi *mobile*. Pengujian juga meliputi penanganan *error* komunikasi, serta validasi data sensor.

4) Pengujian aplikasi *mobile* android

Pengujian aplikasi *mobile* android difokuskan pada fungsi utama yang dikembangkan, yaitu:

- a. Pemantauan *real-time*, yang mencakup tampilan status terkini dari sensor kelembapan tanah dan sensor curah hujan. Data sensor yang dikirimkan melalui web service ke *database* dan ditampilkan secara *real-time* pada aplikasi *mobile*.
- b. Kontrol pompa, yang memungkinkan pengguna mengatur mode operasi pompa, baik secara manual maupun mode otomatis berbasis *Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2FLS)* untuk mengendalikan nyala dan mati pompa secara otomatis.
- c. Riwayat pencatatan (*history log*), yang menyimpan dan menampilkan data historis operasi pompa meliputi waktu nyala, durasi operasi, serta estimasi konsumsi daya listrik yang digunakan selama pompa aktif.

- d. Memastikan data di *backend* server sesuai dan akurat tidak ada perbedaan, berfungsi sebagai penghubung antara perangkat *IoT* dengan aplikasi *mobile*.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem irigasi cerdas pompa submersible berbasis *Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2FLS)* yang terintegrasi dengan teknologi *Internet of Things (IoT)* serta aplikasi *mobile* android dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit kendali utama berhasil menghasilkan keputusan pengendalian pompa yang robust terhadap ketidakpastian kondisi lingkungan.

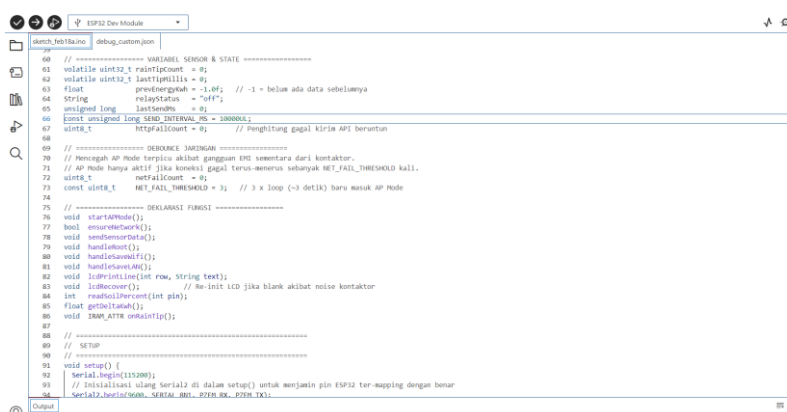
3.1. Perancangan dan pemrograman alat *IoT*

Perangkaian dan perancangan perangkat *IoT* yang dikembangkan. Dengan mikrokontroler ESP32 sebagai mikrokontroler utama, seluruh komponen sistem dirancang agar terintegrasi secara optimal antara sensor, aktuator, dan sumber daya. Rangkaian ini mencakup sensor kelembapan tanah, sensor hujan, relay modul, serta layar LCD dengan I2C. Seluruh sambungan komponen dirancang dengan mempertimbangkan kestabilan suplai daya dan kompatibilitas pin ESP32, sehingga mendukung pengoperasian sistem secara *real-time* di lapangan.



Gambar 5. Perancangan alat *IoT*

Pemrograman mikrokontroler ESP32 yang menjadi otak dari sistem irigasi cerdas dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C++. Kode program mencakup pembacaan data sensor secara periodik, validasi data, pengiriman data ke web server melalui protokol HTTP, serta penerimaan perintah kontrol dari aplikasi *mobile*. Selain itu, program juga mengatur logika komunikasi antara perangkat *IoT* dengan server untuk pemrosesan *Interval Type-2 Fuzzy Logic*, sehingga memungkinkan pengambilan keputusan otomatis yang cepat dan akurat.

