

Perancangan Arsitektur Sistem Irigasi Berbasis IoT dengan Mekanisme Failsafe untuk Kondisi Koneksi Tidak Stabil

Mufti Azim^{1*)}, Muhammad Reza Zurisabil²

^{1,2} Jurusan Teknik Elektro, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jl. HS.Ronggo Waluyo, Karawang, Indonesia

*Penulis Korespondensi, e-mail: 2210631160094@student.unsika.ac.id

Received: 26/06/2026

Revised: 30/07/2026

Accepted: 30/07/2026

ABSTRAK

Pengelolaan irigasi efisien merupakan tantangan utama pertanian di pedesaan Indonesia, terutama wilayah dengan infrastruktur jaringan belum memadai. Sistem irigasi *IoT* yang ada umumnya dirancang dengan asumsi koneksi jaringan stabil, sehingga rentan gagal beroperasi ketika koneksi terputus. Penelitian ini bertujuan merancang arsitektur sistem irigasi berbasis *IoT* dengan mekanisme *failsafe* untuk menangani koneksi tidak stabil. Perancangan meliputi lapisan penginderaan berbasis sensor kelembaban tanah dan suhu, lapisan komunikasi adaptif berbasis *LoRa* dan *MQTT* dengan *fallback* lokal, serta lapisan keputusan berbasis logika *fuzzy* yang beroperasi mandiri tanpa server pusat. Simulasi dilakukan menggunakan *Cisco Packet Tracer* untuk arsitektur jaringan dan *MATLAB Fuzzy Logic Toolbox* untuk logika keputusan. Hasil simulasi menunjukkan pada kondisi normal, paket data mencapai *server cloud* dengan latensi 0,002 detik. Pada kondisi jalur eksternal terputus, paket tetap mencapai *gateway* lokal sebelum gagal diteruskan ke *cloud*, sedangkan pada kondisi *node* sumber kehilangan konektivitas total, paket gagal sejak hop pertama. Sistem pulih dengan latensi 0,003 detik setelah tautan tersambung kembali. Mesin *fuzzy* menghasilkan keputusan bukaan katup yang konsisten terhadap kondisi kelembaban dan suhu. Arsitektur ini diharapkan menjadi referensi sistem *IoT* pertanian andal untuk wilayah pedesaan berjangkauan terbatas.

Kata Kunci: *Failsafe*, irigasi, *IoT*, koneksi tidak stabil, logika *fuzzy*

ABSTRACT

Efficient irrigation management is a major challenge in Indonesia's rural agriculture, particularly in areas with inadequate network infrastructure. Existing IoT-based irrigation systems are generally designed assuming stable connectivity, making them prone to failure when connections are interrupted. This study designs a smart irrigation architecture based on IoT equipped with a failsafe mechanism for unstable connectivity. The design comprises a sensing layer using soil moisture and temperature sensors, an adaptive communication layer based on LoRa and MQTT with local fallback, and a decision layer based on fuzzy logic operating independently without a central server. Simulations were conducted using Cisco Packet Tracer for network architecture and MATLAB Fuzzy Logic Toolbox for decision logic. Results show that under normal conditions, packets reached the cloud server with 0.002 seconds latency. When the external link was disconnected, packets still reached the local gateway before failing toward the cloud, whereas when the source node lost connectivity entirely, packets failed from the first hop. The system recovered with 0.003 seconds latency once links reconnected. The fuzzy engine produced consistent valve-opening decisions relative to moisture and temperature conditions. This architecture is expected to serve as a reference for reliable agricultural IoT systems in rural areas with limited networks.

Keywords: *failsafe*, fuzzy logic, *IoT*, irrigation, unstable connectivity



1. PENDAHULUAN

Sektor pertanian merupakan tulang punggung perekonomian sebagian besar wilayah pedesaan di Indonesia, dengan luas lahan sawah nasional mencapai lebih dari 7,2 juta hektar. Salah satu faktor penentu keberhasilan produksi pertanian adalah pengelolaan irigasi yang tepat waktu dan tepat jumlah. Namun demikian, efisiensi penggunaan air irigasi di Indonesia masih tergolong rendah, yaitu berkisar pada angka 45%, yang sebagian besar disebabkan oleh pengelolaan irigasi yang masih dilakukan secara manual dan bergantung pada perkiraan petani. Perkembangan teknologi *Internet of Things (IoT)* membuka peluang besar untuk mengotomatisasi proses irigasi melalui pemantauan kondisi lahan secara *real-time* menggunakan sensor kelembaban tanah, suhu udara, dan parameter lingkungan lainnya. Kesalahan dalam pengelolaan irigasi dapat menyebabkan hasil panen tidak maksimal, bahkan gagal panen, sehingga dibutuhkan sistem yang mampu memantau dan mengatur debit air secara otomatis sesuai kebutuhan tanaman [1].

