

Prototipe Alat Pendeteksi Banjir Berbasis Mikrokontroler dengan Fuzzy Tsukamoto

Alwi Andika Panggabean^{1*}, M. Fakhri²

^{1,2} Program Studi Ilmu Komputer, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan, Indonesia

^{1*}alwi0701222056@uinsu.ac.id, ²fakhri@uinsu.ac.id

^{*}alwi0701222056@uinsu.ac.id

Abstrak—Banjir merupakan salah satu bencana alam yang sering terjadi di Indonesia dan dapat menyebabkan kerugian material maupun korban jiwa. Oleh karena itu, diperlukan sistem peringatan dini yang mampu mendeteksi potensi banjir secara cepat dan akurat. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan prototipe alat pendeteksi banjir berbasis mikrokontroler ESP32 dengan metode logika fuzzy Tsukamoto. Sistem menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mengukur ketinggian air dan sensor hujan FC-37 untuk mendeteksi intensitas curah hujan. Data dari kedua sensor diproses menggunakan metode fuzzy Tsukamoto melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi untuk menentukan status risiko banjir dalam kategori aman, siaga, dan bahaya. Hasil keputusan ditampilkan melalui LED indikator, buzzer, serta dikirimkan secara real-time melalui aplikasi Telegram menggunakan koneksi Wi-Fi pada ESP32. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan kondisi banjir sesuai dengan aturan fuzzy yang telah dirancang dan memberikan notifikasi secara otomatis kepada pengguna. Implementasi metode fuzzy Tsukamoto pada sistem ini mampu meningkatkan kemampuan pengambilan keputusan berdasarkan kondisi lingkungan yang bersifat tidak pasti. Dengan demikian, prototipe yang dikembangkan dapat digunakan sebagai sistem peringatan dini banjir yang efektif, sederhana, dan mudah diimplementasikan pada lingkungan rawan banjir.

Kata Kunci: Banjir, ESP32, Fuzzy Tsukamoto, *Internet Of Things*, Sistem peringatan dini

Abstract—Floods are among the most frequent natural disasters in Indonesia, causing significant material losses and casualties. Therefore, an early warning system capable of detecting flood potential quickly and accurately is required. This study aims to design and implement a flood detection prototype based on the ESP32 microcontroller using the Tsukamoto fuzzy logic method. The system employs an HC-SR04 ultrasonic sensor to measure water levels and an FC-37 rain sensor to detect rainfall intensity. Data collected from both sensors are processed using the Tsukamoto fuzzy logic approach through fuzzification, inference, and defuzzification stages to determine flood risk status categorized as safe, alert, and danger. The decision results are displayed through LED indicators and a buzzer, while real-time notifications are sent via the Telegram application using the ESP32 Wi-Fi connectivity. The testing results demonstrate that the system successfully classifies flood conditions according to the predefined fuzzy rules and automatically delivers notifications to users. The implementation of the Tsukamoto fuzzy logic method enhances decision-making capabilities in handling uncertain environmental conditions. Therefore, the developed prototype can serve as an effective, simple, and practical flood early warning system for flood-prone areas.

Keywords: Flood Detection, ESP32, Tsukamoto Fuzzy Logic, Internet of Things, Early Warning System.

1. PENDAHULUAN

Sebagai bencana alam yang sering melanda Indonesia, banjir membawa konsekuensi signifikan bagi masyarakat, mencakup kerugian harta benda, kerusakan infrastruktur, serta risiko korban jiwa. Pemicu utama banjir di berbagai daerah adalah curah hujan yang tinggi yang dibarengi dengan kenaikan permukaan air. Oleh sebab itu, implementasi sistem peringatan dini yang tangkas dan tepat sangat krusial untuk memberikan informasi terkait potensi banjir lebih awal, sehingga upaya mitigasi serta pencegahan dapat dilakukan masyarakat secara lebih efektif [1].

Kemajuan teknologi *Internet of Things* dan mikrokontroler telah membuka jalan bagi terciptanya sistem pemantauan lingkungan yang bersifat real-time. Penggunaan ESP32 sebagai mikrokontroler kini semakin meluas karena didukung oleh kapabilitas pemrosesan data yang handal serta konektivitas Wi-Fi yang memfasilitasi pemantauan jarak jauh [2], [3]. Dengan Integrasi sensor ultrasonik untuk memantau ketinggian air serta sensor hujan untuk mengukur curah hujan memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara otomatis dan berkesinambungan [4] [5]. Pengembangan sistem deteksi banjir yang mengintegrasikan sensor elektronik dan teknologi IoT telah dilakukan secara luas untuk mengoptimalkan pemantauan kondisi lingkungan. Sistem ini mampu mengotomatisasi pengumpulan data ketinggian air serta intensitas hujan, lalu menyalurkan informasi kepada pengguna secara cepat. Studi terdahulu membuktikan bahwa implementasi ESP32 dalam sistem deteksi

banjir dapat menyajikan data lingkungan yang akurat, sehingga sangat mendukung upaya penyebaran peringatan dini kepada masyarakat [1][6].