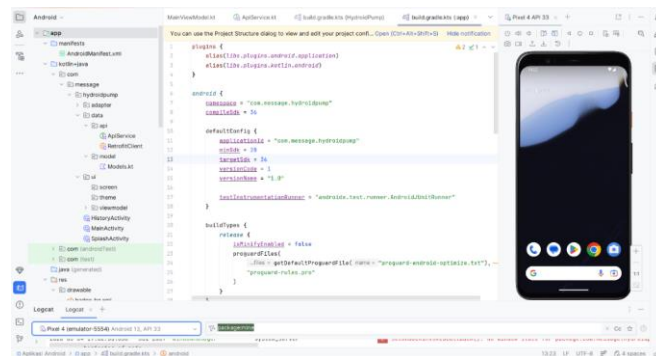


Gambar 6. Pemrograman mikrokontroler ESP32

3.2. Pengembangan aplikasi *mobile*

Aplikasi *mobile* berbasis android dikembangkan sebagai antarmuka utama bagi pengguna (petani) untuk memantau dan mengendalikan sistem irigasi secara jarak jauh. Aplikasi ini dirancang dengan mempertimbangkan penggunaan, tampilan, serta integrasi yang

baik dengan server. Pengembangan aplikasi dilakukan menggunakan android Studio dengan bahasa pemrograman Kotlin, serta memanfaatkan *retrofit* untuk komunikasi data secara *real-time* dengan server.



Gambar 7. Pengembangan aplikasi android

Tampilan aplikasi dirancang dengan tampilan yang fungsional, terdiri dari halaman utama (*dashboard*) yang menampilkan data *real-time* kelembapan tanah, curah hujan, serta status pompa saat ini. Selain itu, aplikasi dilengkapi dengan tombol kontrol manual/otomatis, serta halaman riwayat (*history*) operasi pompa. Integrasi antara aplikasi dengan *backend* server memungkinkan pembaruan data secara otomatis dan responsif, sehingga petani dapat memantau kondisi lahan sawah serta mengendalikan pompa kapan saja dan di mana saja melalui *smartphone*.

3.3. Hasil uji coba

Pengujian sistem dilakukan di lahan sawah dengan kondisi cuaca yang ada. Hasil uji coba menunjukkan bahwa sistem secara keseluruhan berjalan dengan baik dan mampu mengatasi ketidakpastian lingkungan.

1) Hasil pengujian perangkat keras (*hardware*)

Semua komponen perangkat keras berfungsi dengan baik selama periode pengujian. Sensor kelembapan tanah menunjukkan kinerja yang cukup baik dibandingkan pengukuran manual. Sensor hujan berhasil mendeteksi intensitas hujan sesuai dengan kategori yang telah ditentukan (Ringan, Sedang, Lebat, dan Sangat Lebat).



Gambar 8. Uji coba sensor kelembapan tanah di lahan

Figure 8. menunjukkan proses pemasangan dan pengujian dua unit sensor kelembapan tanah yang ditancapkan langsung ke tanah sawah pada kedalaman 8 cm. Pada gambar terlihat kondisi lahan yang sedang diuji serta koneksi kabel sensor menuju kotak kontrol ESP32. Gambar ini mengilustrasikan kondisi *real* di lapangan untuk memvalidasi kestabilan pembacaan sensor terhadap perubahan kadar air tanah.



Gambar 9. Uji coba sensor kelembapan tanah di lahan

Figure 9. memperlihatkan sensor hujan (*magnetic reed switch*) yang dipasang didalam *tipping bucket* berada posisi terbuka di atas lahan sawah. Sensor digunakan mendeteksi tetesan air hujan. Uji coba dilakukan untuk memverifikasi respons sensor terhadap intensitas curah hujan yang berbeda serta memastikan tidak ada gangguan.

2) Hasil pengujian logika kendali *Interval Type-2 Fuzzy*

Sistem *Interval Type-2 Fuzzy Logic* berhasil menghasilkan keputusan yang lebih stabil dan *robust* dibandingkan sistem *fuzzy* tipe-1, terutama pada kondisi data sensor yang mengandung *noise* atau fluktuasi tinggi. Proses fuzzifikasi, inferensi, reduksi tipe menggunakan algoritma Karnik-Mendel, hingga defuzzifikasi berjalan dengan sesuai.