Berbagai penelitian terkait sistem irigasi berbasis *IoT* telah banyak dikembangkan. Penelitian pemantauan kondisi persawahan menggunakan protokol *LoRa* telah diterapkan untuk memantau parameter lingkungan secara *real-time*, meskipun masih terbatas pada fungsi pemantauan tanpa kemampuan pengambilan keputusan otomatis [2]. Kajian literatur sistematis terhadap penerapan *wireless sensor network* pada *smart agriculture* juga menunjukkan bahwa optimasi *clustering* berbasis *fuzzy logic* dapat meningkatkan efisiensi energi jaringan sensor, namun penerapannya pada konteks pengambilan keputusan irigasi masih jarang dibahas secara khusus [3]. Sebagian besar penelitian tersebut (*state of the art*) dirancang dengan asumsi bahwa koneksi jaringan, baik *WiFi* maupun seluler, tersedia secara stabil sepanjang waktu. Asumsi ini tidak relevan untuk sebagian besar lahan pertanian di pedesaan Indonesia, mengingat masih terdapat ribuan desa yang termasuk kategori wilayah dengan sinyal lemah atau *blank spot*. Ketika koneksi jaringan pada sistem-sistem tersebut terputus, perangkat *IoT* umumnya berhenti mengambil keputusan dan menunggu hingga koneksi pulih, sehingga berpotensi menyebabkan keterlambatan irigasi yang merugikan petani. Penelitian mengenai mekanisme *failsafe*, yaitu kemampuan sistem untuk tetap mengambil keputusan secara mandiri ketika koneksi ke *server* pusat terputus, masih sangat terbatas dibahas pada konteks *IoT* pertanian di Indonesia. Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang arsitektur sistem irigasi cerdas berbasis *IoT* yang dilengkapi mekanisme *failsafe*, sehingga sistem tetap dapat beroperasi secara otonom pada kondisi koneksi jaringan tidak stabil maupun terputus total. Perancangan dalam penelitian ini mencakup arsitektur jaringan sensor, protokol komunikasi adaptif, dan logika pengambilan keputusan lokal berbasis logika *fuzzy*, yang kemudian disimulasikan untuk mengevaluasi kelayakan rancangan tersebut [4]. Hasil perancangan diharapkan menjadi referensi bagi pengembangan sistem *IoT* pertanian yang andal pada wilayah dengan keterbatasan infrastruktur jaringan.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa optimasi jaringan sensor nirkabel menggunakan algoritma metaheuristik mampu meningkatkan *Packet Delivery Ratio* hingga 96,1% dan memperpanjang masa hidup jaringan, yang relevan dengan kebutuhan keandalan komunikasi pada wilayah dengan infrastruktur terbatas [4]. Logika *fuzzy* juga telah terbukti efektif digunakan sebagai metode pengambilan keputusan pada sistem penyiraman tanaman, baik menggunakan pendekatan Sugeno yang mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 25% [5], maupun pendekatan Mamdani yang menunjukkan respons adaptif terhadap perubahan suhu dan kelembaban [6], dibandingkan kendali berbasis ambang batas tetap. Kombinasi antara komunikasi adaptif dan logika keputusan lokal inilah yang menjadi dasar perancangan arsitektur *failsafe* pada penelitian ini.

2. METODE PENELITIAN

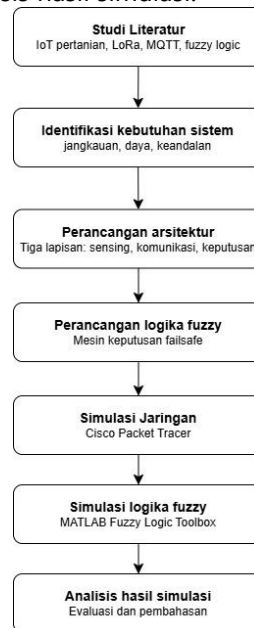
2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian perancangan (*design research*) yang tidak melibatkan pembuatan purwarupa fisik, melainkan berfokus pada perancangan arsitektur sistem beserta simulasinya. Tahapan penelitian dilakukan secara berurutan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, dimulai dari studi

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



literatur, identifikasi kebutuhan sistem, perancangan arsitektur, perancangan logika keputusan, simulasi jaringan, simulasi logika *fuzzy*, hingga analisis hasil simulasi.



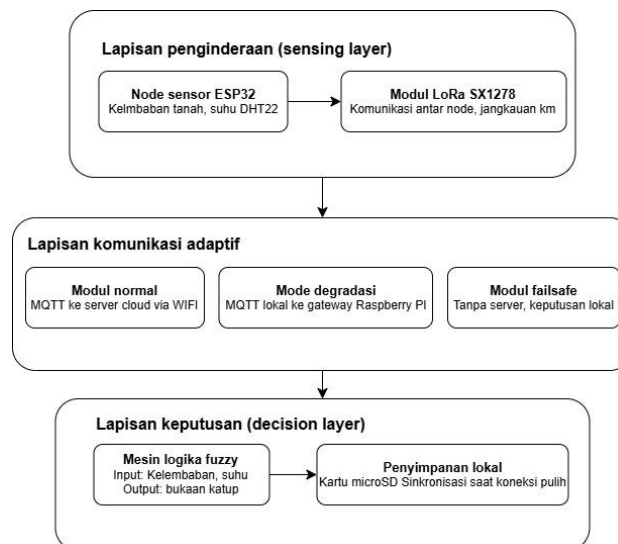
Gambar 1: Diagram alur tahapan penelitian

Tahap pertama dilakukan studi literatur terhadap penelitian terdahulu mengenai sistem *IoT* pertanian, protokol komunikasi *LoRa* dan *MQTT*, serta penerapan logika *fuzzy* pada sistem kendali. Tahap kedua adalah identifikasi kebutuhan sistem berdasarkan karakteristik wilayah pedesaan dengan koneksi jaringan tidak stabil, mencakup kebutuhan jangkauan komunikasi, konsumsi daya, dan keandalan operasi. Tahap ketiga adalah perancangan arsitektur sistem yang terdiri dari tiga lapisan utama. Tahap keempat adalah perancangan logika keputusan *failsafe* menggunakan logika *fuzzy*. Tahap kelima dan keenam adalah simulasi menggunakan *Cisco Packet Tracer* untuk arsitektur jaringan dan *MATLAB Fuzzy Logic Toolbox* untuk logika keputusan. Tahap terakhir adalah analisis terhadap hasil simulasi yang diperoleh.

2.2 Arsitektur Sistem yang dirancang

Arsitektur sistem yang dirancang terdiri dari tiga lapisan, yaitu lapisan penginderaan (*sensing layer*), lapisan komunikasi adaptif (*adaptive communication layer*), dan lapisan keputusan (*decision layer*), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.





Gambar 2: Arsitektur tiga lapisan sistem irigasi dengan mekanisme *failsafe*

Lapisan penginderaan terdiri dari *node* sensor berbasis mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan sensor kelembaban tanah dan sensor suhu udara tipe DHT22. Setiap *node* sensor ditempatkan pada titik-titik representatif di lahan pertanian dan saling berkomunikasi menggunakan modul LoRa SX1278 yang memiliki jangkauan transmisi hingga beberapa kilometer tanpa memerlukan infrastruktur jaringan seluler.

