 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

Sistem Deteksi Dini Banjir berbasis *Internet of Things* dan *Fuzzy Logic* Terintegrasi Telegram Bot untuk Mitigasi Bencana Perkotaan

Internet of Things and Fuzzy Logic-based Flood Early Warning System Integrated with a Telegram Bot for Urban Disaster Mitigation

[1]Muhamad Wisnu Alfiansyah*, [2]Istin Fitriana Aziza, [3]Zulkipli, [4]Nabila Wahyu Khairunnisa
[1,2,4]Program Studi Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Bumigora
[3]Pendidikan Teknologi Informasi, Fakultas Pendidikan, Universitas Bumigora
[1,2,3,4]Jl. Ismail Marzuki No.22, Cilinaya, Kec. Cakranegara, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia
*e-mail: wisnu@universitasbumigora.ac.id

(***received*:** 27 August 2026, ***revised*:** 21 September 2026, ***accepted*:** 22 September 2026)

Abstrak

Banjir membutuhkan pemantauan kondisi lingkungan yang mampu memberikan informasi secara cepat ketika terjadi perubahan tingkat risiko. Penelitian ini mengembangkan prototipe sistem deteksi dini risiko banjir berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan empat parameter masukan berupa jarak permukaan air, debit air, curah hujan, dan kecepatan angin. Data dari keempat sensor dibaca oleh Raspberry Pi 5 dan diproses menggunakan Fuzzy Mamdani untuk menghasilkan skor risiko pada rentang 0–100% yang diklasifikasikan ke dalam kondisi Aman, Waspada, Siaga, dan Bahaya. Hasil kalibrasi memperoleh *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 0,713% pada sensor ultrasonik, 1,043% pada anemometer, 4,185% pada *rain gauge*, dan 4,553% pada *flow sensor*. Pengujian Fuzzy Mamdani menggunakan 25 data uji yang terdiri atas data pembacaan prototipe dan skenario simulasi untuk memperluas variasi kombinasi masukan. Validasi implementasi terhadap sepuluh data menghasilkan MAPE sebesar 0,0233% antara perhitungan manual dan keluaran sistem tanpa adanya perbedaan kategori risiko. Nilai MAPE tersebut menunjukkan kesesuaian implementasi perhitungan Fuzzy Mamdani dan bukan merupakan ukuran akurasi dalam mendeteksi kejadian banjir sebenarnya. Hasil pengolahan dapat disimpan pada Firebase Realtime Database, dikirim melalui MQTT, serta disampaikan kepada pengguna melalui Telegram Bot dalam bentuk nilai sensor, skor risiko, dan kategori risiko. Hasil pengujian menunjukkan bahwa akuisisi data multi-sensor, pengolahan Fuzzy Mamdani, penyimpanan data, dan penyampaian informasi risiko telah terintegrasi dalam satu prototipe sistem deteksi dini risiko banjir. Pengujian lebih lanjut pada kondisi lapangan diperlukan untuk mengevaluasi kinerja sistem terhadap kejadian banjir aktual.
Kata kunci: deteksi dini banjir, *internet of things*, fuzzy mamdani, multi-sensor, telegram bot

Abstract

Flood events require environmental monitoring systems capable of rapidly providing information when risk levels change. This study develops an Internet of Things (IoT)-based prototype for early flood risk detection using four input parameters: water surface distance, water flow rate, rainfall, and wind speed. Data from the four sensors are collected by a Raspberry Pi 5 and processed using the Mamdani Fuzzy Logic method to generate a risk score ranging from 0% to 100%, which is classified into four risk levels: Safe, Caution, Alert, and Danger. Calibration results yielded Mean Absolute Percentage Error (MAPE) values of 0.713% for the ultrasonic sensor, 1.043% for the anemometer, 4.185% for the rain gauge, and 4.553% for the flow sensor. The Mamdani Fuzzy Logic method was evaluated using 25 test datasets, comprising prototype sensor readings and simulation scenarios designed to expand the range of input combinations. Validation of the system implementation using ten datasets produced a MAPE of 0.0233% between manual calculations and system outputs, with no discrepancies in risk classification. This MAPE value indicates the consistency of the Mamdani Fuzzy Logic implementation rather than its accuracy in detecting actual flood events. The processed results

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

can be stored in Firebase Realtime Database, transmitted via MQTT, and delivered to users through a Telegram Bot in the form of sensor readings, risk scores, and risk classifications. The test results demonstrate that multi-sensor data acquisition, Mamdani Fuzzy Logic processing, data storage, and risk information delivery have been successfully integrated into a single early flood risk detection prototype. Further field testing under real-world conditions is required to evaluate the system's performance during actual flood events.
Keywords: *flood early warning, Internet Of Things, mamdani fuzzy logic, multi-sensor, telegram bot*

1 Pendahuluan

Banjir merupakan salah satu bencana hidrometeorologi yang sering terjadi dan dapat menimbulkan dampak terhadap masyarakat, aktivitas ekonomi, serta infrastruktur. Di Indonesia, kejadian banjir masih menjadi bagian penting dalam profil bencana nasional sehingga diperlukan upaya mitigasi yang tidak hanya berorientasi pada penanganan setelah kejadian, tetapi juga pada pemantauan dan penyampaian informasi sebelum kondisi berkembang menjadi lebih berisiko[1]. Dalam konteks pengurangan risiko bencana, sistem peringatan dini (*early warning system*) memiliki peran penting dalam menyediakan informasi yang dapat mendukung kesiapsiagaan dan respons terhadap potensi bencana[2]. Perkembangan *Flood Early Warning System* (FEWS) juga menunjukkan pergeseran dari pendekatan konvensional menuju pemanfaatan teknologi pemantauan, pemodelan, dan pengolahan data untuk mendukung informasi peringatan yang lebih responsif[3]. Oleh karena itu, pemantauan perubahan kondisi lingkungan secara berkelanjutan menjadi salah satu kebutuhan dalam pengembangan sistem peringatan dini risiko banjir.

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan dilakukan secara berkelanjutan melalui sensor yang terhubung dengan perangkat komputasi dan jaringan komunikasi. Pada sistem peringatan dini banjir, berbagai parameter telah digunakan untuk merepresentasikan perubahan kondisi lingkungan, seperti ketinggian muka air, kecepatan atau debit aliran, dan curah hujan. [4] mengembangkan sistem berbasis IoT menggunakan sensor ultrasonik dan *flow sensor* dengan Fuzzy Sugeno, sedangkan [5] menggunakan parameter curah hujan, ketinggian air, dan aliran air dalam sistem peringatan dini berbasis IoT. [6] mengembangkan pendekatan dengan beberapa parameter lingkungan yang mencakup sensor ultrasonik, *rain gauge*, dan anemometer. Pada penelitian internasional, [7] mengembangkan sistem pemantauan dan peringatan banjir berbasis LoRaWAN dengan sensor ultrasonik untuk memantau perubahan tingkat air dan menyampaikan tingkat risiko secara *real-time*. Berbagai pengembangan tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan IoT dan sensor dapat mendukung akuisisi data lingkungan sebagai dasar penentuan kondisi risiko banjir.

Penggunaan beberapa parameter lingkungan memerlukan mekanisme pengambilan keputusan yang mampu mengolah perubahan nilai sensor secara bersamaan. Kondisi lingkungan tidak selalu dapat direpresentasikan melalui batas yang sepenuhnya tegas karena suatu nilai pengamatan dapat berada pada kondisi transisi antara beberapa tingkat risiko. Fuzzy Logic menjadi salah satu pendekatan yang digunakan dalam sistem peringatan dini banjir untuk merepresentasikan kondisi tersebut melalui fungsi keanggotaan dan aturan *IF–THEN*. [4] dan [5] menerapkan Fuzzy Sugeno dalam pengolahan parameter banjir, sedangkan [6] menggunakan Fuzzy Mamdani dengan beberapa parameter lingkungan. [8] juga mengembangkan sistem peringatan *flash flood* berbasis AIoT dengan beberapa variabel masukan fuzzy dan menggunakan penalaran logis serta pengetahuan terkait kondisi banjir dalam penyusunan aturan. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa Fuzzy Logic dapat digunakan untuk mengintegrasikan kondisi beberapa parameter lingkungan menjadi informasi tingkat risiko yang lebih mudah diinterpretasikan.

Selain akuisisi dan pengolahan data, penyampaian informasi kepada pengguna merupakan bagian penting dalam sistem peringatan dini. Berbagai platform komunikasi berbasis internet telah dimanfaatkan untuk menyampaikan hasil pemantauan dan kondisi risiko secara lebih cepat. [9] memanfaatkan Telegram Bot sebagai media pengiriman pesan peringatan pada sistem banjir berbasis IoT, sedangkan [10] mengintegrasikan pemantauan berbasis web dengan notifikasi Telegram. Pendekatan serupa juga dikembangkan oleh [11] melalui integrasi sistem IoT dengan Telegram Bot sebagai media notifikasi kondisi banjir. Pada perkembangan terbaru, [12] mengembangkan kerangka berbasis web-messaging yang memanfaatkan Telegram untuk mendiseminasikan informasi curah hujan dan risiko banjir perkotaan secara near-real-time. Hal tersebut menunjukkan bahwa platform

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

komunikasi digital dapat menjadi bagian dari alur sistem peringatan dini untuk menyampaikan hasil pemantauan dan informasi risiko kepada pengguna.