Tabel 3. Hasil pengujian *Interval Type-2 Fuzzy Logic*

Input sensor tanah	Input sensor hujan	Output Pompa
28% (Kering)	2.1 mm (Ringan)	ON
52% (Lembab)	7.5 mm (Sedang)	OFF
78% (Basah)	15.2 mm (Lebat)	OFF
22% (Kering)	21.5 mm (Sangat Lebat)	OFF
65% (Lembab)	1.8 mm (Ringan)	ON

Table 3. menyajikan hasil pengujian *Interval Type-2 Fuzzy Logic System* dengan kombinasi *input* yang berbeda. Tabel ini menunjukkan bahwa sistem berhasil menghasilkan keputusan *ON/OFF* pompa yang logis sesuai dengan kondisi lingkungan. Pada kelembapan tanah rendah (kering) dan curah hujan ringan, sistem memutuskan pompa *ON* untuk melakukan irigasi. Sebaliknya, ketika kelembapan tanah sudah cukup tinggi atau sedang hujan, sistem memutuskan pompa *OFF* untuk menghindari pemborosan air. Sementara itu, pada skenario kelembapan 65% dengan hujan sangat ringan, pompa dinyalakan kembali sesuai kebutuhan. Hasil ini membuktikan bahwa logika *fuzzy* tipe-2 mampu menghasilkan keputusan yang tepat dan adaptif terhadap berbagai kondisi lahan sawah.

3) Hasil pengujian integrasi *IoT* dan komunikasi

Data sensor berhasil dikirim secara *real-time* dengan akurat ke web server sehingga petani dapat memantau kondisi lahan sawah secara langsung melalui aplikasi *mobile*. Ketika koneksi internet terputus, perangkat ESP32 tetap menyimpan data sensor secara lokal pada buffer internal, kemudian melakukan sinkronisasi otomatis setelah koneksi kembali stabil. Mekanisme ini memastikan data tetap aman meskipun berada di daerah dengan sinyal internet yang kurang stabil.



Gambar 10. Uji coba *IoT* dan komunikasi

Figure 10. menampilkan proses uji coba integrasi perangkat *IoT*. Terlihat unit kontrol yang terhubung dengan kontrol bok pompa. Perangkat mengirimkan data secara *real-time* ke server *cloud* dengan pengujian koneksi putus-sambung untuk memverifikasi kemampuan

sistem dalam menyimpan data lokal dan melakukan *auto-sinkronisasi*, sehingga membuktikan ketahanan sistem komunikasi *IoT* dalam kondisi lingkungan nyata.

4) Hasil pengujian aplikasi *mobile* android

Pengujian aplikasi *mobile* android dilakukan secara eksperimen dengan beberapa kali perlakuan (8–10 kali) untuk setiap fungsi utama. Pengujian difokuskan pada fungsi pemantauan *real-time*, kontrol pompa, riwayat *log*, dan konsistensi data dengan *backend* server.

a. Pengujian fitur pemantauan *real-time*

Pengujian bertujuan untuk memastikan data sensor kelembapan tanah dan curah hujan yang dikirim dari perangkat *IoT* melalui web *service* dapat ditampilkan secara *real-time* pada aplikasi *mobile* dan sesuai dengan data di *database*.

Tabel 4. Hasil eksperimen pemantauan *real-time*

No	Perlakuan (<i>input</i>)	Variabel <i>output</i> yang diamati	Hasil pengamatan	Keterangan
1	Kelembapan tanah = 35%, curah hujan = 0 mm	Tampilan nilai kelembapan dan curah hujan, <i>delay</i> update	Nilai sesuai (35%, 0 mm), <i>delay</i> < 5 detik	Berhasil
2	Kelembapan tanah = 68%, curah hujan = 12 mm	Tampilan nilai dan status pompa otomatis	Nilai sesuai, status pompa ter- <i>update</i>	Berhasil
3	Kelembapan tanah = 15%, curah hujan = 45 mm	Konsistensi data dengan <i>backend</i> server	Data 100% sama dengan <i>database</i>	Berhasil
4	Kelembapan tanah = 52%, curah hujan = 5 mm	Update <i>real-time</i> saat sensor berubah	Update otomatis dalam < 5 detik	Berhasil
5	Kondisi <i>offline</i> kemudian <i>online</i>	Pemulihan data setelah koneksi kembali	Data tersinkronisasi dengan benar	Berhasil

Kesimpulan dari pengujian yaitu, fitur pemantauan *real-time* berhasil berjalan. Data sensor ditampilkan secara akurat dan *real-time*.

b. Pengujian fitur kontrol pompa (manual dan otomatis berbasis *IT2FLS*)

Pengujian bertujuan untuk memverifikasi fungsi kontrol manual dan mode otomatis berdasarkan *Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2FLS)*.