Lapisan komunikasi adaptif dirancang dengan tiga mode operasi yang menyesuaikan kondisi konektivitas. Pada mode normal, data sensor dikirimkan melalui protokol *MQTT* ke *server cloud* menggunakan koneksi *WiFi* atau seluler. Pada mode degradasi, ketika kualitas koneksi menurun, sistem beralih mengirimkan data secara lokal ke *gateway* berbasis Raspberry Pi menggunakan *MQTT* lokal. Pada mode *failsafe*, ketika koneksi terputus sepenuhnya, sistem tidak lagi bergantung pada *server* maupun *gateway*, melainkan mengambil keputusan secara mandiri pada masing-masing *node*.

Lapisan keputusan merupakan inti dari mekanisme *failsafe* yang diusulkan. Pada lapisan ini, setiap *node* sensor menjalankan mesin keputusan berbasis logika *fuzzy* yang menerima masukan berupa nilai kelembaban tanah dan suhu udara, kemudian menghasilkan keluaran berupa persentase bukaan katup irigasi. Data hasil keputusan dicatat ke dalam kartu *microSD* lokal dan akan disinkronkan ke *server* pusat secara otomatis ketika koneksi jaringan pulih kembali. Pendekatan virtualisasi berbasis kontainer pada perangkat *gateway IoT* telah terbukti tidak menurunkan kinerja perangkat seperti Raspberry Pi, sehingga mendukung kemudahan implementasi arsitektur *gateway* lokal pada penelitian ini [7].

2.3 Perancangan Logika Keputusan Fuzzy

Logika keputusan pada lapisan *failsafe* dirancang menggunakan metode Mamdani *Fuzzy Inference System* dengan dua variabel masukan, yaitu kelembaban tanah dan suhu udara, serta satu variabel keluaran berupa bukaan katup irigasi. Fungsi keanggotaan (*membership function*) untuk setiap variabel ditunjukkan pada Tabel I.

TABEL I : FUNGSI KEANGGOTAAN VARIABEL *FUZZY*

Variabel	Label	Tipe	Rentang
Kelembaban tanah (%)	Kering	Trapesium	[0, 0, 20,35]
	Lembab	Segitiga	[25, 45, 65]
	Basah	Trapesium	[55, 75, 100, 100]



Suhu udara (°C)	Dingin	Trapesium	[15, 15, 22, 27]
	Normal	Segitiga	[24, 29, 34]
	Panas	Trapesium	[31, 36, 40,40]
Bukaan katup (%)	Tutup	Trapesium	[0, 0, 10, 25]
	Sedang	Segitiga	[15, 45, 75]
	Buka Penuh	Trapesium	[65, 85, 100, 100]

Basis aturan (*rule base*) disusun berdasarkan sembilan kombinasi logis antara kelembaban tanah dan suhu udara, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel II. Sebagai contoh, ketika kelembaban tanah berada pada kondisi kering dan suhu udara panas, sistem akan menghasilkan keputusan bukaan katup penuh agar kebutuhan air tanaman terpenuhi secara maksimal.

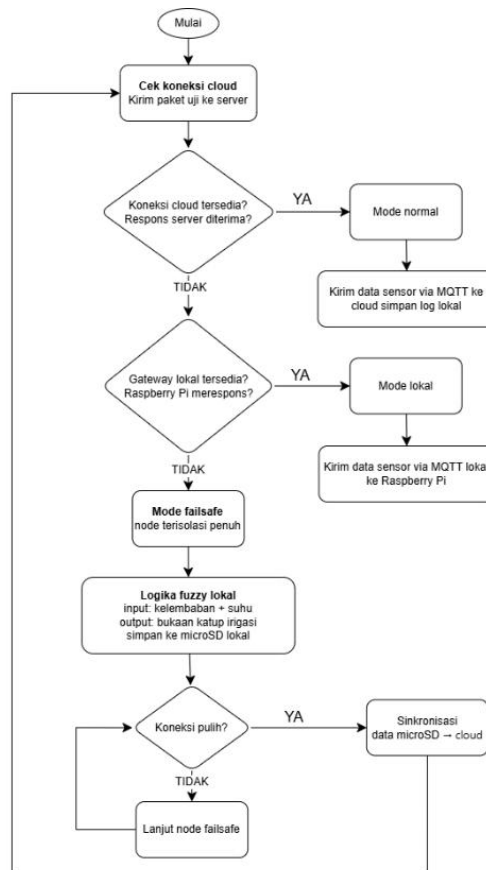
TABEL II: BASIS ATURAN *FUZZY*

No	Kelembaban Tanah	Suhu Udara	Bukaan Katup
1	Kering	Dingin	Sedang
2	Kering	Normal	Buka Penuh
3	Kering	Panas	Buka Penuh
4	Lembab	Dingin	Tutup
5	Lembab	Normal	Sedang
6	Lembab	Panas	Sedang
7	Basah	Dingin	Tutup
8	Basah	Normal	Tutup
9	Basah	Panas	Tutup

Proses defuzzifikasi pada penelitian ini menggunakan metode centroid, yang menghitung titik pusat massa dari area hasil agregasi seluruh aturan yang aktif, sehingga menghasilkan nilai keluaran yang bersifat kontinu dan proporsional terhadap kondisi masukan.

2.4 Skenario dan Parameter Simulasi





Gambar 3: Flowchart perpindahan mode

Mekanisme perpindahan mode komunikasi sistem dirancang secara bertahap berdasarkan ketersediaan koneksi jaringan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Sistem pertama-tama memeriksa ketersediaan koneksi cloud. Apabila koneksi tersedia, sistem beroperasi pada mode normal dengan mengirimkan data sensor melalui protokol MQTT ke server cloud. Apabila koneksi cloud tidak tersedia namun gateway lokal berbasis Raspberry Pi masih merespons, sistem beralih ke mode lokal. Apabila keduanya tidak tersedia, sistem sepenuhnya beralih ke mode failsafe dengan menjalankan logika fuzzy secara mandiri pada masing-masing node. Ketika koneksi pulih, data yang tersimpan di kartu microSD lokal disinkronkan secara otomatis ke server cloud sebelum sistem kembali ke pengecekan awal

Simulasi arsitektur jaringan dilakukan menggunakan perangkat lunak *Cisco Packet Tracer* dengan menerapkan empat skenario kondisi konektivitas, yang direalisasikan dengan memutus dan menyambungkan kembali tautan (*link*) tertentu pada topologi jaringan. Keempat skenario tersebut ditunjukkan pada Tabel III.