Berdasarkan penelitian terdahulu, sistem peringatan dini banjir telah dikembangkan melalui berbagai kombinasi sensor, metode Fuzzy Logic, teknologi IoT, layanan penyimpanan data, dan media penyampaian informasi. Namun, penelitian-penelitian tersebut menunjukkan konfigurasi yang berbeda dalam hal parameter lingkungan yang digunakan, metode pengambilan keputusan, bentuk keluaran risiko, serta mekanisme komunikasi dan penyampaian informasi. Beberapa penelitian menggunakan kombinasi ketinggian air dan aliran dengan Fuzzy Sugeno [4], sementara penelitian lainnya mengintegrasikan curah hujan, ketinggian air, dan aliran air [5], serta memasukkan parameter lingkungan tambahan seperti kecepatan angin [6]. Di sisi lain, pengembangan sistem berbasis IoT dan Telegram menunjukkan pentingnya integrasi antara proses pemantauan dan penyampaian informasi risiko kepada pengguna [12]. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan prototipe sistem deteksi dini risiko banjir yang mengintegrasikan empat parameter berupa jarak permukaan air, debit air, curah hujan, dan kecepatan angin menggunakan Fuzzy Mamdani pada Raspberry Pi 5. Sistem menghasilkan skor risiko pada rentang 0–100% yang diklasifikasikan menjadi kategori Aman, Waspada, Siaga, dan Bahaya, kemudian mengintegrasikan hasil pengolahan dengan MQTT, Firebase Realtime Database, dan Telegram Bot. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja pembacaan sensor, kesesuaian implementasi perhitungan Fuzzy Mamdani, serta keberhasilan integrasi penyimpanan, komunikasi, dan penyampaian informasi pada prototipe yang dikembangkan.

2 Tinjauan Literatur

Penelitian mengenai sistem pemantauan dan peringatan dini banjir berbasis *Internet of Things* (IoT) telah berkembang dengan memanfaatkan berbagai kombinasi sensor dan metode pengambilan keputusan. [4] mengembangkan sistem menggunakan sensor ultrasonik dan *flow sensor* yang diproses dengan Fuzzy Sugeno serta diintegrasikan dengan Telegram Bot, sedangkan [5] menggunakan parameter curah hujan, ketinggian air, dan *water flow* dengan Fuzzy Sugeno untuk menghasilkan kategori risiko banjir. Dalam konteks pengembangan di wilayah lokal, [13] melakukan analisis kebutuhan pengembangan prototipe mitigasi bencana banjir berbasis IoT di Desa Sedau sebagai dasar pemanfaatan teknologi untuk mendukung mitigasi banjir. Pada penelitian internasional, [8] mengembangkan sistem peringatan *flash flood* berbasis AIoT dengan mengintegrasikan beberapa parameter lingkungan dalam proses inferensi fuzzy. Sementara itu, [7] mengembangkan sistem pemantauan dan peringatan banjir berbasis LoRaWAN untuk memperoleh informasi perubahan muka air dan tingkat risiko. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengembangan sistem peringatan dini banjir telah bergerak menuju integrasi sensor, pengolahan data, dan komunikasi berbasis IoT.

Selain pemanfaatan IoT, penggunaan beberapa parameter lingkungan memerlukan metode pengambilan keputusan yang mampu mengolah perubahan nilai sensor secara bersamaan. Fuzzy Logic menjadi salah satu pendekatan yang digunakan karena dapat merepresentasikan kondisi lingkungan melalui fungsi keanggotaan dan aturan linguistik *IF–THEN*. [4] dan [5] menerapkan Fuzzy Sugeno untuk mengolah beberapa parameter banjir, sedangkan [6] menerapkan Fuzzy Mamdani dengan mengintegrasikan sensor ultrasonik, *rain gauge*, dan anemometer dalam sistem peringatan dini banjir. Penelitian tersebut menunjukkan penggunaan kecepatan angin sebagai salah satu parameter lingkungan pendukung bersama parameter lainnya. Di sisi lain, [14] berfokus pada pemantauan aliran air menggunakan *flow sensor* berbasis NodeMCU, sedangkan [15] mengembangkan pendekatan *sensor fusion* berbasis IoT dengan mengintegrasikan ketinggian air, kecepatan aliran, dan intensitas curah hujan. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa parameter dan metode pengambilan keputusan yang digunakan dapat disesuaikan dengan karakteristik sistem yang dikembangkan.

Penerapan Fuzzy Logic pada sistem peringatan banjir juga berkaitan dengan penyusunan fungsi keanggotaan dan *rule base* sebagai dasar proses inferensi. [8] menggunakan beberapa variabel lingkungan dalam sistem peringatan *flash flood* dan menyusun aturan fuzzy melalui penalaran logis serta pengetahuan yang berkaitan dengan kondisi banjir. Sementara itu, [16] menunjukkan bahwa penentuan fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy dapat menjadi semakin kompleks ketika jumlah data dan titik pengamatan meningkat, sehingga dikembangkan pendekatan pembelajaran untuk membantu pembentukan dan optimasi sistem fuzzy. Hal tersebut menunjukkan bahwa penyusunan fungsi

keanggotaan dan *rule base* merupakan bagian penting dalam penerapan Fuzzy Logic karena menentukan bagaimana kombinasi kondisi masukan diterjemahkan menjadi tingkat risiko.

Dari sisi penyampaian informasi, Telegram Bot telah digunakan sebagai media komunikasi pada beberapa sistem peringatan dini banjir. [9] menerapkan Telegram Bot pada sistem peringatan banjir berbasis IoT di Kecamatan Gunungsari, sedangkan [10] mengintegrasikan Telegram Bot dan web pada sistem deteksi dini berbasis NodeMCU. [11] juga memanfaatkan Telegram sebagai media penyampaian informasi kondisi banjir kepada pengguna. Pada penelitian yang lebih baru, Ponukumati dan Regonda (2026) mengembangkan kerangka *web-messaging* berbasis Telegram untuk mendiseminasikan informasi curah hujan dan risiko banjir perkotaan secara *near-real-time*. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa Telegram dapat digunakan sebagai bagian dari sistem untuk menyampaikan informasi hasil pemantauan kepada pengguna, sedangkan informasi yang dikirim tetap bergantung pada data sensor dan mekanisme pengambilan keputusan yang digunakan.

Tabel 1 Perbandingan penelitian terdahulu

Penelitian	Parameter	Metode	Teknologi/Komunikasi	Keluaran
[8]	Curah hujan, kecepatan air, muka air, kemiringan	Fuzzy Logic	AIoT	Tingkat peringatan
[4]	Muka air, aliran	Fuzzy Sugeno	IoT, Firebase/Telegram	Status banjir
[7]	Muka air	Tingkat risiko	LoRaWAN, IoT *platform*	Tingkat risiko banjir
[15]	Muka air, aliran, curah hujan	*Sensor fusion*/Fuzzy	IoT	Kondisi pemantauan
[6]	Muka air, curah hujan, kecepatan angin dan parameter lingkungan	Fuzzy Mamdani	LoRa/IoT	Kondisi peringatan
[5]	Curah hujan, muka air, *water flow*	Fuzzy Sugeno	IoT	Kategori risiko
[12]	Informasi hujan dan banjir	Kerangka diseminasi	Telegram	Informasi *near-real-time*
Penelitian ini	**Jarak permukaan air, debit air, curah hujan, kecepatan angin**	**Fuzzy Mamdani**	**Raspberry Pi 5, MQTT, Firebase, Telegram Bot**	**Skor risiko 0–100% dan Aman, Waspada, Siaga, Bahaya**

Berdasarkan perbandingan pada Tabel 1, penelitian terdahulu telah menggunakan berbagai kombinasi parameter, metode Fuzzy Logic, perangkat IoT, dan media komunikasi dalam pengembangan sistem peringatan dini banjir. Parameter muka air, debit atau kecepatan aliran, dan curah hujan banyak digunakan sebagai masukan, sedangkan beberapa penelitian menambahkan parameter lingkungan lain seperti kecepatan angin. Dari sisi pengambilan keputusan, Fuzzy Sugeno dan Fuzzy Mamdani telah diterapkan dengan konfigurasi masukan dan keluaran yang berbeda. Telegram juga telah digunakan sebagai media penyampaian informasi dalam beberapa arsitektur sistem. Berdasarkan perkembangan tersebut, penelitian ini memfokuskan pengembangan pada integrasi empat parameter berupa jarak permukaan air, debit air, curah hujan, dan kecepatan angin sebagai masukan Fuzzy Mamdani pada Raspberry Pi 5 untuk menghasilkan skor risiko 0–100% dan kategori Aman, Waspada, Siaga, serta Bahaya. Hasil pengolahan kemudian dikomunikasikan melalui MQTT, disimpan pada Firebase Realtime Database, dan disampaikan kepada pengguna melalui Telegram Bot. Dengan demikian, fokus pengembangan terletak pada integrasi proses akuisisi multi-

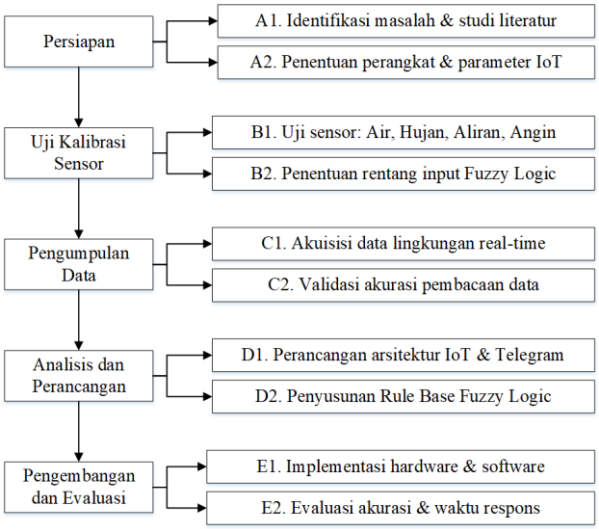
 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

parameter, pengambilan keputusan, komunikasi dan penyimpanan data, hingga penyampaian informasi dalam satu *prototipe* sistem deteksi dini risiko banjir.