Namun, pengambilan keputusan dalam sistem deteksi banjir tidaklah sederhana. Sifat lingkungan yang dinamis memicu munculnya ketidakpastian data yang menyulitkan pemrosesan berbasis logika biner konvensional. Sebagai ilustrasi, kondisi lingkungan sering kali tidak dapat diklasifikasikan secara mutlak sebagai aman atau bahaya, melainkan memiliki gradasi di antara kedua status tersebut. Oleh sebab itu, dibutuhkan sebuah metode yang lebih adaptif untuk menangani ketidakpastian dan memberikan keputusan yang lebih fleksibel [7] [8]

Penerapan logika fuzzy sering menjadi pilihan utama untuk memproses data atau permasalahan yang mengandung ketidakpastian. Metode ini memberikan fleksibilitas bagi variabel untuk memiliki derajat keanggotaan dalam rentang 0 hingga 1, sehingga menghasilkan model penalaran yang lebih menyerupai pola pikir manusia [7] [9] Penerapan logika fuzzy pada sistem pendeteksi banjir memungkinkan pemrosesan berbagai parameter lingkungan, seperti ketinggian air dan intensitas curah hujan, guna menghasilkan tingkat risiko banjir yang lebih representatif terhadap kondisi di lapangan.

Beragam pendekatan logika fuzzy, seperti metode Mamdani, Sugeno, dan Tsukamoto, telah luas diaplikasikan dalam berbagai literatur. Penelitian ini mengadopsi metode fuzzy Tsukamoto karena keunggulannya dalam menghasilkan nilai keluaran yang bersifat tegas (*crisp output*) melalui proses defuzzifikasi menggunakan rata-rata tertimbang [10] [11] Di samping itu, kesederhanaan proses komputasinya menjadikan metode ini sangat efisien untuk diimplementasikan pada perangkat mikrokontroler yang memiliki keterbatasan sumber daya [12]

Sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian Rimba dkk., metode fuzzy Tsukamoto efektif dalam menangani ketidakpastian data, yang pada gilirannya meningkatkan akurasi serta presisi prediksi risiko banjir [8] Riset lain juga mengonfirmasi kemampuan metode Tsukamoto dalam mengklasifikasikan tingkat bahaya secara berjenjang, yang didasarkan pada parameter lingkungan sebagai variabel masukan sistem [12] Namun, mayoritas penelitian terdahulu cenderung hanya mengandalkan parameter ketinggian air, sehingga akurasi prediksi potensi banjir masih perlu dioptimalkan.

Menjawab tantangan tersebut, penelitian ini merancang sistem deteksi banjir dengan mengintegrasikan dua variabel kunci: level ketinggian air dan intensitas curah hujan. Data dari kedua variabel tersebut diolah dengan algoritma fuzzy Tsukamoto guna mengategorikan tingkat risiko banjir ke dalam tiga status: aman, siaga, dan bahaya. Dengan melibatkan dua parameter masukan, sistem ini diharapkan dapat menyajikan pengambilan keputusan yang lebih akurat dan andal dibandingkan metode yang terbatas pada satu parameter tunggal.

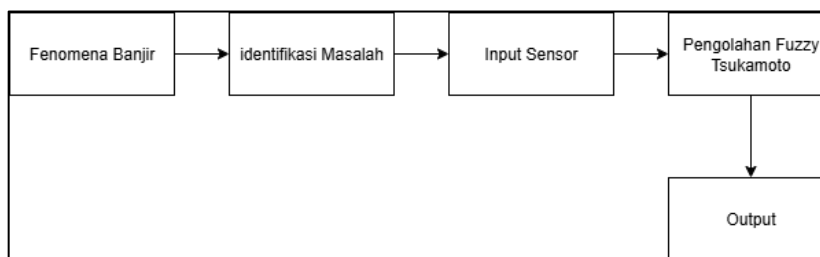
Sistem yang dibangun mengintegrasikan sensor ultrasonik HC-SR04 untuk memantau ketinggian air serta sensor hujan FC-37 guna mendeteksi intensitas curah hujan. Mikrokontroler ESP32 berfungsi sebagai pusat pengolah data dari kedua sensor dengan memanfaatkan logika fuzzy Tsukamoto. Hasil dari pemrosesan tersebut diberikan melalui indikasi lokal berupa LED dan buzzer, sekaligus dikirimkan sebagai notifikasi jarak jauh kepada pengguna melalui aplikasi Telegram [13] [14] [15]. Integrasi antara teknologi IoT dan logika fuzzy diharapkan mampu menyajikan informasi kondisi banjir kepada pengguna secara real-time.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan prototipe alat pendeteksi banjir berbasis mikrokontroler ESP32 menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mengukur ketinggian air dan sensor hujan FC-37 untuk mendeteksi intensitas hujan sebagai variabel masukan. Kedua parameter tersebut diproses menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto untuk menghasilkan klasifikasi kondisi banjir dalam kategori Aman, Waspada, dan Bahaya. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan mengevaluasi kinerja sistem dalam memberikan peringatan dini secara *real-time* melalui indikator LED, buzzer, dan notifikasi Telegram sehingga dapat menjadi solusi mitigasi banjir yang efektif, sederhana, dan mudah diimplementasikan. Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan sistem pendeteksi banjir berbasis ESP32 yang mengintegrasikan dua parameter lingkungan menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto serta menyediakan notifikasi peringatan dini secara *real-time* melalui Telegram.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Studi ini menerapkan pendekatan eksperimental untuk merancang dan mengimplementasikan sebuah prototipe sistem peringatan dini banjir yang mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 dengan logika fuzzy Tsukamoto. Sistem ini memantau potensi banjir melalui dua variabel *input* utama, yakni intensitas curah hujan dan elevasi permukaan air, yang kemudian diproses melalui inferensi fuzzy guna menetapkan kategori risiko menjadi Aman, Waspada, atau Bahaya. Seluruh alur penelitian dilaksanakan secara terstruktur, mencakup tahap identifikasi masalah hingga fase pengujian fungsionalitas sistem.