TABEL III : SKENARIO SIMULASI KONDISI JARINGAN

Skenario	Kondisi yang Direalisasikan	Tujuan Pengujian	Yang Diukur
S1	Seluruh tautan dalam keadaan tersambung (kondisi normal).	Menguji jalur pengiriman data dari node sensor menuju server cloud pada kondisi ideal.	Status keberhasilan paket dan latensi.
S2	Tautan antara Wireless Router dan server cloud diputus.	Menguji perilaku sistem ketika jalur menuju server cloud tidak tersedia, namun jaringan lokal tetap utuh.	Status keberhasilan paket dan titik kegagalan pada jalur pengiriman.
S3	Tautan nirkabel antara node sensor dan Wireless Router diputus.	Menguji perilaku sistem ketika node sumber kehilangan konektivitas secara menyeluruh	Status keberhasilan paket dan titik kegagalan pada jalur pengiriman.



Skenario	Kondisi yang Direalisasikan	Tujuan Pengujian	Yang Diukur
S4	Seluruh tautan yang sebelumnya diputus disambungkan kembali.	Menguji kemampuan pemulihan sistem setelah gangguan konektivitas teratasi	Status keberhasilan paket dan latensi setelah pemulihan.

Pengujian pada setiap skenario dilakukan dengan mengirimkan paket data uji (*Internet Control Message Protocol/ICMP*) dari *node* sensor menuju *server cloud* menggunakan fitur Add Simple PDU pada mode Simulasi di *Cisco Packet Tracer*. Status keberhasilan pengiriman paket diamati melalui PDU List, sedangkan rincian waktu dan jalur perjalanan paket dicatat melalui *Event List*. Latensi dihitung sebagai selisih waktu antara saat paket pertama kali dikirim dari *node* sensor dan saat paket terakhir tercatat sampai pada tujuan.

Selain simulasi jaringan, dilakukan pula simulasi logika *fuzzy* menggunakan *MATLAB Fuzzy Logic Toolbox* untuk menguji konsistensi keputusan bukaan katup terhadap berbagai kombinasi nilai kelembaban tanah dan suhu udara. Parameter evaluasi yang digunakan meliputi status keberhasilan pengiriman paket, latensi pengiriman pada kondisi normal dan pasca-pemulihan, titik kegagalan pada jalur pengiriman saat terjadi gangguan konektivitas, serta akurasi keputusan irigasi yang dihasilkan oleh mesin logika *fuzzy* pada mode *failsafe*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil perancangan arsitektur sistem irigasi beserta hasil simulasinya, yang terdiri dari hasil simulasi arsitektur jaringan menggunakan *Cisco Packet Tracer* dan hasil simulasi logika keputusan *fuzzy* menggunakan *MATLAB Fuzzy Logic Toolbox*.

3.1 Hasil Perancangan Arsitektur Jaringan

Hasil perancangan menunjukkan bahwa arsitektur tiga lapisan yang diusulkan dapat merepresentasikan tiga mode operasi sesuai kondisi konektivitas, yaitu mode normal, mode lokal, dan mode *failsafe*. Pengujian dilakukan dengan mengirimkan paket data uji dari *node* sensor menuju *server cloud* pada empat skenario kondisi jaringan, yang direalisasikan dengan memutus dan menyambungkan kembali tautan tertentu pada topologi. Setiap skenario diuji sebanyak lima kali pengulangan untuk memperoleh nilai *packet delivery ratio* (PDR) dan parameter jaringan lain yang lebih representatif. Hasil pengujian keempat skenario tersebut ditunjukkan pada Tabel IV.

TABEL IV : RINGKASAN HASIL SIMULASI SKENARIO JARINGAN

Parameter	Rata-rata 5 kali pengujian per skenario			
	S1 (Normal)	S2 (Cloud terputus)	S3 (Node terisolasi)	S4 (Pemulihan)
Jumlah paket dikirim	5	5	5	5
Jumlah paket berhasil	5	0	0	5
Jumlah paket gagal	0	5	5	0
Packet Delivery Ratio (PDR)	100%	0%	0%	100%
Latensi rata-rata	0,002s	-	-	0,003s
Hop berhasil	2	1	0	2
Titik kegagalan	-	Router0 → CloudServer0	MCU0	-

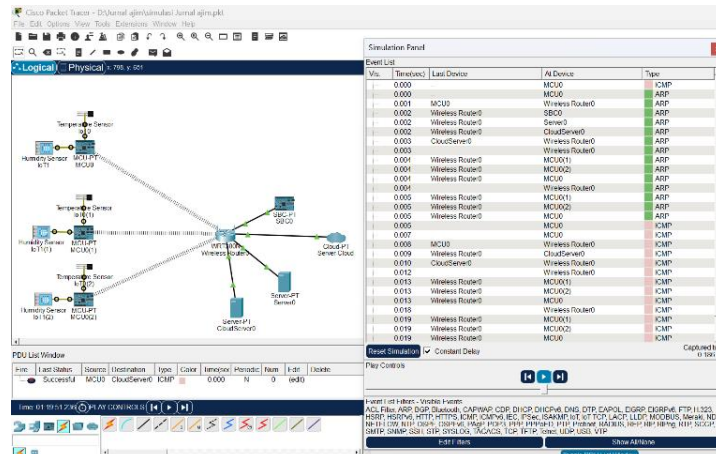
Berdasarkan Tabel IV, pengujian yang dilakukan sebanyak lima kali pada setiap skenario menunjukkan hasil yang konsisten dan tidak bervariasi antar percobaan. Pada skenario S1 dan S4, seluruh lima paket berhasil terkirim dengan PDR 100% dan jumlah hop berhasil sebanyak 2, yang membuktikan bahwa kedua kondisi tersebut memiliki jalur komunikasi yang sepenuhnya berfungsi. Latensi rata-rata pada S4 (0,003 detik) sedikit lebih tinggi dibandingkan S1 (0,002 detik), namun perbedaan tersebut relatif kecil dan tidak mengindikasikan adanya akumulasi beban jaringan akibat gangguan konektivitas sebelumnya.