3 Metode Penelitian

3.1. Tahapan Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan menggunakan lima tahapan utama yang dirancang secara urut untuk sistematis perancangan sistem. Alur penelitian secara utuh diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Metode penelitian

Tahap persiapan diawali dengan identifikasi masalah dan studi literatur sebagai dasar dalam menentukan perangkat serta parameter yang digunakan. Selanjutnya dilakukan kalibrasi sensor ketinggian air, curah hujan, debit air, dan kecepatan angin. Data hasil pembacaan sensor kemudian dikumpulkan secara real-time dan digunakan sebagai dasar dalam menentukan rentang *input* Fuzzy Logic. Pada tahap analisis dan perancangan dilakukan penyusunan arsitektur sistem IoT, integrasi Telegram Bot, serta *rule base* Fuzzy Logic. Rancangan tersebut selanjutnya diimplementasikan pada perangkat keras dan perangkat lunak, kemudian diuji untuk mengetahui hasil klasifikasi kondisi banjir dan waktu respons sistem.

3.2. Data dan Variabel Penelitian

Data penelitian diperoleh dari pembacaan empat parameter lingkungan, yaitu **jarak permukaan air, debit air, curah hujan, dan kecepatan angin**. Data sensor dibaca oleh Raspberry Pi 5 secara *real-time* dengan interval pengambilan data setiap lima detik. Keempat parameter tersebut selanjutnya digunakan sebagai masukan pada proses Fuzzy Mamdani untuk menghasilkan skor risiko dan kategori kondisi banjir.

Jarak permukaan air diperoleh menggunakan sensor ultrasonik dalam satuan sentimeter (cm). Sensor ditempatkan di atas permukaan air sehingga nilai yang diperoleh menunjukkan jarak antara sensor dan permukaan air. Dengan konfigurasi tersebut, semakin kecil nilai jarak menunjukkan permukaan air semakin mendekati sensor. Debit air diukur menggunakan *flow sensor* dalam satuan liter per menit (L/min) untuk merepresentasikan perubahan aliran air pada titik pengamatan. Curah hujan diperoleh menggunakan *rain gauge* berdasarkan jumlah *tip* yang terdeteksi dan dinyatakan dalam mm/5s. Ketiga parameter tersebut digunakan karena muka air, aliran air, dan curah hujan merupakan parameter yang telah banyak digunakan dalam pengembangan sistem pemantauan dan peringatan dini banjir berbasis IoT([8],[15], [5]).

Kecepatan angin diukur menggunakan anemometer dalam satuan meter per detik (m/s). Berbeda dengan tiga parameter sebelumnya, kecepatan angin pada penelitian ini **tidak ditempatkan sebagai parameter utama penentu risiko banjir**, tetapi sebagai parameter lingkungan pendukung dalam proses inferensi. Penggunaan anemometer bersama parameter curah hujan dan muka air juga ditemukan pada pengembangan sistem peringatan dini banjir berbasis Fuzzy Mamdani oleh [6].

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

Dalam penelitian ini, kecepatan angin digunakan untuk memberikan informasi tambahan ketika perubahan kondisi angin terjadi bersamaan dengan peningkatan parameter lainnya. Oleh karena itu, kecepatan angin tidak digunakan secara independen untuk menentukan kategori Bahaya, tetapi dilibatkan pada beberapa aturan kombinasi bersama jarak permukaan air, debit air, dan curah hujan.

Data hasil pembacaan keempat sensor digunakan sebagai masukan Fuzzy Mamdani, sedangkan keluarannya berupa skor risiko pada rentang 0–100% dan status kondisi yang terdiri atas Aman, Waspada, Siaga, dan Bahaya. Variabel yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Variabel penelitian

Variabel	Satuan	Keterangan
Ketinggian air	cm	Jarak sensor terhadap permukaan air
Debit air	L/min	Kecepatan aliran air yang terukur oleh *flow sensor*
Curah hujan	mm/5s	Curah hujan yang terukur selama interval lima detik
Kecepatan angin	m/s	Kecepatan angin yang terukur oleh anemometer
Skor risiko	%	Nilai hasil defuzzifikasi Fuzzy Logic
Status banjir	Kategori	Normal, Waspada, Siaga, atau Bahaya

3.3. Perangkat dan Perancangan Sistem

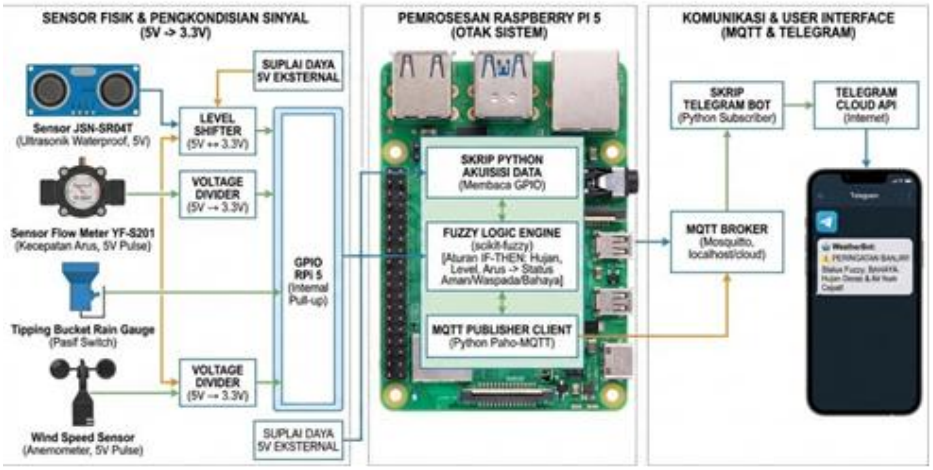
Sistem dibangun menggunakan Raspberry Pi 5 sebagai unit pemrosesan utama. Empat sensor digunakan untuk memperoleh data lingkungan, yaitu sensor ultrasonik untuk membaca jarak permukaan air, *flow sensor* untuk mengukur debit air, *rain gauge* untuk mengukur curah hujan, dan anemometer untuk mengukur kecepatan angin. Anemometer dihubungkan ke Raspberry Pi 5 melalui modul ADS1115 untuk membaca sinyal analog. Perangkat yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Perangkat sistem

Perangkat	Fungsi
Raspberry Pi 5	Memproses data sensor dan menjalankan sistem
Sensor ultrasonik	Mengukur jarak sensor terhadap permukaan air
Flow sensor	Mengukur debit air
Rain gauge	Mengukur curah hujan
Anemometer	Mengukur kecepatan angin
ADS1115	Membaca sinyal analog dari anemometer

Data dari masing-masing sensor dibaca oleh Raspberry Pi 5 setiap lima detik dan selanjutnya diproses menggunakan Fuzzy Logic. Hasil pengolahan berupa skor risiko dan status banjir dikirim ke Firebase Realtime Database dan MQTT untuk penyimpanan serta pemantauan data. Telegram Bot digunakan untuk mengirimkan hasil monitoring kepada pengguna. Rancangan arsitektur sistem ditunjukkan pada Gambar 2.

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719



Gambar 2 Arsitektur sistem

3.4. Pengolahan dan Fuzzy Logic

Data dari keempat sensor diolah menggunakan metode Fuzzy Mamdani dengan variabel masukan berupa jarak permukaan air, debit air, curah hujan, dan kecepatan angin. Keluaran sistem berupa skor risiko pada rentang 0–100 yang digunakan untuk menentukan status kondisi banjir. Pengolahan dilakukan melalui proses fuzzifikasi, inferensi berdasarkan *rule base*, agregasi, dan defuzzifikasi.

Nilai yang diperoleh dari sensor ultrasonik merupakan jarak antara posisi sensor dan permukaan air. Dengan posisi sensor berada di atas permukaan air, nilai jarak yang semakin kecil menunjukkan permukaan air yang semakin tinggi. Jarak air digunakan sebagai parameter utama, sedangkan debit air, curah hujan, dan kecepatan angin menjadi parameter pendukung dalam menentukan perubahan tingkat risiko. Masing-masing variabel dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy. Rentang fungsi keanggotaan ditentukan berdasarkan karakteristik pembacaan sensor yang diperoleh pada pengujian awal sistem. Fungsi keanggotaan variabel masukan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Fungsi keanggotaan variabel masukan

Variabel	Himpunan Fuzzy	Bentuk Fungsi Keanggotaan	Parameter
Jarak air (cm)	Dekat	Trapesium	[0, 0, 8, 14]
	Sedang	Segitiga	[8, 15, 22]
	Jauh	Trapesium	[15, 22, 30, 30]
Debit air (L/min)	Lambat	Trapesium	[0, 0, 5, 10]
	Sedang	Segitiga	[7, 13, 18]
	Cepat	Trapesium	[15, 20, 25, 25]
Curah hujan (mm/5s)	Rendah	Trapesium	[0, 0, 1, 2]
	Sedang	Segitiga	[1,5, 3,0, 4,5]
	Lebat	Trapesium	[3,5, 5,0, 6,0, 6,0]
Kecepatan angin (m/s)	Pelan	Trapesium	[0, 0, 1,5, 2,2]
	Sedang	Segitiga	[1,8, 2,6, 3,4]
	Kencang	Trapesium	[3,0, 4,0, 6,0, 6,0]

Variabel keluaran berupa risiko banjir dibagi menjadi empat himpunan, yaitu Aman, Waspada, Siaga, dan Bahaya. Pembagian tersebut digunakan untuk membentuk keluaran pada proses inferensi Mamdani. Fungsi keanggotaan variabel keluaran ditunjukkan pada Tabel 5.

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

Tabel 5 Fungsi keanggotaan variabel luaran

Himpunan Fuzzy	Bentuk Fungsi Keanggotaan	Parameter
Aman	Trapesium	[0, 0, 20, 35]
Waspada	Segitiga	[30, 45, 60]
Siaga	Segitiga	[55, 70, 80]
Bahaya	Trapesium	[75, 85, 100, 100]

Data sensor yang masuk terlebih dahulu diubah menjadi derajat keanggotaan sesuai dengan fungsi keanggotaan masing-masing variabel. Nilai tersebut selanjutnya digunakan pada proses inferensi untuk menentukan aturan yang aktif. *Rule base* Fuzzy Mamdani disusun menggunakan pendekatan berbasis pengetahuan (*knowledge-based rule construction*) melalui penalaran logis terhadap hubungan antarparameter dan karakteristik kondisi yang direpresentasikan oleh masing-masing variabel. Pendekatan penyusunan aturan berdasarkan penalaran logis terhadap hubungan antarparameter juga digunakan dalam pengembangan sistem peringatan banjir berbasis fuzzy pada penelitian terdahulu [8].