Gambar 1. Kerangka penelitian

Gambar 1 mengilustrasikan kerangka kerja yang diterapkan untuk mengembangkan sistem pendeteksi banjir. Penelitian ini dilakukan melalui tahapan sistematis yang mencakup identifikasi masalah, tinjauan pustaka, desain perangkat keras dan perangkat lunak, implementasi metode fuzzy Tsukamoto, pengujian sistem, serta analisis hasil dan penyimpulan. Kerangka kerja tersebut menjadi pedoman dalam memastikan seluruh rangkaian penelitian berjalan secara terstruktur.

2.2 Perancangan Sistem Fuzzy Tsukamoto

Logika Fuzzy merupakan metode kecerdasan buatan yang mampu menangani ketidakpastian data serta mengambil keputusan dengan pendekatan yang menyerupai cara berpikir manusia. Logika fuzzy merupakan bagian dari bidang ilmu komputer yaitu kecerdasan buatan, merupakan metode yang sangat baik dalam menangani masalah kompleks dalam hal pencarian, keputusan ataupun masalah dalam menjawab pertanyaan dan masalah kontrol [9]. Metode logika fuzzy Tsukamoto meningkatkan akurasi prediksi risiko banjir dengan menangani ketidakpastian data secara efektif dan menghasilkan nilai keluaran yang lebih presisi melalui proses defuzzifikasi berbasis aturan. Tidak seperti metode fuzzy lainnya seperti Mamdani, pendekatan Tsukamoto menghasilkan nilai keluaran yang tajam dengan menghitung rata-rata tertimbang, yang menghasilkan penilaian risiko banjir yang lebih akurat [16]. Tahap perancangan logika fuzzy diawali dengan menentukan variabel *input* dan *output* untuk sistem inferensi fuzzy. Penelitian ini menerapkan dua variabel masukan dan satu variabel keluaran.

Penggunaan metode Fuzzy Tsukamoto didasarkan pada kemampuannya dalam menghasilkan keluaran yang tegas (*crisp output*) melalui proses inferensi berbasis aturan (*rule base*), sehingga sangat sesuai untuk diimplementasikan dalam sistem pendukung keputusan berbasis mikrokontroler [11]. Kelebihan metode ini terletak pada proses komputasinya yang relatif efisien, sehingga memungkinkan implementasi pada perangkat embedded seperti ESP32. Mekanisme kerja logika fuzzy Tsukamoto melibatkan beberapa tahap sistematis. Tahap awal diawali dengan fuzzifikasi data numerik, seperti curah hujan dan debit air, menjadi kategori linguistik menggunakan fungsi keanggotaan yang monoton [17]. Implementasi ini berhasil mencapai akurasi prediksi sebesar 84,48%, sekaligus menyediakan klasifikasi tingkat bahaya secara bertingkat yang mendukung pengambilan keputusan mitigasi banjir di wilayah-wilayah rawan.

2.2.1 Variabel Input

Variabel *input* pertama, yaitu intensitas hujan, diperoleh menggunakan sensor hujan FC-37. Prinsip kerja sensor ini mengandalkan perubahan resistansi listrik yang dipicu oleh adanya air pada permukaan sensor. Data yang dihasilkan merepresentasikan tingkat kelembapan yang kemudian digunakan sebagai indikator untuk menentukan intensitas curah hujan. Variabel ini dikategorikan ke dalam tiga himpunan fuzzy, yaitu Rendah, Sedang, dan Tinggi. Sebagai variabel *input* kedua, digunakan data ketinggian air yang didapatkan melalui sensor ultrasonik HC-SR04. Sensor tersebut bekerja dengan menghitung jarak antara perangkat dengan permukaan air; semakin kecil nilai jarak yang terukur, berarti semakin tinggi level air. Data ini kemudian dikategorikan ke dalam tiga himpunan fuzzy, yaitu Aman, Waspada, dan Bahaya.