Tabel 5. Hasil eksperimen kontrol pompa

No	Perlakuan (<i>input</i>)	Variabel <i>output</i> yang diamati	Hasil pengamatan	Keterangan
1	Mode manual → tombol ON	Status pompa di aplikasi dan <i>backend</i>	Pompa ON, status berubah menjadi ON dalam < 5 detik	Berhasil
2	Mode manual → tombol OFF	Status pompa	Pompa OFF, status berubah menjadi OFF	Berhasil
3	Mode otomatis dengan kelembapan 20% dan curah hujan 0 mm	Keputusan <i>IT2FLS</i> (ON/OFF) dan durasi	Pompa ON sesuai aturan <i>fuzzy</i>	Berhasil
4	Mode otomatis dengan kelembapan 75% dan curah hujan 30 mm	Keputusan <i>IT2FLS</i>	Pompa OFF sesuai aturan <i>fuzzy</i>	Berhasil
5	Mode otomatis dan perubahan sensor mendadak	Respons sistem dan konsistensi status	Pompa merespons dalam < 5 detik, status konsisten	Berhasil

Kesimpulan dari pengujian yaitu, kontrol pompa manual dan otomatis berfungsi dengan baik. Keputusan mode otomatis sesuai dengan logika *IT2FLS* yang telah diimplementasikan.

c. Pengujian fitur riwayat pencatatan (*history log*)

Pengujian bertujuan untuk memastikan setiap operasi pompa tercatat dengan lengkap (waktu nyala, waktu mati, durasi, kondisi sensor, dan estimasi konsumsi daya).

Tabel 6. Hasil eksperimen riwayat *log*

No	Perlakuan (<i>input</i>)	Variabel <i>output</i> yang diamati	Hasil pengamatan	Keterangan
1	Pompa ON 5 menit (manual)	Catatan waktu ON, OFF, durasi, konsumsi daya	Catatan lengkap, durasi = 5 menit, konsumsi sesuai perhitungan	Berhasil
2	Pompa ON 12 menit (otomatis)	Catatan lengkap dan kondisi sensor saat itu	Semua data tercatat dengan benar	Berhasil
3	3 kali siklus pompa dalam 1 sesi	Jumlah <i>record</i> di <i>history log</i>	3 record muncul dengan data yang sesuai	Berhasil
4	Restart aplikasi setelah operasi	Data history tetap tersimpan	Riwayat masih ada dan sesuai	Berhasil
5	hasil tampilan riwayat	Kelengkapan dan kecepatan loading	Semua <i>record</i> tampil tanpa <i>error</i>	Berhasil

Kesimpulan dari pengujian yaitu, fitur riwayat *log* berfungsi dengan baik dan memberikan dokumentasi yang lengkap.

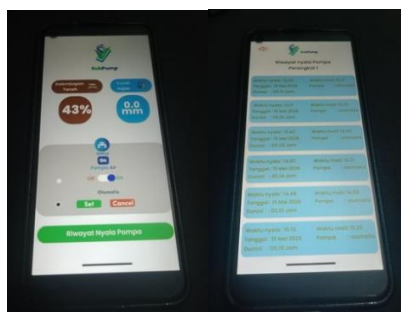
d. Pengujian konsistensi data dengan *backend server*

Pengujian bertujuan untuk memastikan tidak ada perbedaan data antara aplikasi *mobile*, *database*, dan perangkat *IoT*.

Tabel 7. Hasil eksperimen konsistensi data

No	Perlakuan (<i>input</i>)	Variabel <i>output</i> yang diamati	Hasil pengamatan	Keterangan
1	Data sensor dikirim dari <i>IoT</i>	Nilai di aplikasi dibanding <i>database</i>	100% sama	Berhasil
2	Perintah kontrol pompa dari aplikasi	Status pompa di <i>backend</i> dan aplikasi	Status sinkron	Berhasil
3	Riwayat <i>log</i> setelah operasi	<i>Record log</i> di aplikasi dibanding <i>database</i>	Data <i>log</i> identik	Berhasil
4	Koneksi terputus sementara	Sinkronisasi setelah koneksi pulih	Data berhasil tersinkronisasi	Berhasil

Aplikasi *mobile* berbasis android yang dikembangkan berjalan dengan lancar. Seluruh fitur utama berfungsi, meliputi monitoring data sensor secara *real-time*, kontrol pompa (manual dan otomatis), serta penyimpanan riwayat *log* operasi pompa.