Setiap variabel masukan memiliki tiga himpunan fuzzy sehingga apabila seluruh kombinasi dibentuk secara lengkap terdapat 3^4=81 kemungkinan kombinasi. Pada penelitian ini tidak seluruh kombinasi tersebut dibentuk menjadi aturan secara terpisah. Sebanyak 20 aturan digunakan untuk merepresentasikan kondisi utama dan pola peningkatan risiko pada *prototipe*. Penyusunan aturan menempatkan jarak permukaan air sebagai parameter utama, sedangkan debit air, curah hujan, dan kecepatan angin sebagai parameter pendukung. Ketika jarak permukaan air masih berada pada kategori Jauh, peningkatan debit dan curah hujan digunakan untuk menaikkan tingkat risiko secara bertahap dari Aman hingga Siaga. Pada jarak Sedang, kombinasi peningkatan debit dan curah hujan menghasilkan tingkat risiko yang lebih tinggi, yaitu Waspada, Siaga, hingga Bahaya. Sementara itu, ketika jarak telah berada pada kategori Dekat, kondisi ditetapkan sebagai Bahaya karena permukaan air telah mendekati posisi sensor.

Kecepatan angin tidak digunakan sebagai penentu kategori Bahaya secara independen, tetapi dilibatkan pada aturan kombinasi tertentu sebagai parameter lingkungan pendukung. Hal tersebut terlihat pada R15–R17 yang menggunakan kecepatan angin bersama kondisi jarak, curah hujan, atau debit, serta R19–R20 yang mengombinasikannya dengan kondisi parameter lainnya. Dengan penyusunan tersebut, 20 aturan digunakan untuk mewakili kondisi utama dan kombinasi parameter yang relevan terhadap mekanisme pengambilan keputusan pada prototipe tanpa membentuk seluruh 81 kemungkinan kombinasi secara eksplisit. *Rule base* yang diterapkan pada sistem ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6 Rule base

Rule	Kondisi	Output
R1	Jarak jauh AND debit lambat AND hujan rendah	Aman
R2	Jarak jauh AND debit lambat AND hujan sedang	Aman
R3	Jarak jauh AND debit sedang AND hujan rendah	Aman
R4	Jarak jauh AND debit sedang AND hujan sedang	Waspada
R5	Jarak jauh AND debit cepat	Waspada
R6	Jarak jauh AND hujan lebat	Waspada
R7	Jarak jauh AND debit cepat AND hujan lebat	Siaga
R8	Jarak sedang AND debit lambat AND hujan rendah	Waspada
R9	Jarak sedang AND debit lambat AND hujan sedang	Waspada
R10	Jarak sedang AND debit sedang AND hujan rendah	Waspada
R11	Jarak sedang AND debit sedang AND hujan sedang	Siaga
R12	Jarak sedang AND debit cepat	Siaga
R13	Jarak sedang AND hujan lebat	Siaga
R14	Jarak sedang AND debit cepat AND hujan lebat	Bahaya

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

R15	Jarak sedang AND hujan sedang AND angin kencang	Siaga
R16	Jarak sedang AND hujan lebat AND angin kencang	Bahaya
R17	Jarak sedang AND debit cepat AND angin kencang	Siaga
R18	Jarak dekat	Bahaya
R19	Debit cepat AND hujan lebat AND angin kencang	Bahaya
R20	Jarak dekat AND debit cepat AND hujan lebat AND angin kencang	Bahaya

Pada setiap aturan yang menggunakan operator AND, nilai aktivasi (*firing strength*) ditentukan dari nilai minimum derajat keanggotaan *input* yang terlibat. Nilai aktivasi aturan ke-i dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\alpha i = min\{\mu A1(x1), \mu A2(x2), \dots, \mu An(xn)\} \quad (1)$$

dengan αi merupakan nilai aktivasi aturan ke-i, sedangkan $\mu An(xn)$ merupakan derajat keanggotaan *input* pada himpunan fuzzy yang digunakan dalam aturan.

Keluaran dari aturan yang aktif kemudian digabungkan menggunakan operator maksimum. Proses agregasi tersebut dinyatakan pada Persamaan (2).

$$\mu agg(z) = max\{\mu R1(z), \mu R2(z), \dots, \mu Rn(z)\} \quad (2)$$

Hasil agregasi masih berupa himpunan fuzzy. Untuk memperoleh skor risiko dalam bentuk nilai tegas, dilakukan defuzzifikasi menggunakan metode *centroid*. Nilai defuzzifikasi dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$z^* = \frac{\int \mu agg(z) dz}{\int z \mu agg(z) dz} \quad (3)$$

Nilai z^*merupakan skor risiko hasil defuzzifikasi. Skor tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan status kondisi banjir berdasarkan rentang pada Tabel 7.

Tabel 7 Status kondisi banjir

Skor Risiko (%)	Status
$0 \leq z^* < 35$	Normal
$35 \leq z^* < 60$	Waspada
$60 \leq z^* < 80$	Siaga
$80 \leq z^* \leq 100$	Bahaya

Skor risiko dan status yang diperoleh selanjutnya dikirim melalui Firebase, MQTT, dan Telegram Bot untuk kebutuhan penyimpanan dan penyampaian informasi kondisi banjir.

3.5. Pengujian dan Analisis Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja sensor, kesesuaian hasil perhitungan Fuzzy Mamdani, serta proses pengiriman informasi pada sistem. Pengujian sensor dilakukan terhadap sensor ultrasonik, *flow sensor*, *rain gauge*, dan anemometer dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap nilai acuan. Setiap sensor diuji pada beberapa kondisi pengukuran untuk memperoleh variasi nilai pembacaan.

Persentase kesalahan pembacaan sensor dihitung menggunakan *Absolute Percentage Error* (APE). Perhitungan APE untuk setiap data pengujian ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$APE_i = \left|\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i}\right| \quad (4)$$

dengan Y_i merupakan skor risiko hasil perhitungan manual dan $\hat{Y}_i$ merupakan skor risiko yang dihasilkan sistem pada data ke-i. Nilai kesalahan dari seluruh data pengujian selanjutnya dihitung menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebagaimana Persamaan (5).

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i}\right| \times 100\% \quad (5)$$

dengan n merupakan jumlah data yang diuji. Nilai MAPE digunakan untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara hasil perhitungan manual Fuzzy Mamdani dan hasil yang diperoleh dari sistem.

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

Setelah kalibrasi sensor, pengujian dilakukan terhadap proses Fuzzy Mamdani menggunakan data dari keempat parameter. Skor risiko yang dihasilkan sistem dibandingkan dengan hasil perhitungan manual menggunakan nilai *input*, fungsi keanggotaan, dan *rule base* yang sama. APE dihitung pada setiap data pengujian, sedangkan MAPE digunakan untuk mengetahui rata-rata perbedaan antara skor hasil perhitungan manual dan skor yang dihasilkan sistem. Pada pengujian ini, Y_i pada Persamaan (4) dan (5) merupakan skor hasil perhitungan manual, sedangkan $\hat{Y}_i$ merupakan skor yang dihasilkan oleh sistem.

Pengujian juga dilakukan terhadap proses pengiriman hasil monitoring. Data hasil pengolahan diperiksa pada Firebase Realtime Database dan MQTT, sedangkan informasi skor risiko dan status banjir diperiksa melalui Telegram Bot.

4 Hasil dan Pembahasan

4.1. Implementasi Prototipe Sistem

Prototipe sistem deteksi dini banjir diimplementasikan menggunakan Raspberry Pi 5 dan empat sensor untuk membaca kondisi lingkungan. Seluruh sensor dirangkai dalam satu sistem dan digunakan untuk memperoleh data jarak permukaan air, debit air, curah hujan, dan kecepatan angin. Hasil implementasi prototipe ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Implementasi prototype

Pada saat pengujian, Raspberry Pi 5 membaca data sensor dengan interval lima detik. Empat data hasil pembacaan tersebut menjadi *input* Fuzzy Mamdani untuk menghasilkan skor risiko dan status banjir. Hasil pengolahan kemudian dikirim ke Firebase Realtime Database dan MQTT, sedangkan informasi hasil monitoring diteruskan kepada pengguna melalui Telegram Bot.

4.2. Hasil Kalibrasi Sensor

Kalibrasi dilakukan pada sensor ultrasonik, *flow sensor*, *rain gauge*, dan anemometer sebelum digunakan dalam pengujian sistem. Pembacaan masing-masing sensor dibandingkan dengan nilai acuan pada beberapa kondisi pengujian. Persentase kesalahan dihitung pada setiap pengukuran, kemudian nilai rata-ratanya dihitung menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE).