2.2.2 Variabel Output

Variabel *output* ditentukan berdasarkan pemrosesan kedua parameter *input* tersebut. Dengan mengintegrasikan data intensitas hujan dan ketinggian air, sistem mampu menghasilkan keputusan yang lebih akurat dibandingkan jika hanya menggunakan satu parameter. *Output* sistem mencakup tiga kategori status risiko banjir, yaitu Aman, Waspada, dan Bahaya.

Tabel 1. Variabel fuzzy sistem

Variabel	Himpunan fuzzy
Intensitas hujan	Rendah, sedang, tinggi
Ketinggian air	Aman, waspada, bahaya
Status resiko	Aman, waspada, bahaya

Rincian variabel fuzzy yang diaplikasikan dalam studi ini disajikan pada Tabel 1. Parameter *input* mencakup intensitas curah hujan serta ketinggian air, sementara status risiko banjir ditetapkan sebagai variabel *output*. Data-data tersebut merupakan elemen kunci dalam prosedur fuzzifikasi dan inferensi menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto.

2.3 Rule Base Fuzzy Tsukamoto

Tahapan fuzzifikasi dilakukan untuk mengonversi data sensor menjadi representasi linguistik agar dapat diproses oleh sistem logika fuzzy. Penelitian ini memanfaatkan dua variabel masukan, yaitu intensitas hujan dan ketinggian air, serta satu variabel keluaran berupa status risiko banjir.

Penyusunan basis aturan fuzzy didasarkan pada logika hubungan antara intensitas hujan dan ketinggian air. Secara sistematis, kenaikan pada kedua parameter *input* tersebut akan mengakibatkan peningkatan tingkat risiko banjir yang diidentifikasi oleh sistem.

Tabel 2. Rule base fuzzy tsukamoto

No	Intensitas hujan	Ketinggian air	Status resiko
1	Rendah	Aman	Aman
2	Rendah	Waspada	Waspada
3	Rendah	Bahaya	Bahaya
4	Sedang	Aman	Waspada
5	Sedang	Waspada	Waspada
6	Sedang	Bahaya	Bahaya
7	Tinggi	Aman	Waspada
8	Tinggi	Waspada	Bahaya
9	Tinggi	Bahaya	bahaya

Tabel 2 MERUPAKAN basis aturan yang diterapkan dalam inferensi Fuzzy Tsukamoto disajikan pada status lingkungan, yang dikategorikan menjadi Aman, Waspada, atau Bahaya, ditentukan melalui kombinasi variabel intensitas curah hujan dan ketinggian air.



Gambar 2. Flowchart Proses Fuzzy

Gambar 2 merupakan alur kerja metode Fuzzy Tsukamoto yang digunakan dalam sistem. Tahapan ini diawali dengan akuisisi data sensor, kemudian diteruskan ke tahap fuzzifikasi, evaluasi aturan, penghitungan α -predikat, dan defuzzifikasi untuk menentukan status risiko banjir.

Nilai α -predikat dalam metode Tsukamoto ditentukan dengan menerapkan operator MIN, seperti pada perumusan berikut:

$$\alpha_i = \min(\mu_A(x), \mu_B(y))$$

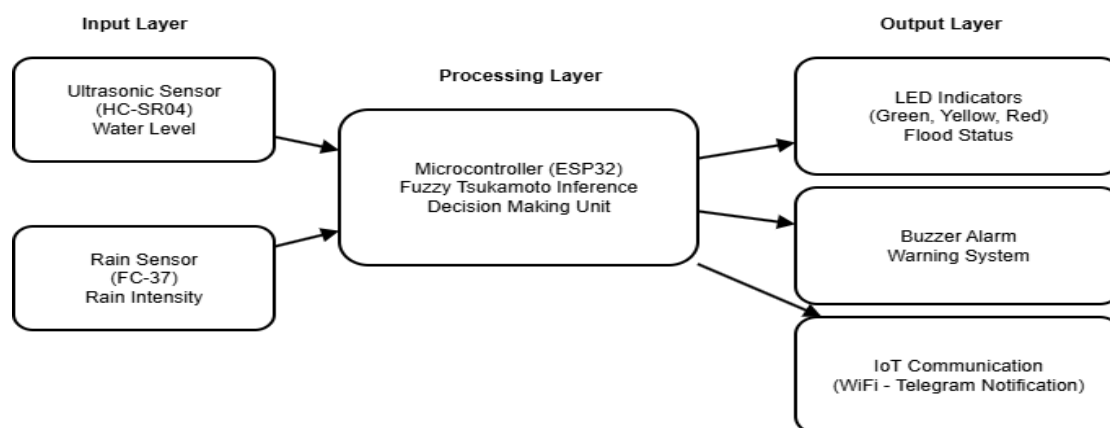
Sementara itu, nilai keluaran akhir ditentukan melalui proses defuzzifikasi dengan metode rata-rata tertimbang sebagai berikut:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i Z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}$$

2.4 Perancangan Sistem Pendeteksi Banjir

Penyusunan sistem dilakukan melalui tahapan perancangan konseptual serta implementasi perangkat keras dan perangkat lunak. Sistem ini dikembangkan untuk memproses data intensitas hujan dan ketinggian air menggunakan metode fuzzy Tsukamoto dalam menentukan tingkat risiko banjir. Desain konseptual sistem menghasilkan 3 kondisi utama:

- Aman: kondisi Ketika ketinggian air dan intensitas hujan masih berada pada batas aman.
- Waspada: kondisi Ketika salah satu parameter mulai menunjukkan peningkatan resiko banjir.
- Bahaya: kondisi kritis Ketika kombinasi ketinggian air dan intensitas hujan berada pada tingkat tertinggi.