Pada skenario S2, kelima paket yang dikirim seluruhnya gagal mencapai tujuan (PDR 0%), dengan titik kegagalan konsisten terjadi pada jalur Router0 menuju CloudServer0. Data pada kondisi ini tertahan di gateway lokal, yang menunjukkan bahwa *node* sensor masih memiliki konektivitas ke jaringan lokal meskipun



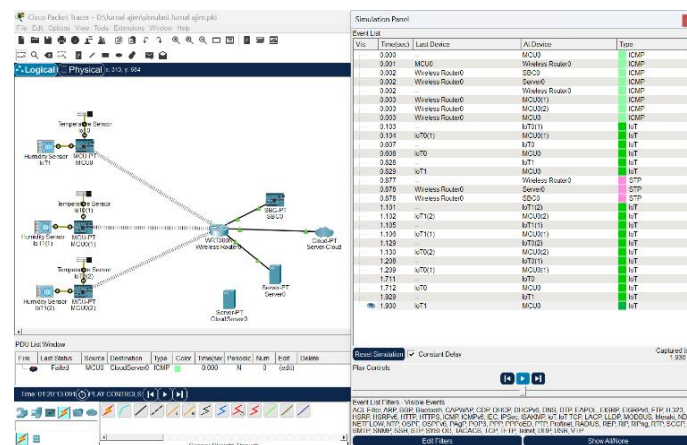
jalur eksternal menuju *cloud* terputus. Pada skenario S3, kelima paket juga seluruhnya gagal (PDR 0%) dengan jumlah *hop* berhasil 0, yang mengkonfirmasi bahwa kegagalan terjadi sejak *node* sumber, sebelum paket sempat mencapai perangkat lain manapun pada jaringan. Data pada kondisi ini tertahan secara lokal pada kartu microSD di *node* MCU0.

Konsistensi hasil pada kelima kali pengujian di setiap skenario memperkuat validitas temuan bahwa arsitektur tiga mode yang dirancang menghasilkan perilaku jaringan yang dapat diprediksi sesuai kondisi konektivitas yang disimulasikan.



Gambar 4: Topologi dan Event List skenario 1 (kondisi normal)

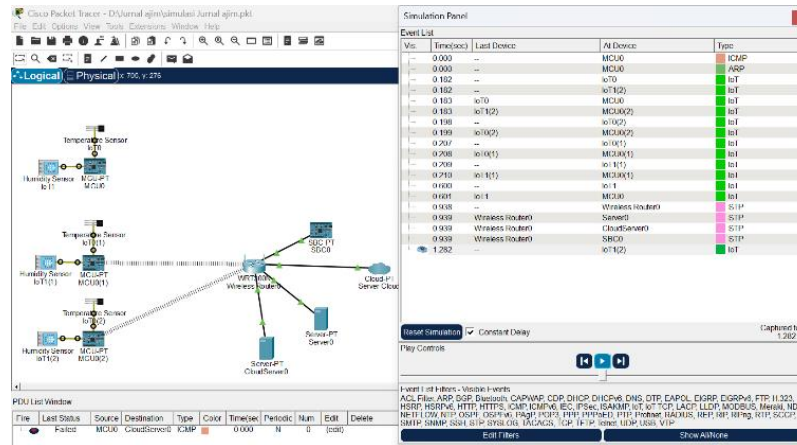
Pada simulasi skenario S1 (seluruh tautan tersambung), node sensor berhasil mengirimkan data ke *server cloud* melalui protokol *MQTT* dengan latensi 0,002 detik dan tanpa kehilangan paket data.



Gambar 5: Topologi dan Event List skenario 2 (jalur ke cloud terputus)

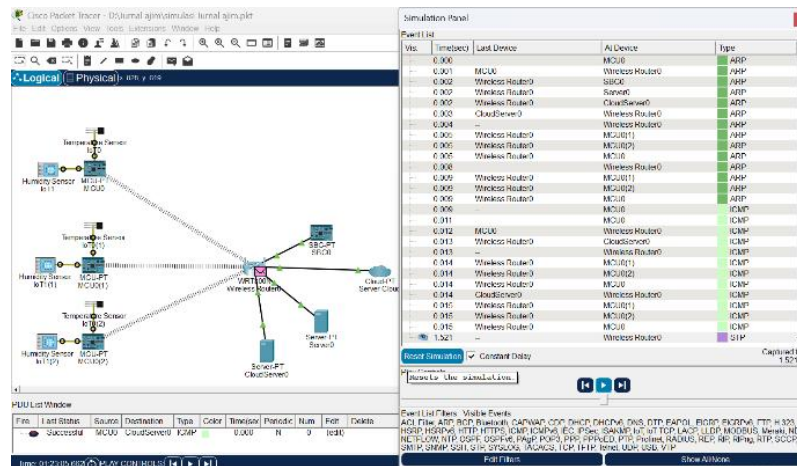
Pada skenario S2 (tautan menuju server cloud diputus), paket data tetap berhasil mencapai *gateway* lokal berbasis *Wireless Router* melalui proses *Address Resolution Protocol* (ARP) dan pengiriman paket awal, sebelum akhirnya gagal diteruskan ke *server cloud*, sehingga status pengiriman tercatat sebagai *failed* pada hop terakhir. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kegagalan terjadi pada jalur menuju *cloud*, bukan pada keseluruhan jaringan lokal.





Gambar 6: Topologi dan Event List skenario 3 (node sumber terisolasi)

Pada skenario S3 (tautan nirkabel antara *node* sensor dan *Wireless Router* diputus), *node* sensor kehilangan konektivitas secara menyeluruh dan paket data gagal sejak hop pertama, tidak pernah mencapai *gateway* lokal sama sekali. Perbedaan pola kegagalan antara S2 dan S3 ini menunjukkan karakteristik gangguan yang berbeda secara jelas: gangguan pada jalur eksternal menuju *cloud* (S2) dibandingkan gangguan pada konektivitas *node* itu sendiri (S3).