Hasil kalibrasi sensor ultrasonik menunjukkan pembacaan yang mendekati nilai pengukuran acuan. Dari sepuluh kali pengujian diperoleh MAPE sebesar **0,713%**. Nilai tersebut menunjukkan bahwa perbedaan antara pembacaan sensor dan nilai acuan relatif kecil. Hasil pengujian sensor ultrasonik ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8 Pengujian sensor ultrasonik

No	tinggi manual	tinggi sensor	gap	APE
1	25	24,85	-0,15	0,60%
2	25	24,86	-0,14	0,56%
3	20	20,04	0,04	0,20%
4	20	19,98	-0,02	0,10%
5	15	14,85	-0,15	1,00%
6	15	14,9	-0,1	0,67%

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

7	10	9,94	-0,06	0,60%
8	10	9,96	-0,04	0,40%
9	5	4,93	-0,07	1,40%
10	5	5,08	0,08	1,60%
Rata-rata (MAPE)				**0,713%**

Kalibrasi *flow sensor* dilakukan dengan membandingkan debit hasil pengukuran acuan dengan debit yang terbaca oleh sensor. Hasil dari sepuluh pengujian menghasilkan MAPE sebesar **4,553%**. Variasi kesalahan pembacaan pada sensor ini lebih besar dibandingkan sensor ultrasonik. Hasil kalibrasi *flow sensor* ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9 Pengujian water *flow sensor*

No	volume air (L)	lama waktu habis (detik)	kecepatan(L/m)	sensor(L/m)	gap	APE
1	1,5	42	2,14	2,21	0,067143	3,13%
2	1,5	42	2,14	2,26	0,117143	5,47%
3	1,5	41	2,20	2,25	0,054878	2,50%
4	1,5	42	2,14	2,24	0,097143	4,53%
5	1,5	41	2,20	2,22	0,024878	1,13%
6	1,5	37	2,43	2,53	0,097568	4,01%
7	1,5	36	2,50	2,43	-0,07	2,80%
8	1,5	36	2,50	2,75	0,25	10,00%
9	1,5	38	2,37	2,52	0,151579	6,40%
10	1,5	38	2,37	2,5	0,131579	5,56%
Rata-rata (MAPE)						**4,553%**

Kalibrasi *rain gauge* dilakukan dengan membandingkan nilai curah hujan acuan dengan hasil pembacaan sensor. Dari sepuluh pengujian diperoleh MAPE sebesar 4,185%. Perbedaan pembacaan terjadi pada beberapa pengujian akibat perbedaan jumlah *tip* yang tercatat selama proses pengukuran. Hasil kalibrasi *rain gauge* ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10 Pengujian sensor curah hujan

No	jumlah air (ml)	jumlah jungkat jungkit	hasil hitung manual	sensor *rain gauge* (mm/5 detik)	gap	APE
1	10	5	1,40	1,34	-0,06	4,21%
2	10	5	1,40	1,40	0,00	0,00%
3	20	9	2,79	2,60	-0,19	6,96%
4	20	10	2,79	2,63	-0,17	6,02%
5	30	15	4,19	3,91	-0,28	6,67%
6	30	15	4,19	4,19	0,00	0,00%
7	40	20	5,59	5,31	-0,28	5,00%
8	40	20	5,59	5,87	0,28	5,00%
9	50	25	6,99	6,71	-0,28	4,00%
10	50	25	6,99	7,26	0,28	4,00%
Rata-Rata (MAPE)						**4,185%**

Kalibrasi anemometer dilakukan dengan membandingkan kecepatan angin acuan dengan hasil pembacaan sensor. Hasil sepuluh kali pengujian menghasilkan MAPE sebesar **1,043%**. Selisih pembacaan relatif kecil pada variasi kecepatan angin yang diuji. Hasil kalibrasi anemometer ditunjukkan pada Tabel 11.

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

Tabel 11. Pengujian sensor anemometer

No	kecepatan kipas	jarak (cm)	digital(m/s)	sensor(m/s)	gap	APE
1	1	10	2,9	2,94	0,04	1,38%
2	1	15	2,4	2,42	0,02	0,83%
3	1	20	1,8	1,78	-0,02	1,11%
4	2	10	3,1	3,12	0,02	0,65%
5	2	15	2,7	2,66	-0,04	1,48%
6	2	20	2,4	2,39	-0,01	0,42%
7	3	10	3,5	3,4	-0,1	2,86%
8	3	15	3,1	3,08	-0,02	0,65%
9	3	20	2,9	2,92	0,02	0,69%
10	3	25	2,7	2,71	0,01	0,37%
Rata-Rata (MAPE)						**1,043%**

Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa sensor ultrasonik memiliki persentase kesalahan rata-rata paling rendah sebesar 0,713%, diikuti anemometer sebesar 1,043%, *rain gauge* sebesar 4,185%, dan *flow sensor* sebesar 4,553%. Hasil tersebut menunjukkan adanya perbedaan karakteristik pembacaan pada setiap sensor dan digunakan sebagai dasar sebelum keempat parameter diterapkan sebagai masukan pada sistem Fuzzy Mamdani.

4.3. Hasil Pengujian Fuzzy Mamdani

engujian Fuzzy Mamdani dilakukan menggunakan 25 data uji yang terdiri atas 10 data hasil pembacaan prototipe dan 15 skenario simulasi. Penambahan skenario simulasi dilakukan untuk memperluas variasi kombinasi masukan yang belum seluruhnya tercakup pada data pembacaan prototipe. Nilai pada skenario simulasi ditentukan dalam rentang fungsi keanggotaan masing-masing variabel dan diproses menggunakan fungsi keanggotaan serta *rule base* Fuzzy Mamdani yang sama dengan implementasi sistem. Keempat parameter berupa jarak permukaan air, debit air, curah hujan, dan kecepatan angin diproses secara bersamaan untuk menghasilkan skor risiko pada rentang 0–100%. Berdasarkan skor yang diperoleh, sistem menentukan kondisi menjadi Aman, Waspada, Siaga, atau Bahaya sesuai dengan rentang yang telah ditetapkan pada Tabel 7. Data simulasi pada pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi respons model terhadap variasi masukan dan tidak diperlakukan sebagai data kejadian banjir aktual di lapangan.

Tabel 12 Hasil pengujian fuzzy mamdani di sistem

No	Jarak Air (cm)	Debit Air (L/min)	Curah Hujan (mm/5s)	Kecepatan Angin (m/s)	Skor Risiko (%)	Status
1	15,71	10,04	3,3528	2,23	62,83	Siaga
2	17,78	6,99	1,6764	2,7	28,72	Aman
3	15,79	12,35	3,9116	2,45	61,48	Siaga
4	15,01	7,12	3,6322	2,09	47,99	Waspada
5	11,65	10,8	3,9116	2,22	78,95	Siaga
6	10,06	11,24	1,397	2,91	73,85	Siaga
7	9,11	11,28	3,3528	2,81	85,8	Bahaya
8	8,58	11,28	3,6322	2,87	87,64	Bahaya
9	8,24	19,82	2,794	2,12	88,89	Bahaya
10	6,83	2,57	2,2352	2,12	89,79	Bahaya
11	23,67	4,36	0,7823	1,34	14,09	Aman
12	22,41	6,73	1,2846	1,87	15,18	Aman
13	21,36	9,47	1,8161	2,31	35,67	Waspada
14	20,17	12,68	2,5146	2,64	51,65	Waspada
15	19,43	14,21	3,0734	2,38	53,31	Waspada

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

16	18,62	17,46	4,0513	3,16	64,99	Siaga
17	17,31	8,64	2,9337	3,72	45,11	Waspada
18	16,47	13,72	4,6101	4,08	74,45	Siaga
19	14,63	5,38	0,8941	1,53	45	Waspada
20	13,82	12,47	1,2573	2,73	47,15	Waspada
21	12,76	8,91	3,1572	3,67	66,37	Siaga
22	11,38	18,73	2,6543	4,21	78,77	Siaga
23	10,27	6,16	1,1176	1,68	72,51	Siaga
24	7,46	13,37	3,2131	2,58	89,79	Bahaya
25	5,92	19,16	4,8895	4,37	89,79	Bahaya

Hasil pengujian pada Tabel 12 menunjukkan bahwa keluaran sistem berubah berdasarkan kombinasi nilai dari setiap parameter masukan. Pada data pertama, jarak permukaan air sebesar 15,71 cm, debit air 10,04 L/min, curah hujan 3,3528 mm/5s, dan kecepatan angin 2,23 m/s menghasilkan skor risiko sebesar 62,83% sehingga sistem memberikan status Siaga. Sementara itu, pada data kedua dengan jarak permukaan air 17,78 cm, debit 6,99 L/min, curah hujan 1,6764 mm/5s, dan kecepatan angin 2,70 m/s diperoleh skor risiko sebesar 28,72% dengan status Aman.

Perubahan keluaran juga terlihat pada variasi kondisi masukan lainnya. Pada data ke-11, kombinasi jarak permukaan air 23,67 cm, debit 4,36 L/min, curah hujan 0,7823 mm/5s, dan kecepatan angin 1,34 m/s menghasilkan skor risiko 14,09% dengan status Aman. Ketika nilai masukan berubah seperti pada data ke-14, yaitu jarak permukaan air 20,17 cm, debit 12,68 L/min, curah hujan 2,5146 mm/5s, dan kecepatan angin 2,64 m/s, skor risiko meningkat menjadi 51,65% dengan status Waspada. Selanjutnya, pada data ke-18 dengan jarak permukaan air 16,47 cm, debit 13,72 L/min, curah hujan 4,6101 mm/5s, dan kecepatan angin 4,08 m/s diperoleh skor risiko sebesar 74,45% dengan status Siaga. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa keluaran fuzzy ditentukan berdasarkan derajat keanggotaan dan kombinasi *rule* yang aktif pada setiap kondisi masukan, bukan hanya berdasarkan satu parameter secara terpisah.

Kondisi Bahaya diperoleh ketika kombinasi masukan mengaktifkan aturan dengan konsekuen Bahaya, terutama ketika jarak permukaan air berada pada kategori Dekat. Pada data ke-24, jarak permukaan air sebesar 7,46 cm dengan debit 13,37 L/min, curah hujan 3,2131 mm/5s, dan kecepatan angin 2,58 m/s menghasilkan skor risiko 89,79%. Hasil serupa diperoleh pada data ke-25 dengan jarak permukaan air 5,92 cm yang menghasilkan skor 89,79%. Kondisi tersebut sesuai dengan *rule base* yang menempatkan jarak permukaan air sebagai parameter utama, termasuk R18 yang menetapkan jarak kategori Dekat sebagai kondisi Bahaya. Sementara itu, debit air, curah hujan, dan kecepatan angin berperan sebagai parameter pendukung pada kombinasi aturan lainnya.