Gambar 3 Flowchart Sistem IoT

Gambar 3 merupakan diagram alir sistem IoT pendeteksi banjir secara menyeluruh. Proses yang digambarkan meliputi inisialisasi perangkat, pembacaan data sensor, pengolahan data melalui metode Fuzzy Tsukamoto, serta diakhiri dengan pengiriman notifikasi Telegram dan aktivasi indikator berupa LED serta buzzer.

Tabel 3. Komponen Perangkat Keras

Komponen	Fungsi
ESP 32	Pengendali utama sistem
HC- SR04	Mengukur ketinggian air
Rain sensor	Mengukur intensitas hujan
Led hijau	Indicator aman
Led kuning	Indikator waspada
Led merah	Indikator bahaya
Buzzer	Alarm peringatan
Breadboard dan kabel jumper	Penghubung rangkaian
Power supply	Sumber daya sistem

Tabel 3 menjelaskan komponen perangkat keras yang digunakan beserta fungsi masing-masing. Seluruh komponen bekerja secara terintegrasi untuk memperoleh data kondisi lingkungan, memprosesnya menggunakan ESP32, serta memberikan peringatan kepada pengguna.

Implementasi sistem dilakukan dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan data sensor utama. Keluaran dari algoritma fuzzy selanjutnya dimanfaatkan untuk memicu LED indikator dan buzzer, sekaligus mengirimkan pemberitahuan secara jarak jauh melalui Telegram via koneksi Wi-Fi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Prototipe sistem peringatan dini banjir ini dikembangkan dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32 serta logika fuzzy Tsukamoto sebagai mekanisme pengambilan keputusan. Sistem ini memantau kondisi lingkungan melalui dua parameter utama, yaitu ketinggian air dan intensitas hujan. Data dari kedua sensor tersebut diolah menggunakan metode inferensi fuzzy untuk mengklasifikasikan status risiko banjir ke dalam kategori Aman, Waspada, atau Bahaya.

Implementasi sistem ini melibatkan integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak yang memungkinkan pembacaan data sensor, eksekusi inferensi fuzzy, serta penyampaian hasil secara *real-time* melalui indikator visual, peringatan suara, dan notifikasi Telegram [18].

Berdasarkan hasil pengujian, sensor ultrasonik HC-SR04 terbukti mampu mendeteksi perubahan ketinggian air secara stabil dengan tingkat deviasi yang minimal dibandingkan pengukuran aktual. Di sisi lain, sensor hujan FC-37 menunjukkan kapabilitas yang baik dalam membedakan intensitas curah hujan melalui interpretasi nilai analog pada mikrokontroler ESP32. Kinerja kedua sensor tersebut mengonfirmasi kelayakannya sebagai *input* dalam sistem pendukung keputusan berbasis logika fuzzy. Temuan ini selaras dengan penelitian Subagia dan Marodiyah terkait pengembangan sistem peringatan dini banjir berbasis ESP32, yang menunjukkan bahwa penggabungan sensor lingkungan dengan logika fuzzy dapat meningkatkan efektivitas pemantauan kondisi banjir secara *real-time* [19].

3.1 Implementasi Perangkat Keras

Implementasi perangkat keras dilakukan dengan menghubungkan seluruh komponen yang digunakan dalam sistem pendeteksi banjir. Komponen utama terdiri atas ESP32, sensor ultrasonik HC-SR04, sensor hujan FC-37, LED indikator, buzzer, serta koneksi internet untuk pengiriman notifikasi Telegram. Seluruh komponen bekerja secara terintegrasi untuk mendeteksi kondisi lingkungan dan memberikan informasi kepada pengguna secara otomatis.



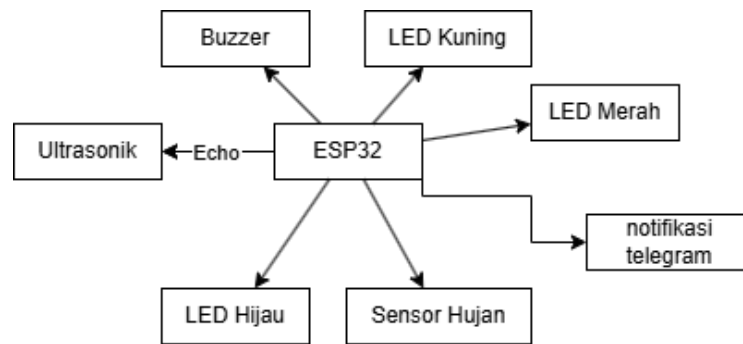
Gambar 4. Alat pendeteksi banjir

Gambar 4 merupakan hasil implementasi prototipe alat pendeteksi banjir yang telah dirakit. Seluruh komponen seperti ESP32, sensor ultrasonik, sensor hujan, LED indikator, dan buzzer dipasang menjadi satu kesatuan sistem sehingga mampu melakukan pemantauan kondisi banjir secara otomatis.