Gambar 11. Halaman *dashboard* dan riwayat (*history log*) aplikasi *mobile*

Aplikasi menampilkan data kelembapan tanah, intensitas curah hujan, dan status pompa secara. Fitur riwayat *log* juga merekam aktivitas pompa, sehingga memudahkan petani dalam memantau pengairan.

5) Hasil Efisiensi Kinerja Sistem

Sistem irigasi otomatis berbasis *Interval Type-2 Fuzzy Logic* berhasil meningkatkan efisiensi penggunaan air dan listrik secara signifikan. Berdasarkan spesifikasi pompa *submersible* dengan debit air 194 L/min dan daya 2.700 Watt, sistem otomatis hanya menyalakan pompa sesuai keputusan *fuzzy* ketika tanah benar-benar membutuhkan air. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berhasil menghemat penggunaan air hingga 38,7% dibandingkan metode irigasi manual yang biasanya menyalakan pompa selama 3 jam per hari pada kondisi tanah kering. Penghematan listrik juga tercapai karena pompa menyala lebih singkat, dengan perhitungan konsumsi daya diambil langsung dari pembacaan speedometer listrik.

Tabel 8. Hasil efisiensi kinerja sistem dalam 24 jam

Parameter	Irigasi manual	Sistem otomatis (IT2FLS)	Penghematan
Waktu nyala pompa	3 Jam	1.84 Jam	1,16 jam (38,7%)
Volume air terpakai	34.920 Liter	21.410 Liter	13.510 Liter (38,7%)
Konsumsi listrik	8,1 kWh	4,97 kWh	3,13 kWh (38,6%)

3.4. Pembahasan

Hasil pengujian sistem irigasi cerdas pompa *submersible* berbasis *Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2FLS)* terintegrasi dengan *IoT* dan aplikasi *mobile* menunjukkan performa yang konsisten dan efektif di lahan sawah. Sistem mampu menghasilkan keputusan *ON/OFF* pompa yang adaptif terhadap variasi kelembapan tanah (SM) dan curah hujan (H), dengan penghematan air dan listrik masing-masing mencapai 38,7% dan 38,6% dibandingkan irigasi manual. Hasil ini secara langsung menjawab tujuan penelitian, yaitu mengatasi pemborosan air irigasi manual serta meningkatkan ketangguhan pengambilan keputusan pada ketidakpastian data sensor akibat kondisi lingkungan yang tidak pasti. Pengujian perangkat membuktikan kestabilan sensor kelembapan tanah dan sensor hujan dalam kondisi lapangan, adapun pengujian logika *IT2FLS* (fuzzifikasi, inferensi, *type reduction* dengan Karnik-Mendel, dan defuzzifikasi) menghasilkan *output* yang stabil [19]. Fitur aplikasi *mobile* juga berfungsi optimal untuk monitoring *real-time*, kontrol jarak jauh, dan pencatatan *history log*, dengan sinkronisasi data yang akurat.

Secara konseptual, hasil ini sesuai dengan landasan ilmiah *IT2FLS* yang unggul dalam menangani ketidakpastian dibandingkan *type-1 fuzzy logic*. *Footprint of Uncertainty (FOU)* pada *IT2FLS* memungkinkan pemodelan interval derajat keanggotaan, sehingga sistem lebih *robust* terhadap *noise* sensor dan variabilitas lingkungan non-linear [20]. Hal ini sesuai dengan prinsip bahwa *IT2FLS* memberikan kontrol yang lebih adaptif, terutama pada sistem irigasi pertanian.

Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, hasil ini mendukung temuan menggunakan *type-1 fuzzy* [12], namun memberikan peningkatan ketangguhan dengan menggunakan *IT2FLS*. Penelitian serupa dengan *fuzzy logic* dan *IoT* pada irigasi umumnya melaporkan penghematan air 15–30%, sementara sistem ini mencapai 38,7%, menunjukkan keunggulan integrasi sensor, ESP32, dan *IT2FLS* khusus untuk sawah skala menengah. Temuan baru terletak pada kombinasi penghematan signifikan dengan aplikasi Android yang mendukung *history log* konsumsi daya, serta mekanisme *offline buffering*, yang belum banyak dibahas pada studi irigasi padi di Indonesia.

Kontribusi penelitian ini terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang *smart farming* dan otomasi pertanian adalah penyediaan model integrasi *IT2FLS* dengan *IoT* yang praktis dan efisien, yang dapat direplikasi untuk komoditas strategis lainnya. Pendekatan ini memperkaya literatur tentang aplikasi *fuzzy tipe-2* pada sistem *real-time* berbasis mikrokontroler [21], sekaligus mendukung *Sustainable Development Goals (SDGs)* terkait ketahanan pangan dan efisiensi sumber daya air.