Secara keseluruhan, 25 data uji menghasilkan tiga kondisi Aman, tujuh kondisi Waspada, sembilan kondisi Siaga, dan enam kondisi Bahaya. Variasi tersebut memperluas kondisi masukan yang dievaluasi dibandingkan pengujian awal yang hanya menggunakan 10 data pembacaan prototipe. Meskipun demikian, penambahan skenario simulasi tidak menggantikan pengujian pada kondisi banjir sebenarnya. Pengujian pada penelitian ini masih berada pada tingkat *prototipe* sehingga diperlukan pengujian lanjutan menggunakan data lapangan dengan periode pengamatan yang lebih panjang dan variasi kondisi hidrometeorologi yang lebih luas untuk mengevaluasi kinerja sistem pada kondisi operasional sebenarnya.

Kesesuaian implementasi Fuzzy Mamdani selanjutnya diperiksa melalui perbandingan antara hasil perhitungan manual dan keluaran sistem. Pengujian ini ditujukan untuk memverifikasi konsistensi proses fuzzifikasi, inferensi, agregasi, dan defuzzifikasi yang diimplementasikan pada sistem, bukan untuk mengukur akurasi sistem dalam mendeteksi kejadian banjir aktual.

4.4. Validasi Perhitungan Fuzzy Mamdani

Validasi dilakukan dengan membandingkan skor risiko yang dihasilkan sistem dengan hasil perhitungan Fuzzy Mamdani secara manual. Perhitungan menggunakan nilai *input*, fungsi keanggotaan, dan *rule base* yang sama dengan yang diterapkan pada sistem. Sepuluh data pada Tabel 13 digunakan dalam proses validasi. Data pertama digunakan sebagai contoh untuk menunjukkan

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

proses fuzzifikasi dan inferensi secara rinci, sedangkan keseluruhan data digunakan untuk membandingkan hasil perhitungan manual dengan keluaran sistem.

Data pertama memiliki nilai jarak air sebesar 15,71 cm, debit air 10,04 L/min, curah hujan 3,3528 mm/5s, dan kecepatan angin 2,23 m/s. Berdasarkan pengolahan pada sistem, kombinasi nilai tersebut menghasilkan skor risiko sebesar 62,83% dengan status Siaga. Data yang digunakan sebagai sampel perhitungan ditunjukkan pada Tabel 13.

Tabel 13 Data sampel perhitungan fuzzy mamdani

Parameter	Nilai
Jarak air	15,71 cm
Debit air	10,04 L/min
Curah hujan	3,3528 mm/5s
Kecepatan angin	2,23 m/s
Skor sistem	62,83%
Status sistem	Siaga

Tahap pertama dilakukan dengan menentukan derajat keanggotaan setiap nilai masukan berdasarkan fungsi keanggotaan pada Tabel 4. Pada nilai jarak air 15,71 cm, himpunan Sedang dan Jauh memiliki derajat keanggotaan lebih besar dari nol. Debit air 10,04 L/min berada pada himpunan Sedang, begitu juga dengan curah hujan 3,3528 mm/5s dan kecepatan angin 2,23 m/s. Hasil fuzzifikasi secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 14.

Tabel 14 Hasil fuzzifikasi data sampel

Variabel	Himpunan Fuzzy	Derajat Keanggotaan
Jarak air 15,71 cm	Dekat	0
	Sedang	0,8986
	Jauh	0,1014
Debit air 10,04 L/min	Lambat	0
	Sedang	0,5067
	Cepat	0
Curah hujan 3,3528 mm/5s	Rendah	0
	Sedang	0,7648
	Lebat	0
Kecepatan angin 2,23 m/s	Pelan	0
	Sedang	0,5375
	Kencang	0

Sebagai contoh, derajat keanggotaan jarak air pada himpunan Sedang dihitung sebagai berikut.

$$\mu_{sedang}(15{,}71) = \frac{22 - 15{,}71}{22 - 15} = \frac{6{,}29}{7} = 0{,}8986$$

Pada himpunan Jauh diperoleh:

$$\mu_{jauh}(15{,}71) = \frac{15{,}71 - 15}{22 - 15} = \frac{0{,}71}{7} = 0{,}1014$$

Untuk debit air pada himpunan Sedang diperoleh:

$$\mu_{sedang}(10{,}04) = \frac{10{,}04 - 7}{13 - 7} = \frac{3{,}04}{6} = 0{,}5067$$

Nilai curah hujan 3,3528 mm/5s berada pada sisi menurun fungsi keanggotaan Sedang, sehingga diperoleh:

$$\mu_{sedang}(3{,}3528) = \frac{4{,}5 - 3{,}3528}{4{,}5 - 3} = \frac{1{,}1472}{1{,}5} = 0{,}7648$$

Sementara itu, kecepatan angin 2,23 m/s berada pada sisi naik fungsi keanggotaan Sedang:

$$\mu_{sedang}(2{,}3) = \frac{2{,}23 - 1{,}8}{2{,}6 - 1{,}8} = \frac{0{,}43}{0{,}8} = 0{,}5375$$

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

Berdasarkan hasil fuzzifikasi tersebut, terdapat dua *rule* yang aktif pada data pertama, yaitu R4 dan R11. R4 menghasilkan keluaran Waspada, sedangkan R11 menghasilkan keluaran Siaga. Nilai aktivasi masing-masing *rule* ditentukan menggunakan operator MIN sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 15.

Tabel 15 Nilai aktivasi *rules* R4 dan R11

Rule	Kondisi	Output	Nilai Aktivasi (α)
R4	Jarak Jauh AND Debit Sedang AND Hujan Sedang	Waspada	0,1014
R11	Jarak Sedang AND Debit Sedang AND Hujan Sedang	Siaga	0,5067

Nilai aktivasi R4 diperoleh dari nilai minimum derajat keanggotaan Jarak Jauh, Debit Sedang, dan Hujan Sedang.

$$\boldsymbol{\alpha}_4 = \min(0{,}1014;\ 0{,}5067;\ 0{,}7648) = \ 0{,}1014$$

Pada R11, nilai aktivasi dihitung dari Jarak Sedang, Debit Sedang, dan Hujan Sedang.

$$\boldsymbol{\alpha}_{11} = 0{,}8986;\ 0{,}5067;\ 0{,}7648) = 0{,}5067$$

Nilai aktivasi R11 lebih besar dibandingkan R4, sehingga keluaran Siaga lebih dominan pada data tersebut. Kecepatan angin memiliki derajat keanggotaan Sedang sebesar 0,5375, tetapi kondisi tersebut tidak terdapat pada R4 maupun R11 sehingga tidak menambah *rule* aktif pada data pertama. Meskipun demikian, kecepatan angin tetap menjadi bagian dari proses inferensi pada *rule* lain ketika nilai pembacaannya memenuhi kondisi yang telah ditentukan.

Keluaran dari R4 dan R11 selanjutnya digabungkan menggunakan operator MAX. Himpunan keluaran Waspada dipotong pada nilai aktivasi 0,1014, sedangkan himpunan Siaga dipotong pada nilai 0,5067. Hasil agregasi kemudian didefuzzifikasi menggunakan metode *centroid*. Berdasarkan perhitungan manual diperoleh skor risiko sebesar 62,8182%. Sistem menghasilkan skor sebesar 62,83%, sehingga terdapat selisih sebesar 0,0118. Kedua hasil tersebut berada pada rentang 60–<80 dan menghasilkan status yang sama, yaitu Siaga.

Prosedur perhitungan yang sama diterapkan pada sembilan data lainnya. Setiap data menghasilkan kombinasi derajat keanggotaan dan *rule* aktif yang berbeda sesuai dengan nilai masing-masing parameter. Hasil akhir perhitungan manual kemudian dibandingkan dengan skor yang dihasilkan sistem. APE dihitung pada setiap data, sedangkan rata-rata persentase perbedaannya dihitung menggunakan MAPE. Hasil perbandingan ditunjukkan pada Tabel 16.

Tabel 16 Hasil perbandingan skor manual dan sistem

No	Skor Manual (%)	Skor Sistem (%)	Selisih	APE (%)	Status Manual	Status Sistem
1	62,8182	62,83	0,0118	0,0188	Siaga	Siaga
2	28,7286	28,72	0,0086	0,0299	Aman	Aman
3	61,4655	61,48	0,0145	0,0236	Siaga	Siaga
4	47,9925	47,99	0,0025	0,0052	Waspada	Waspada
5	78,9718	78,95	0,0218	0,0276	Siaga	Siaga
6	73,874	73,85	0,024	0,0325	Siaga	Siaga
7	85,8231	85,8	0,0231	0,0269	Bahaya	Bahaya
8	87,66	87,64	0,02	0,0228	Bahaya	Bahaya
9	88,9034	88,89	0,0134	0,015	Bahaya	Bahaya
10	89,8172	89,79	0,0272	0,0303	Bahaya	Bahaya

Berdasarkan nilai APE pada Tabel 15, MAPE dihitung dari rata-rata persentase kesalahan seluruh data pengujian sebagai berikut.

$$MAPE = \frac{0{,}0188 + 0{,}0299 + 0{,}0236 + 0{,}0052 + 0{,}0276 + 0{,}0325 + 0{,}0269 + 0{,}0228 + 0{,}0150 + 0{,}0303}{10}$$

$$MAPE = \frac{0{,}2326}{10} = 0{,}02326\ \%$$

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa nilai APE pada sepuluh data berada pada rentang 0,0052% sampai 0,0325%. Selisih terbesar terdapat pada data keenam dengan APE sebesar 0,0325%, sedangkan selisih terkecil terdapat pada data keempat sebesar 0,0052%. Secara keseluruhan diperoleh MAPE sebesar 0,0233%.