3.1.1 Implementasi ESP32

Mikrokontroler ESP32 bertindak sebagai unit pusat pemrosesan yang mengintegrasikan pembacaan data sensor, eksekusi algoritma fuzzy Tsukamoto, serta manajemen perangkat *output*. Selain itu, modul ini bertanggung jawab dalam transmisi notifikasi secara langsung melalui jaringan Wi-Fi ke aplikasi Telegram. Pemilihan ESP32 didasarkan pada kapasitas komputasinya yang memadai serta dukungan konektivitas internet terintegrasi [20].

Berbeda dengan mikrokontroler tradisional seperti Arduino Uno yang mengharuskan penggunaan modul Wi-Fi tambahan, ESP32 hadir dengan integrasi sistem yang lebih unggul, sehingga lebih efisien dalam hal perangkat keras dan konsumsi daya. Di samping itu, ESP32 menawarkan berbagai fitur *power saving mode*, yakni *Light-sleep*, *Deep-sleep*, dan *Hibernation*, yang menjadikannya sangat ideal bagi sistem pemantauan lingkungan yang menuntut efisiensi energi serta operasional jangka Panjang [21] [22].



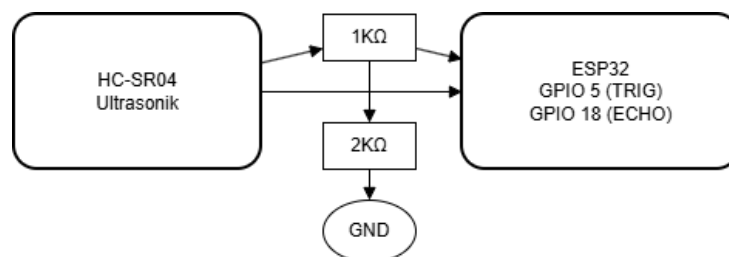
Gambar 5. Koneksi utama

Gambar 5 memperlihatkan koneksi utama antara ESP32 dengan seluruh perangkat *input* dan *output*. Konfigurasi ini memungkinkan mikrokontroler menerima data dari sensor, memprosesnya menggunakan logika fuzzy, kemudian mengaktifkan indikator serta mengirimkan notifikasi melalui Telegram.

3.1.2 Implementasi Sensor Ultrasonik

Untuk memantau ketinggian air, sensor ultrasonik HC-SR04 dimanfaatkan dengan memancarkan gelombang ultrasonik dan mengukur durasi pantulan gelombang setelah mengenai permukaan air. Durasi pantulan tersebut kemudian dikonversi menjadi informasi jarak. Dengan demikian, jarak yang terukur semakin pendek mengindikasikan level ketinggian air yang semakin meningkat [23]

Pengambilan keputusan berbasis metode fuzzy Tsukamoto pada sistem ini mengandalkan data ketinggian air dari sensor ultrasonik sebagai salah satu *input* utamanya.



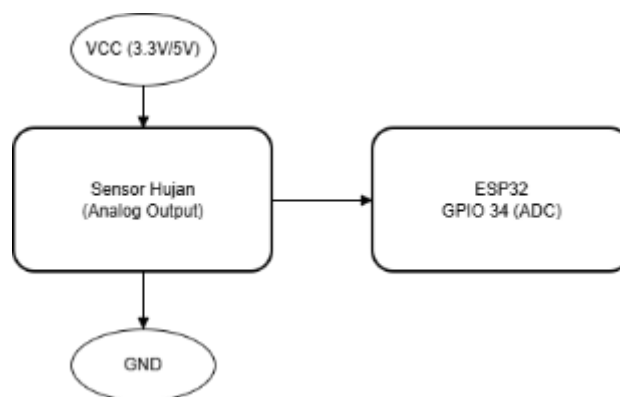
Gambar 6. Rangkaian Sensor Ultrasonik

Gambar 6 menunjukkan rangkaian sensor ultrasonik HC-SR04 yang digunakan untuk mengukur ketinggian permukaan air. Sensor bekerja dengan memanfaatkan gelombang ultrasonik sehingga mampu memberikan data jarak secara real-time kepada ESP32.