Gambar 7: Topologi dan Event List skenario 4 (koneksi pulih kembali)

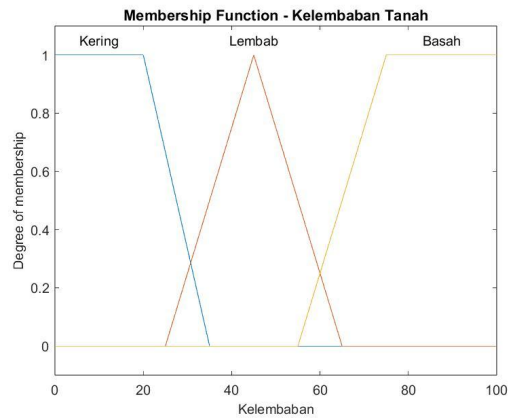
Pada skenario S4 (seluruh tautan yang sebelumnya diputus disambungkan kembali), sistem berhasil pulih dan mengirimkan paket data ke *server cloud* dengan latensi 0,003 detik, bahkan lebih tinggi dibandingkan kondisi normal awal pada S1, yang menunjukkan tidak ada akumulasi beban jaringan akibat gangguan sebelumnya.

Pola kegagalan yang berbeda pada S2 dan S3 menjadi dasar penting bagi mekanisme *failsafe* yang dirancang. Pada kondisi S2, *node* masih dapat berkomunikasi dengan *gateway* lokal sehingga keputusan dapat diteruskan melalui jalur lokal. Pada kondisi S3, *node* harus sepenuhnya mengandalkan logika keputusan mandiri tanpa bantuan perangkat lain.

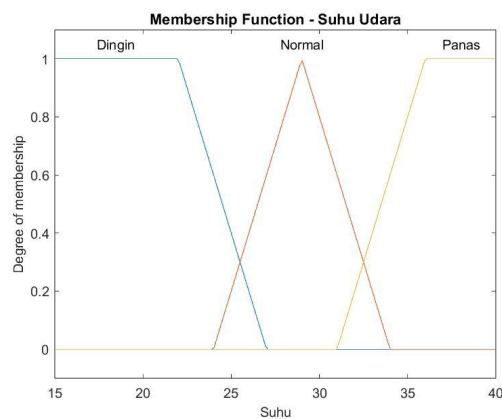
3.2 Hasil Simulasi Logika Keputusan Fuzzy

Simulasi logika *fuzzy* dilakukan menggunakan *MATLAB Fuzzy Logic Toolbox* dengan menerapkan fungsi keanggotaan dan basis aturan yang telah dirancang pada bagian metode penelitian. Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10 menunjukkan bentuk fungsi keanggotaan untuk variabel kelembaban tanah, suhu udara, dan bukaan katup irigasi.

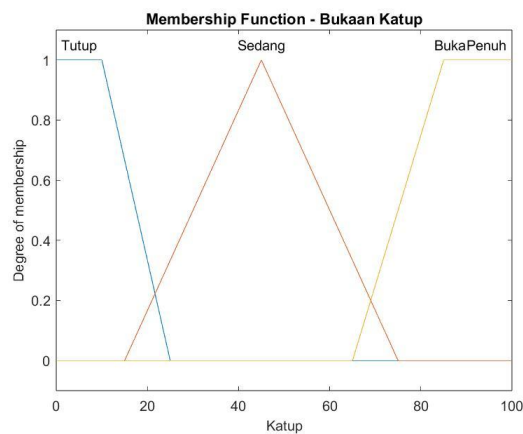




Gambar 8: Fungsi keanggotaan variabel kelembaban tanah

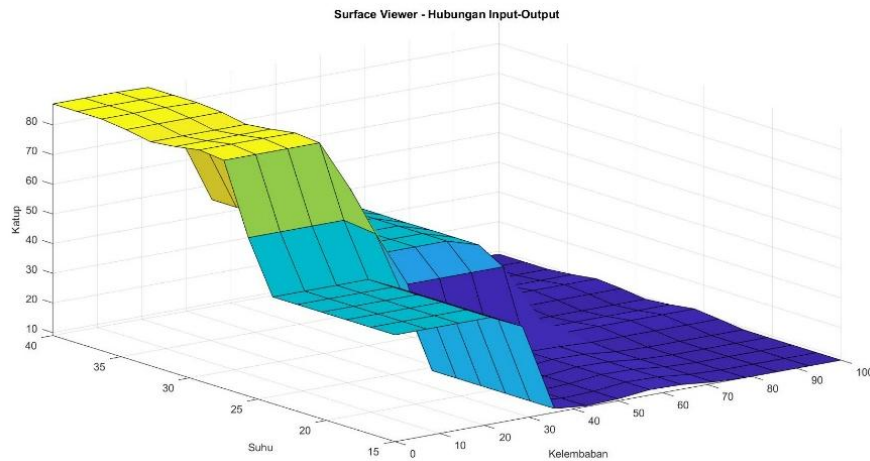


Gambar 9: Fungsi keanggotaan variabel suhu udara



Gambar 10: Fungsi keanggotaan variabel bukaan katup irigasi

Gambar 11 menunjukkan permukaan keputusan (*surface viewer*) yang merepresentasikan hubungan *non-linear* antara kelembaban tanah, suhu udara, dan bukaan katup irigasi. Permukaan tersebut memperlihatkan bahwa bukaan katup menurun secara konsisten seiring meningkatnya kelembaban tanah, dan meningkat seiring naiknya suhu udara pada kondisi tanah yang sama, sesuai dengan basis aturan yang telah dirancang.



Gambar 11: Permukaan Keputusan (surface viewer) hubungan input-output system fuzzy

Pengujian kuantitatif dilakukan dengan memberikan tujuh kombinasi nilai kelembaban tanah dan suhu udara sebagai masukan sistem. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel V.