Nilai MAPE sebesar 0,0233% menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi antara hasil perhitungan Fuzzy Mamdani secara manual dan hasil implementasi pada sistem. Nilai MAPE pada pengujian ini digunakan untuk memverifikasi konsistensi implementasi proses Fuzzy Mamdani, bukan sebagai ukuran akurasi sistem dalam mendeteksi kejadian banjir sebenarnya. Hal ini disebabkan nilai pembanding yang digunakan merupakan hasil perhitungan Fuzzy Mamdani secara manual dan bukan data kejadian banjir aktual di lapangan. Dengan demikian, pengujian tersebut menunjukkan kesesuaian implementasi proses fuzzifikasi, inferensi, agregasi, dan defuzzifikasi pada sistem.

4.5. Hasil Pengujian IoT dan Telegram Bot

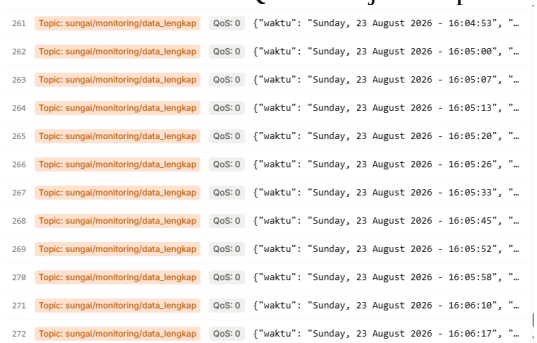
Pengujian komunikasi dilakukan setelah proses pembacaan sensor dan Fuzzy Mamdani dapat berjalan pada Raspberry Pi 5. Pada tahap ini diperiksa apakah data hasil monitoring dapat disimpan pada Firebase Realtime Database, dikirim melalui MQTT, dan diteruskan kepada pengguna melalui Telegram Bot.

Data yang dikirim ke Firebase meliputi jarak permukaan air, debit air, curah hujan, kecepatan angin, skor risiko, dan status banjir. Selama pengujian, data tersebut dapat tersimpan pada Firebase Realtime Database sesuai dengan hasil pembacaan dan pengolahan pada Raspberry Pi 5. Tampilan data yang tersimpan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Hasil penyimpanan data pada firebase realtime database

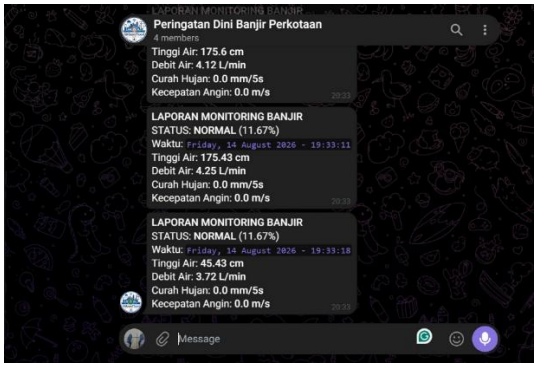
Selain disimpan pada Firebase, data monitoring juga dikirim melalui MQTT. Pengiriman dilakukan dari Raspberry Pi 5 menuju *broker* menggunakan topik yang telah ditentukan pada program. Data yang dikirim dapat diterima pada sisi MQTT dan berubah mengikuti pembacaan sensor selama pengujian. Hasil pengiriman data melalui MQTT ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Hasil pengiriman data melalui MQTT

Telegram Bot digunakan untuk menyampaikan hasil monitoring kepada pengguna. Informasi yang diterima melalui Telegram memuat status banjir, skor risiko, serta nilai jarak permukaan air, debit air, curah hujan, dan kecepatan angin. Status yang ditampilkan mengikuti hasil Fuzzy Mamdani yang diproses pada Raspberry Pi 5. Salah satu hasil monitoring melalui Telegram Bot ditunjukkan pada Gambar 6.

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719



Gambar 6 Hasil monitoring kondisi banjir melalui telegram bot

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, data hasil monitoring dapat disimpan pada Firebase Realtime Database dan dikirim melalui MQTT. Informasi hasil pengolahan Fuzzy Mamdani juga dapat diterima melalui Telegram Bot dalam bentuk nilai pembacaan sensor, skor risiko, dan status banjir. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses pembacaan sensor, pengolahan Fuzzy Mamdani, penyimpanan data, dan penyampaian informasi telah terhubung pada prototipe yang dikembangkan.

4.6. Pembahasan

Hasil kalibrasi menunjukkan adanya perbedaan persentase kesalahan pada keempat sensor yang digunakan. MAPE sensor ultrasonik sebesar 0,713% dan anemometer sebesar 1,043%, sedangkan *rain gauge* dan *flow sensor* masing-masing memperoleh MAPE sebesar 4,185% dan 4,553%. Sensor ultrasonik memiliki persentase kesalahan paling kecil, sedangkan nilai terbesar diperoleh pada *flow sensor*. Sebagai perbandingan, [6] memperoleh persentase kesalahan sebesar 2,55% pada sensor ultrasonik, 2,38% pada anemometer, dan 2,14% pada *rain gauge*. Perbedaan hasil pengujian dapat dipengaruhi oleh jenis sensor, konfigurasi perangkat, serta kondisi pengujian yang digunakan sehingga nilai kesalahan antarsistem tidak dapat dibandingkan secara langsung. Setelah proses kalibrasi, data hasil pembacaan keempat sensor digunakan sebagai masukan dalam pengujian Fuzzy Mamdani.

Pada pengujian fuzzy, perubahan skor risiko tidak hanya ditentukan oleh satu parameter. Jarak permukaan air memiliki pengaruh yang cukup besar karena semakin kecil jarak antara sensor dan permukaan air menunjukkan semakin tingginya muka air. Debit air, curah hujan, dan kecepatan angin memengaruhi hasil sesuai dengan derajat keanggotaan dan *rule* yang aktif. Penggunaan beberapa parameter dalam pengambilan keputusan juga diterapkan oleh [8] yang menggunakan intensitas curah hujan, kecepatan air, ketinggian air, dan kemiringan sebagai masukan logika fuzzy. [6] juga menerapkan Fuzzy Mamdani dengan melibatkan sensor muka air, *rain gauge*, dan anemometer. Pada penelitian ini, empat parameter berupa jarak permukaan air, debit air, curah hujan, dan kecepatan angin digunakan untuk menghasilkan skor risiko pada rentang 0–100% dengan kategori Aman, Waspada, Siaga, dan Bahaya.

engaruh jarak permukaan air terlihat pada beberapa data dengan kondisi Bahaya. Pada jarak 9,11 cm, sistem menghasilkan skor risiko sebesar 85,80%, kemudian meningkat menjadi 87,64% pada jarak 8,58 cm dan 88,89% pada jarak 8,24 cm. Pada jarak 6,83 cm, skor yang diperoleh sebesar 89,79% meskipun debit air yang terbaca hanya 2,57 L/min. Kondisi tersebut terjadi karena nilai jarak telah masuk pada himpunan Dekat sehingga R18 (*IF Jarak Dekat THEN Bahaya*) aktif. Pemanfaatan kondisi muka air sebagai parameter penting dalam sistem peringatan banjir juga terdapat pada penelitian [7] yang menggunakan sensor ultrasonik untuk memantau perubahan tingkat air pada sistem berbasis LoRaWAN. Perbedaannya, pada penelitian ini pembacaan jarak permukaan air diproses bersama debit air, curah hujan, dan kecepatan angin melalui Fuzzy Mamdani. Dengan demikian, selama jarak belum berada pada kondisi Dekat, perubahan parameter pendukung masih dapat memengaruhi skor risiko berdasarkan *rule* yang aktif.

Penambahan skenario simulasi pada pengujian juga memberikan variasi kombinasi masukan yang lebih luas. Dari 25 data uji diperoleh kondisi Aman, Waspada, Siaga, dan Bahaya pada kombinasi parameter yang berbeda. Sebagai contoh, kombinasi jarak permukaan air 23,67 cm, debit 4,36 L/min, curah hujan 0,7823 mm/5s, dan kecepatan angin 1,34 m/s menghasilkan skor risiko 14,09% dengan status Aman. Pada kondisi lain, jarak 16,47 cm, debit 13,72 L/min, curah hujan

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

4,6101 mm/5s, dan kecepatan angin 4,08 m/s menghasilkan skor 74,45% dengan status Siaga. Hasil tersebut memperlihatkan respons Fuzzy Mamdani terhadap perubahan kombinasi masukan sesuai dengan fungsi keanggotaan dan *rule base* yang digunakan. Skenario simulasi pada pengujian ini digunakan untuk memperluas variasi masukan dan tidak merepresentasikan kejadian banjir aktual di lapangan.

Perhitungan manual terhadap sepuluh data menghasilkan MAPE sebesar 0,0233% dibandingkan dengan keluaran sistem. Selisih pada setiap data relatif kecil dan tidak menyebabkan perubahan status. Pada data pertama, misalnya, perhitungan manual menghasilkan skor 62,8182%, sedangkan sistem menghasilkan 62,83%, dan kedua nilai tersebut berada pada kondisi Siaga. Nilai MAPE yang rendah menunjukkan adanya kesesuaian antara hasil perhitungan Fuzzy Mamdani secara manual dan hasil implementasi pada sistem. Namun, nilai tersebut digunakan untuk memverifikasi konsistensi implementasi proses fuzzifikasi, inferensi, agregasi, dan defuzzifikasi, bukan sebagai ukuran akurasi sistem dalam mendeteksi kejadian banjir sebenarnya. Hal ini berbeda dengan penelitian [7] yang telah melakukan implementasi sistem pada kondisi nyata dan mengevaluasi kinerja komunikasinya menggunakan parameter seperti RSSI, SNR, PDR, dan *delay*. Oleh karena itu, hasil MAPE pada penelitian ini dibatasi sebagai ukuran kesesuaian implementasi perhitungan Fuzzy Mamdani pada prototipe.