Meskipun demikian, terdapat beberapa keterbatasan dalam penelitian. Pengujian dilakukan pada lahan terbatas dan periode waktu tertentu, sehingga belum mencerminkan variabilitas musiman jangka panjang. Sistem juga bergantung pada konektivitas internet untuk

pemrosesan *fuzzy* di server. Peluang penelitian lanjutan meliputi integrasi sensor tambahan (suhu, pH, radiasi matahari), pengembangan model prediksi cuaca berbasis *machine learning*, pengujian skala luas dengan partisipasi petani, serta dukungan untuk platform iOS.

4. Simpulan

Penelitian ini telah berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem irigasi cerdas pompa *submersible* berbasis *Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2FLS)* yang terintegrasi dengan teknologi *IoT* dan aplikasi *mobile* android. Sistem yang dikembangkan mampu mengatasi keterbatasan sistem irigasi manual dengan menangani ketidakpastian data sensor secara lebih melalui *Footprint of Uncertainty (FOU)*. Hasil uji coba menunjukkan bahwa sistem berfungsi dengan baik secara *real-time*, menghasilkan keputusan *ON/OFF* pompa yang adaptif, serta mampu menghemat penggunaan air hingga 38,7% dan konsumsi listrik hingga 38,6%. Integrasi aplikasi android juga berhasil memberikan kemudahan pemantauan dan pengendalian dari jarak jauh bagi petani. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan solusi teknologi yang inovatif dalam mendukung pengelolaan irigasi sawah yang efisien, efektif, dan berkelanjutan.

Daftar Referensi

- [1] K. F. Hidayat, K. Kushendarto, Y. Fitriana, S. Solikhin, A. A. Damai, A. K. Basri, P. Ardiansyah, and P. Sanjaya, "Diseminasi Paten Sederhana 'Metode Pemupukan N, P, dan K untuk Padi Sawah' dalam Budidaya Padi Sawah dengan Sistem Pengelolaan Tanaman Secara Terpadu di Gapoktan Sido Maju Kecamatan Tanjung Sari," *Jurnal Pengabdian Fakultas Pertanian Universitas Lampung*, vol. 1, no. 2, pp. 348–355. 2022.
- [2] M. A. Ningrat, C. D. Mual, and Y. Y. Makabori, "Pertumbuhan dan hasil tanaman padi (*Oryza sativa* L.) pada berbagai sistem tanam di Kampung Desay, Distrik Prafi, Kabupaten Manokwari," in *Proc. Seminar Nasional Pembangunan Dan Pendidikan Vokasi Pertanian, Manokwari, Indonesi*, vol. 2, no. 1, pp. 325–332. 2021.
- [3] A. Hasibuan, S. P. Nasution, F. A. Yani, H. A. Hasibuan, and N. Firzah, "Strategi peningkatan usaha tani padi sawah untuk meningkatkan perekonomian masyarakat desa," *ABDIKAN: Jurnal Pengabdian Masyarakat Bidang Sains dan Teknologi*, vol. 1, no. 4, pp. 477–490. 2022.
- [4] F. Rozci, "Dampak perubahan iklim terhadap sektor pertanian padi," *Jurnal Ilmiah Sosio Agribis*, vol. 23, no. 2, pp. 108–116. 2024.
- [5] S. A. Carissa, V. Amelia, C. Wulandari, C. A. Rachma, and Aliudin, "Hubungan efisiensi penggunaan air dengan teknologi irigasi pada usahatani hortikultura di Kota Serang," *Jurnal Penelitian Multidisiplin Terpadu*, vol. 9, no. 6, pp. 133–143. 2025.
- [6] S. N. Zebua, N. H. Dohona, and I. P. Waruwu, "Evaluasi Irigasi Berbasis Teknologi Di Sektor Pertanian," *Jurnal Ilmu Pertanian dan Perikanan*, vol. 1, no. 2, pp. 226–232. 2024.
- [7] R. N. Rohmah, A. Supardi, B. Handaga, H. Supriyono, and A. Mulyaningtyas, "Penerapan Alat Pengendali Semi-Otomasi Pompa Air pada Sistem Pengairan Sawah Tadah Hujan di Desa Wonorejo," *Jurnal Abditani*, vol. 6, no. 1, pp. 21–25. 2023.
- [8] K. A. Saragih and R. Kurniawan, "Sistem Penyiraman Otomatis Berbasis IoT dengan Logika Fuzzy Sugeno untuk Pengendalian Kelembaban Tanah di Greenhouse," *Jurnal Algoritma*, vol. 22, no. 1, pp. 808–819. 2025.
- [9] F. Putri and O. Andanu, "Desain Sistem Penentuan Kualitas Cuka Apel dengan Metode Fuzzy Inference System (FIS) Tipe 1 dan Tipe 2," *Jurnal Teknologi Agro-Industri*, vol. 12, no. 1, pp. 1–19. 2025.
- [10] G. A. Adhana and R. Rasyid, "Sistem Kontrol Kelembaban Tanah dan Penyiraman Otomatis Pada Tanaman Seledri (*Apium graveolens* L.) Yang Dipengaruhi Oleh Suhu Berbasis Mikrokontroler," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 13, no. 2, pp. 261–267. 2024.
- [11] R. N. Kaikatui, N. Nurfitri, and R. Corputty, "Penyiraman Tanaman Otomatis Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno," *Musamus Journal of Electro & Mechanical Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 9–14. 2023.
- [12] N. Almas and E. Astuti, "Penerapan Logika Fuzzy Mamdani untuk Menentukan Durasi