TABEL V : HASIL PENGUJIAN SISTEM *FUZZY* UNTUK BERBAGAI KONDISI MASUKAN

No	Kelembaban (%)	Suhu (°C)	Bukaan Katup (%)	Kategori
1	10	20	45,00	Sedang
2	30	25	47,32	Sedang
3	50	30	45,00	Sedang
4	70	22	9,70	Tutup
5	90	35	9,56	Tutup
6	15	38	87,10	Buka Penuh
7	40	18	9,70	Tutup

Berdasarkan Tabel V, sistem *fuzzy logic* menunjukkan konsistensi keputusan terhadap kondisi masukan yang diberikan. Pada kondisi kelembaban rendah (15%) yang disertai suhu tinggi (38°C), sistem menghasilkan keputusan bukaan katup sebesar 87,10%, yang termasuk kategori buka penuh dan sesuai dengan kebutuhan irigasi pada kondisi kekeringan. Sebaliknya, pada kondisi kelembaban tinggi seperti 70% dan 90%, sistem secara konsisten menghasilkan keputusan bukaan katup di bawah 10%, yang termasuk kategori tutup, sehingga mencegah kelebihan air pada lahan yang sudah cukup basah. Pada kondisi kelembaban sedang dengan suhu bervariasi, sistem menghasilkan keputusan pada kisaran 45-47%, yang termasuk kategori sedang.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa logika *fuzzy* yang dirancang dapat menjadi mesin keputusan yang andal pada mode *failsafe*, karena mampu menghasilkan keputusan irigasi yang proporsional terhadap kondisi aktual tanpa memerlukan keterlibatan server pusat. Konsistensi hasil pada seluruh kombinasi pengujian juga mengindikasikan bahwa basis aturan yang dirancang sudah mencakup seluruh kemungkinan kombinasi kondisi kelembaban dan suhu yang relevan dengan kebutuhan irigasi lahan pertanian.

3.3 Pembahasan

Hasil perancangan dan simulasi pada penelitian ini menunjukkan bahwa penggabungan antara arsitektur jaringan adaptif dan mesin keputusan berbasis logika *fuzzy* mampu menjawab permasalahan utama yang diidentifikasi pada bagian pendahuluan, yaitu kerentanan sistem *IoT* irigasi konvensional terhadap kondisi koneksi tidak stabil. Penelitian terdahulu umumnya hanya berfokus pada satu protokol komunikasi tunggal untuk fungsi pemantauan [2], atau pada optimasi transmisi data multimedia tanpa



mekanisme *failsafe* ketika koneksi terputus [8]. Arsitektur yang diusulkan pada penelitian ini menggabungkan tiga mode komunikasi sekaligus sehingga sistem tetap dapat beroperasi pada berbagai kondisi jaringan.

Temuan penting dari hasil pengujian adalah perbedaan karakteristik kegagalan antara skenario S2 dan S3. Pada S2, ketika hanya tautan menuju *server cloud* yang terputus, paket data tetap berhasil mencapai *gateway* lokal (*Wireless Router*) sebelum akhirnya gagal diteruskan ke *cloud*. Pada S3, ketika *node* sumber kehilangan konektivitas nirkabel terhadap *gateway*, paket data gagal sejak hop pertama dan tidak pernah meninggalkan *node* tersebut. Perbedaan ini secara langsung relevan dengan rancangan mekanisme *failsafe* yang diusulkan. Pada kondisi S2, *node* sensor sebenarnya masih dapat berkomunikasi dengan *gateway* lokal melalui Raspberry Pi, sehingga keputusan irigasi berpotensi tetap diteruskan melalui jalur lokal sebelum disinkronkan ke *cloud* saat koneksi pulih. Pada kondisi S3, *node* sensor benar-benar terisolasi, sehingga harus sepenuhnya mengandalkan logika keputusan mandiri berbasis *fuzzy* tanpa bantuan perangkat lain. Hasil pengujian ini memberikan bukti empiris bahwa arsitektur tiga mode (normal, lokal, dan *failsafe*) yang dirancang memang diperlukan, karena kedua jenis gangguan konektivitas tersebut membutuhkan respons sistem yang berbeda.

Penggunaan logika *fuzzy* sebagai mesin keputusan lokal memberikan keunggulan dibandingkan pendekatan kendali berbasis ambang batas tetap (*threshold*), karena mampu menangani transisi kondisi yang lebih halus antar kategori kelembaban dan suhu, sebagaimana terlihat pada hasil pengujian dengan nilai masukan di sekitar batas antar kategori. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan keunggulan logika *fuzzy* pada sistem penyiraman tanaman, baik menggunakan pendekatan Sugeno pada tanaman bayam [5] maupun pendekatan Mamdani pada tanaman tomat [6], yang sama-sama menunjukkan respons adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan dibandingkan kendali konvensional. Latensi pengiriman paket pada skenario S4 (0,003 detik) justru lebih tinggi dibandingkan kondisi normal awal pada S1 (0,002 detik). Kondisi ini mengindikasikan bahwa gangguan konektivitas yang disimulasikan tidak meninggalkan beban sisa pada jaringan setelah tautan tersambung kembali, sehingga proses pemulihan dapat dikatakan berlangsung bersih tanpa akumulasi antrian paket.