Data hasil pengolahan selanjutnya diteruskan melalui Firebase Realtime Database dan MQTT, sedangkan Telegram Bot digunakan untuk menampilkan nilai keempat sensor, skor risiko, dan status kepada pengguna. Penggunaan Telegram sebagai media penyampaian informasi juga diterapkan oleh [17] pada sistem peringatan dini banjir berbasis *wireless sensor network*. Penelitian tersebut menggunakan sensor ultrasonik untuk pemantauan kondisi air dan Telegram Bot sebagai salah satu media penyampaian peringatan. Pada penelitian ini, informasi yang dikirim melalui Telegram berasal dari hasil pengolahan empat parameter menggunakan Fuzzy Mamdani sehingga pengguna menerima data sensor, skor risiko, dan kategori kondisi dalam satu pesan. Integrasi tersebut memungkinkan hasil pengolahan pada Raspberry Pi 5 diteruskan kepada pengguna melalui jaringan tanpa memerlukan pemantauan langsung pada perangkat.

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu, terdapat perbedaan pada konfigurasi parameter, metode pengolahan, dan media penyampaian informasi yang digunakan. [8] mengombinasikan beberapa parameter lingkungan dengan logika fuzzy dalam sistem berbasis AIoT, sedangkan [7] menggunakan pemantauan tingkat air dan LoRaWAN untuk mendukung sistem pemantauan dan peringatan banjir. [6] menggunakan beberapa parameter lingkungan, termasuk curah hujan dan kecepatan angin, dengan Fuzzy Mamdani, sementara [17] memanfaatkan Telegram Bot sebagai media penyampaian peringatan. Pada penelitian ini, empat parameter berupa jarak permukaan air, debit air, curah hujan, dan kecepatan angin diproses menggunakan Fuzzy Mamdani untuk menghasilkan skor risiko 0–100%, kemudian hasil pengolahan diintegrasikan dengan Firebase Realtime Database, MQTT, dan Telegram Bot. Perbedaan konfigurasi tersebut menjadi karakteristik sistem yang dikembangkan pada penelitian ini tanpa mengubah prinsip dasar sistem peringatan dini berbasis IoT yang telah digunakan pada penelitian sebelumnya.

Pengujian pada penelitian ini masih berada pada tingkat prototipe dengan menggunakan data pembacaan sensor dan skenario simulasi untuk memperluas variasi kondisi masukan. Fungsi keanggotaan dan *rule base* juga disusun berdasarkan rentang parameter yang diterapkan pada prototipe. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh belum dapat digunakan untuk menyatakan kemampuan prediksi maupun akurasi deteksi terhadap kejadian banjir sebenarnya di lapangan. Pengujian pada lokasi rawan banjir dengan periode pengamatan yang lebih panjang masih diperlukan untuk mengevaluasi fungsi keanggotaan dan *rule base* berdasarkan karakteristik lingkungan yang sebenarnya. Pengujian tersebut juga diperlukan untuk mengevaluasi kestabilan komunikasi, penyimpanan data, serta penyampaian notifikasi ketika sistem digunakan dalam kondisi operasional.

5 Kesimpulan

Penelitian ini telah menghasilkan prototipe sistem deteksi dini banjir berbasis IoT yang menggunakan empat parameter, yaitu jarak permukaan air, debit air, curah hujan, dan kecepatan angin. Dari proses kalibrasi diperoleh MAPE sebesar 0,713% pada sensor ultrasonik, 1,043% pada anemometer, 4,185% pada *rain gauge*, dan 4,553% pada *flow sensor*. Data dari keempat sensor selanjutnya diproses menggunakan Fuzzy Mamdani untuk menghasilkan skor risiko dengan empat

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

kondisi, yaitu Aman, Waspada, Siaga, dan Bahaya. Perbandingan terhadap sepuluh data menunjukkan bahwa hasil perhitungan manual dan sistem memiliki MAPE sebesar 0,0233%, dengan kategori kondisi yang sama pada seluruh data yang diuji.

Prototipe yang dibangun juga telah terintegrasi dengan Firebase Realtime Database, MQTT, dan Telegram Bot. Data hasil monitoring dapat disimpan pada Firebase dan dikirim melalui MQTT, sedangkan nilai sensor, skor risiko, dan status banjir dapat diterima pengguna melalui Telegram Bot. Pengujian pada penelitian ini masih dilakukan pada prototipe, sehingga pengembangan berikutnya dapat diarahkan pada pengujian di kondisi lapangan dengan periode pengamatan yang lebih panjang untuk menyesuaikan fungsi keanggotaan dan *rule base* dengan karakteristik lingkungan sebenarnya.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia melalui Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat atas dukungan dana yang diberikan untuk pelaksanaan penelitian ini. Penelitian ini memperoleh hibah Penelitian Dosen Pemula pada Tahun Anggaran 2026. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Bumigora atas bantuan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian.

Referensi

[1] Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), "Data Bencana Nasional Indonesia 2024," 2024.

[2] U. O. for D. R. Reduction; and W. M. Organization, "*Global Status of Multi-Hazard Early Warning Systems*," 2025.

[3] N. Byaruhanga, D. Kibirige, and S. Gokool, "*Evolution of Flood Prediction and Forecasting Models for Flood Early Warning Systems : A Scoping Review*," *Water*, Vol. 16, No. 3, pp. 1–29, 2024.

[4] A. Akbar, M. Clinton, and I. F. Ashari, "*Analysis and Implementation Monitoring Flood System based on IoT using Sugeno Fuzzy Logic*," *Komputika J. Sist. Komput.*, Vol. 12, No. 1, pp. 25–34, 2023, DOI: 10.34010/komputika.v12i1.7089.

[5] M. I. Dwiyanto, A. E. Wardoyo, and D. L. Pater, "Rancang Bangun Sistem Peringatan Dini Bencana Banjir berbasis IoT menggunakan Metode *Fuzzy Sugeno*," *J. Sist. dan Teknol. Inf. Indones.*, Vol. 10, No. 1, pp. 62–72, 2025.

[6] E. Alimudin, A. Sumardiono, and Z. Zaenurohman, "*Implementation of Fuzzy Logic for Early Warning System for Flood Disaster in Cilacap District*," *J. Ecotipe (Electronic, Control. Telecommun. Information, Power Eng.*, Vol. 12, No. 1, pp. 1–10, 2025, DOI: 10.33019/jurnalecotipe.v12i1.4529.

[7] M. I. Zakaria, W. A. Jabbar, and N. Sulaiman, "*Internet of Things and Cyber-Physical Systems Development of a Smart Sensing Unit for LoRaWAN-based IoT flood Monitoring and Warning System in Catchment Areas*," *Internet Things Cyber-Physical Syst.*, Vol. 3, No. May, pp. 249–261, 2023, DOI: 10.1016/j.iotcps.2023.04.005.

[8] W. T. Sung, I. V. Devi, and S. J. Hsiao, "*Early Warning of Impending Flash Flood based on a IoT*," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, pp. 1–18, 2022, DOI: 10.1186/s13638-022-02096-5.

[9] H. Hambali, A. Akbar, and A. Yani, "*Early Warning System for Flood in Gunungsari District based on IoT With Telegram Bot as a Warning Message Sender*," *J. Pilar Nusa Mandiri*, Vol. 18, No. 2, pp. 173–178, 2022, DOI: 10.33480/pilar.v18i2.3711.

[10] P. A. Wijaya Ariyanto and R. Soelistijadi, "Implementasi NodeMCU sebagai Sistem Deteksi Dini Bahaya Banjir di Purwodadi berbasis *Web* dengan Notifikasi Bot Telegram," *J. Teknol. dan Manaj. Inform.*, Vol. 8, No. 2, pp. 64–73, 2022, DOI: 10.26905/jtmi.v8i2.7902.

[11] A. D. Rakhman, I. K. Somawirata, and M. Ardita, "*Flood Early Warning System with Notification using Telegram Bot based on IoT System*," *J. Electr. Eng. Comput.*, Vol. 7, No. 1, pp. 206–216, 2025, DOI: 10.33650/jeecom.v7i1.10850.

[12] P. Ponukumati and S. K. Regonda, "*Press Web-Messaging-based Dissemination of Urban Rainfall and Flood Information : A Telegram Bot Framework TI TI ES*," *npj Nat. Hazards*, No.

February, pp. 1–22, 2026.

[13] K. Widya Kayohana, I. N. Switrayana, and M. Wisnu Alfiansyah, "Analisis Kebutuhan Pengembangan *Prototype* Mitigasi Bencana Banjir berbasis *Internet of Things (IoT)* di Desa Sedau," *JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform.*, Vol. 7, No. 5, pp. 3541–3548, 2024, DOI: 10.36040/jati.v7i5.7957.

[14] I. Irawan, Z. Azmi, and M. Hutasuhut, "IoT pada Sistem Monitoring Kecepatan Air Sungai Babura sebagai Peringatan Dini Banjir berbasis *Node Mcu*," *J. Sist. Komput. Triguna Dharma (JURSIK TGD)*, Vol. 3, No. 3, pp. 80–87, 2024, DOI: 10.53513/jursik.v3i3.9289.

[15] A. Adriansyah, M. H. Budiutomo, H. Hermawan, and R. I. Andriani, "*Design of Water Level Detection Monitoring System using Fusion Sensor based on Internet of Things (IoT)*," *SINERGI*, Vol. 28, No. 1, pp. 191–198, 2024.

[16] R. Kridalukmana, D. Eridani, R. Septiana, and I. P. Windasari, "*Enhancing River Flood Prediction in Early Warning Systems using Fuzzy Logic-based Learning*," *Int. J. Eng. Technol. Innov.*, Vol. 14, No. 4, pp. 434–450, 2024, DOI: 10.46604/ijeti.2024.13426.

[17] A. Wahid, J. M. Parenreng, W. Chandra, K. Kusnandar, and P. Dani, "*Telegram Bot-based Flood Early Warning System with WSN Integration*," *Ilk. J. Ilm.*, Vol. 16, No. 2, pp. 151–160, 2024.