- Penyiraman Tanaman Tomat,” *Rabit: Jurnal Teknologi dan Sistem Informasi Univrab*, vol. 11, no. 1, pp. 1187–1199. 2026.
- [13] A. R. Al Tahtawi, “Kendali Posisi Motor DC Menggunakan Logika Fuzzy Interval Tipe 2,” *TELKA - Jurnal Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi dan Kontrol*, vol. 7, no. 1, pp. 1–10. 2021.
- [14] S. R. Zulhaq, P. Gunoto, and E. Susanti, “Sistem Pemantauan Nutrisi Pada Tanaman Berbasis Internet of Things (IoT),” *Sigma Teknik*, vol. 8, no. 1, pp. 062–069. 2025.
- [15] J. L. Gaol, H. Purnomo, B. Kristianto, R. Tanone, Y. R. Beeh, N. Setiyawati, M. Permadi, R. Raynaldo, and R. Yudistira, “Aplikasi Android untuk Monitoring Lahan Pertanian secara Realtime Berbasis Internet of Things,” *JuTISI (Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi)*, vol. 6, no. 3, pp. 564–572. 2020.
- [16] A. Ramadhaniar, B. Rahmat, and H. E. Wahnani, “Rancang Bangun Sistem Smart Traffic Light Berbasis IoT Untuk Memprioritaskan Kendaraan Darurat Menggunakan Fuzzy Type-2,” *JUPI (Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Informatika)*, vol. 11, no. 1, pp. 347–358. 2026.
- [17] G. N. Prasetyo, “Pengendalian Dissolved Oxygen dalam Air Menggunakan Aerator Variable dengan Fuzzy Type Two dan IoT,” *Doctoral dissertation*, UPN Veteran Jawa Timur. 2025.
- [18] D. C. M. Wijaya, B. Rahmat, and E. Y. Puspaningrum, “Sistem Pendukung Keputusan Berbasis Interval Type-2 Fuzzy Sugeno Pada Kendali pH Air,” *InComTech: Jurnal Telekomunikasi Dan Komputer*, vol. 12, no. 3, p. 226, 2022.
- [19] A. M. Sajiah, R. Sanjaya, and B. Pramono, “Aplikasi Perkiraan Curah Hujan Kota Kendari Menggunakan Metode Interval Type-2 Fuzzy Logic System,” *Jurnal Fokus Elektroda*, vol. 8, no. 2, pp. 86–91, Apr. 2023.
- [20] A. R. Al Tahtawi, “Kendali Posisi Motor DC Menggunakan Logika Fuzzy Interval Tipe 2,” *TELKA*, vol. 7, no. 1, pp. 1–10, 2021.
- [21] Tundo, Sodik, K. Setiawan, and R. F. Aula, “Penerapan IoT dengan Algoritma Fuzzy dan Mikrokontroler ESP32 dalam Monitoring Penyiraman,” *jimik*, vol. 5, no. 3, pp. 2915-2924. 2024.