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena evaluasi dilakukan murni melalui simulasi tanpa pengujian pada perangkat keras maupun kondisi lapangan yang sesungguhnya. Simulasi jaringan pada *Cisco Packet Tracer* merepresentasikan kondisi gangguan konektivitas secara biner, yaitu tautan tersambung atau terputus sepenuhnya, sehingga belum dapat menggambarkan kondisi degradasi sinyal secara bertahap seperti yang umum terjadi pada komunikasi nirkabel di lapangan. Perlu dicatat pula bahwa *Cisco Packet Tracer* tidak merepresentasikan karakteristik fisik protokol LoRa secara penuh, sehingga faktor-faktor seperti jarak transmisi, topografi wilayah, interferensi sinyal, spesifikasi antena, dan konsumsi daya perangkat LoRa yang sesungguhnya tidak tercakup dalam simulasi ini. Hasil simulasi jaringan pada penelitian ini dengan demikian hanya berlaku sebagai pembuktian kelayakan arsitektur pada lingkungan simulasi, bukan sebagai representasi performa LoRa di kondisi lapangan. Faktor interferensi sinyal *LoRa* akibat kondisi geografis, variasi kualitas sensor di lapangan, dan ketahanan catu daya jangka panjang juga belum dapat dievaluasi pada tahap perancangan ini. Faktor-faktor tersebut perlu menjadi perhatian pada penelitian lanjutan yang melibatkan implementasi purwarupa fisik, mengingat efisiensi penggunaan air dan sumber daya merupakan indikator utama keberhasilan teknologi irigasi modern [9]. Pendekatan rancangan yang tetap dapat berfungsi pada kondisi jaringan terbatas atau tidak stabil, sebagaimana diterapkan pada sistem pemantauan lingkungan berbasis arsitektur *offline-first* [10], turut memperkuat relevansi mekanisme *failsafe* yang diusulkan pada penelitian ini.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang arsitektur sistem irigasi berbasis *IoT* dengan mekanisme *failsafe* yang terdiri dari tiga lapisan, yaitu lapisan penginderaan, lapisan komunikasi adaptif, dan lapisan keputusan berbasis logika *fuzzy*. Hasil simulasi menggunakan *Cisco Packet Tracer* menunjukkan bahwa arsitektur yang dirancang mampu merepresentasikan tiga mode operasi sesuai kondisi konektivitas. Pada kondisi normal (S1), paket data berhasil mencapai *server cloud* dengan latensi 0,002 detik. Pada kondisi tautan menuju cloud

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



terputus (S2), paket tetap berhasil mencapai *gateway* lokal sebelum gagal diteruskan ke *cloud*. Pada kondisi *node* sumber kehilangan konektivitas nirkabel (S3), paket gagal sejak hop pertama. Pada kondisi seluruh tautan tersambung kembali (S4), sistem pulih dengan latensi 0,003 detik. Perbedaan karakteristik kegagalan antara S2 dan S3 membuktikan bahwa kedua jenis gangguan tersebut memerlukan respons sistem yang berbeda, hal ini memperkuat justifikasi atas arsitektur tiga mode yang diusulkan.

Hasil simulasi logika *fuzzy* menggunakan *MATLAB Fuzzy Logic Toolbox* menunjukkan bahwa mesin keputusan lokal mampu menghasilkan keputusan bukaan katup irigasi yang konsisten dan proporsional terhadap kondisi kelembaban tanah dan suhu udara pada seluruh kombinasi pengujian yang dilakukan, dengan keputusan bukaan penuh pada kondisi kering-panas dan keputusan tertutup pada kondisi tanah yang sudah basah. Arsitektur yang diusulkan pada penelitian ini dapat menjadi referensi perancangan sistem *IoT* pertanian yang lebih andal untuk diterapkan pada wilayah pedesaan Indonesia dengan keterbatasan infrastruktur jaringan.

Penelitian lanjutan disarankan untuk mengimplementasikan arsitektur ini dalam bentuk purwarupa fisik guna mengevaluasi kinerja sistem pada kondisi lapangan yang sesungguhnya. Pengujian lanjutan tersebut mencakup kondisi degradasi sinyal secara bertahap, bukan hanya kondisi tersambung atau terputus, interferensi sinyal *LoRa*, ketahanan catu daya, dan akurasi sensor dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Kresna A, "Perancangan Sistem Irigasi Berbasis IoT pada Sawah Padi di Kecamatan Wangon, Kabupaten Banyumas," *LEDGER: Journal Informatic and Information Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 1–9, Oct. 2022, doi: 10.20895/ledger.v1i3.736.
- [2] Faizal Rahmansyah, Prihadi Murdiyat, and Rusda, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Pertanian Cerdas Berbasis LoRa Untuk Pemantauan Kondisi Persawahan Secara Real-Time," *PoliGrid*, vol. 6, no. 1, Jun. 2025, doi: 10.46964/poligrid.v6i1.62.
- [3] N. Ambarwati, "Analisis Implementasi Wireless Sensor Network (WSN) pada Smart Agriculture untuk Pemantauan Tanaman: Kajian Literatur," *Karapan Network Journal*, vol. I, No.I, 2025, doi: 10.20473/KNJ.II.286-307.
- [4] R. Djefzy Romadhoni and D. Wahyudi, "Mengoptimalkan Jaringan Sensor Nirkabel dalam Aplikasi Monitor Lingkungan dengan Teknologi IoT di Indonesia," *Karapan Network Journal*, vol. I, No.I, 2025, doi: 10.20473/KNJ.II.255-264.
- [5] K. A. Saragih and R. Kurniawan, "Sistem Penyiraman Otomatis Berbasis IoT dengan Logika Fuzzy Sugeno untuk Pengendalian Kelembaban Tanah di Greenhouse," *Algoritma*, vol. 22, 2025, doi: 10.33364/algoritma/v.23-1.2327.
- [6] 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, Jan. 2026, doi: 10.36341/rabit.v11i1.7254.
- [7] M. Data, W. Yahya, and A. Kurniawan, "Implementasi Teknologi Virtualisasi Berbasis Kontainer untuk Perangkat Internet of Things pada Pertanian Presisi," *CYBERNETICS*, vol. 3, no. 01, pp. 1–7, May 2020.
- [8] I. K. A. W. Rahaja, G. W. P. Dana, I. G. W. Darma, and I. G. A. M. Y. Mahaputra, "Optimasi Pengiriman dan Rekonstruksi Data Visual pada Sistem Irigasi Otomatis Berbasis IoT menggunakan MQTT dan FFmpeg," *Jurnalresistor*, vol. 8, pp. 133–142, Dec. 2025, [Online]. Available: <https://s.id/jurnalresistor>
- [9] M. R. R. Hasibuan, "Evaluasi Efisiensi Penggunaan Air dalam Pertanian Berbasis Teknologi Irigasi Modern," 2023.
- [10] M. S. Abdurrohman, "Pengembangan Front-END Sistem Rover Drone Otonom Berbasis PWA Menggunakan React. Js untuk Pemantauan Lingkungan Perkebunan Sawit," 2025.