3.1.3 Implementasi Sensor Hujan

Sensor hujan FC-37 dioperasikan untuk mendeteksi intensitas curah hujan melalui pemantauan perubahan resistansi listrik pada permukaannya. Semakin tinggi jumlah air yang membasahi permukaan sensor, semakin rendah nilai resistansi yang dihasilkan, yang mengindikasikan peningkatan intensitas hujan [24]. Data ini kemudian diolah sebagai salah satu variabel *input* dalam sistem inferensi fuzzy Tsukamoto. Agar dapat digunakan sebagai *input* sistem, sensor hujan disambungkan ke pin ADC pada ESP32 sehingga nilai analognya dapat terbaca secara berkelanjutan.

Gambar 7 memperlihatkan rangkaian sensor hujan FC-37 yang digunakan untuk mendeteksi intensitas hujan berdasarkan perubahan resistansi pada permukaan sensor. Data hasil pembacaan sensor selanjutnya digunakan sebagai salah satu variabel *input* metode Fuzzy Tsukamoto.



Gambar 7. Rangkaian sensor hujan

3.2 Implementasi Perangkat Lunak

Pengembangan sisi perangkat lunak dilakukan menggunakan bahasa pemrograman C/C++ dalam lingkungan Arduino IDE. Program yang dikembangkan berfungsi untuk mengakuisisi data dari sensor, menjalankan perhitungan metode fuzzy Tsukamoto guna menentukan status risiko banjir, serta mengirimkan notifikasi ke Telegram. Tahapan proses perangkat lunak terdiri dari :

- Inisialisasi pin dan koneksi Wifi
- Pembacaan sensor ultrasonic
- pembacaan sensor hujan
- fuzzifikasi
- inferensi fuzzy
- defuzzifikasi
- pengiriman notifikasi dan aktivasi *output*.

3.3 Analisis Fuzzy Tsukamoto

Penerapan metode fuzzy Tsukamoto bertujuan untuk menetapkan status risiko banjir dengan mengombinasikan data intensitas hujan serta ketinggian air. Sistem ini dirancang dengan memanfaatkan dua variabel sebagai *input* dan menghasilkan satu variabel sebagai *output*.

Evaluasi terhadap penerapan metode Fuzzy Tsukamoto mengungkapkan kemampuannya dalam mengelola ketidakpastian data sensor melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi. Berbeda dengan sistem konvensional berbasis ambang batas (*threshold*) yang hanya mengambil keputusan berdasarkan limit tertentu, metode Fuzzy Tsukamoto memanfaatkan derajat keanggotaan (*membership degree*) pada setiap variabel [25].

Tabel 4. Rule Base Sistem

No	Curah hujan	Ketinggian air	Status
1	Rendah	Aman	Aman
2	Rendah	Siaga	Siaga
3	Rendah	Bahaya	Bahaya
4	Sedang	Aman	Siaga
5	Sedang	Siaga	Siaga
6	Sedang	Bahaya	Bahaya
7	Tinggi	Aman	Siaga
8	Tinggi	Siaga	Bahaya
9	Tinggi	Bahaya	bahaya

Tabel 4 menunjukkan *rule base* yang digunakan dalam implementasi sistem. Aturan-aturan tersebut menjadi dasar proses inferensi sehingga sistem dapat menentukan tingkat risiko banjir berdasarkan kombinasi nilai curah hujan dan ketinggian air.

Aturan-aturan tersebut menjadi landasan bagi mekanisme inferensi fuzzy. *Input* dari sensor awalnya akan dikonversi melalui tahapan fuzzifikasi guna menentukan derajat keanggotaan setiap variabel. Selanjutnya, nilai-nilai tersebut dihitung dengan operator MIN untuk menentukan firing strength bagi setiap aturan yang berlaku.

3.4 Pengujian Sistem

Sistem ini diuji untuk memvalidasi performa prototipe dalam mengidentifikasi risiko banjir melalui beragam kombinasi data ketinggian air dan curah hujan. Evaluasi dilakukan secara menyeluruh terhadap seluruh komponen perangkat keras maupun perangkat lunak.

a. Ketinggian air = 12,31

b. Intensitas hujan = 3123

berdasarkan fungsi keanggotaan yang digunakan dalam sistem :

hujan rendah: $\mu_{Rendah}(3123)=0$

hujan sedang: $\mu_{Sedang}(3123) = \frac{3500-3123}{3500-2500}$

$$\mu_{Sedang}(3123) = \frac{377}{1000} = 0,377$$

Hujan tinggi: $\mu_{Tinggi}(3123) = \frac{3123-2500}{3500-2500}$

$$\mu_{Tinggi}(3123) = \frac{623}{1000} = 0,623$$

Nilai ketinggian air diperoleh sebesar:

Aman: $\mu_{Aman}(12,31)=0$

Waspada: $\mu_{Waspada}(12,31) = \frac{15-12,31}{15-10}$

$$\mu_{Waspada}(12,31) = \frac{2,69}{5} = 0,538$$

Bahaya: $\mu_{Bahaya}(12,31) = \frac{12,31-10}{15-10}$

$$\mu_{Bahaya}(12,31) = \frac{2,31}{5} = 0,462$$

Rumus: $Z = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}$

Substitusi nilai:

$$Z = \frac{(0,377 \times 60) + (0,377 \times 80) + (0,538 \times 80) + (0,462 \times 100)}{0,377 + 0,377 + 0,538 + 0,462}$$

$$Z = \frac{22,62 + 30,16 + 43,04 + 46,20}{1,754}$$

$$Z = \frac{142,02}{1,754}$$

$$Z = 80,97$$

Tabel 5. hasil validasi perhitungan manual

Parameter	Nilai
Distance	12,31 cm
Rain	3123
Nilai fuzzy manual	80,97
Nilai sistem	63,85
Status sistem	waspada

Tabel 5 menyajikan hasil validasi antara perhitungan manual dan hasil keluaran sistem. Perbedaan nilai yang diperoleh relatif kecil sehingga menunjukkan bahwa implementasi algoritma Fuzzy Tsukamoto pada ESP32 telah berjalan sesuai dengan rancangan dan tetap menghasilkan klasifikasi status yang sama.

Perbandingan antara perhitungan manual dan hasil sistem menunjukkan adanya selisih nilai *output* fuzzy yang disebabkan oleh proses pembulatan, mekanisme implementasi fungsi keanggotaan, serta dinamisnya data sensor secara *real-time*. Meski demikian, klasifikasi akhir sistem tetap konsisten menunjukkan status Waspada, sehingga dapat disimpulkan bahwa implementasi metode Fuzzy Tsukamoto telah berjalan sesuai dengan aturan yang ditetapkan.

3.4.1 Pengujian Notifikasi Telegram

Pengujian notifikasi dilakukan untuk memastikan sistem dapat mengirimkan informasi status banjir kepada pengguna secara otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ESP32 berhasil mengirimkan notifikasi yang

akurat sesuai dengan status yang dihasilkan oleh sistem inferensi fuzzy. Pada gambar 11 memperlihatkan bahwa alat sudah berhasil terkoneksi dengan sempurna pada bot telegram.



Gambar 5. Alat berhasil terhubung pada telegram

Gambar 11 menunjukkan tampilan notifikasi Telegram yang berhasil diterima setelah ESP32 terhubung dengan jaringan internet. Notifikasi tersebut berisi informasi status kondisi banjir yang dihasilkan oleh proses inferensi Fuzzy Tsukamoto sehingga pengguna dapat memperoleh peringatan secara *real-time*.

3.5 Evaluasi Hasil Penelitian

Hasil implementasi dan pengujian mengonfirmasi bahwa sistem mampu memantau kondisi lingkungan secara efektif melalui integrasi sensor ultrasonik dan sensor hujan. Penerapan metode fuzzy Tsukamoto pada sistem ini memberikan fleksibilitas yang lebih baik dalam pengambilan keputusan dibandingkan dengan metode logika konvensional. Pemanfaatan dua parameter *input* meningkatkan akurasi sistem dalam mengidentifikasi potensi banjir, karena analisis dilakukan dengan menggabungkan data ketinggian air dan intensitas hujan. Selain itu, integrasi notifikasi Telegram memungkinkan penyampaian informasi secara *real-time*, yang secara signifikan mendukung efektivitas sistem peringatan dini. Implementasi metode Fuzzy Tsukamoto dalam penelitian ini membuktikan bahwa seluruh *rule base* dapat beroperasi sesuai rancangan. Tahap fuzzifikasi berhasil mentransformasi data numerik sensor ke bentuk linguistik, diikuti proses inferensi dengan operator MIN untuk menentukan *firing strength* pada tiap aturan [26]. Selanjutnya, defuzzifikasi menggunakan metode rata-rata tertimbang menghasilkan nilai crisp yang mendasari pengambilan keputusan. Hasil validasi menunjukkan keselarasan antara keluaran sistem dan perhitungan manual, di mana deviasi minor akibat pembulatan desimal maupun fluktuasi sensor *real-time* dinilai dapat ditoleransi karena tidak mengubah hasil klasifikasi akhir.

Penelitian Setiadi et al. (2024). penerapan metode Fuzzy Sugeno pada prototipe pendeteksi banjir berbasis ESP32 menunjukkan waktu respons sebesar 0,115 detik dengan tingkat kesalahan sensor yang minimal [27]. Berbeda dengan pendekatan tersebut, penelitian ini mengintegrasikan metode Fuzzy Tsukamoto yang menghasilkan keluaran tegas (*crisp output*) melalui mekanisme α -predikat pada setiap aturan. Metodologi ini memberikan transparansi inferensi yang lebih tinggi karena kontribusi setiap aturan terhadap keputusan akhir dapat diketahui secara eksplisit, sehingga memudahkan proses validasi melalui perhitungan manual yang dilakukan dalam penelitian ini.

4. KESIMPULAN

Studi ini berhasil mengembangkan sistem peringatan dini banjir yang mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 dengan metode Fuzzy Tsukamoto sebagai basis pengambilan keputusan. Sistem ini mengolah dua parameter utama, yakni data ketinggian air dari sensor ultrasonik HC-SR04 dan intensitas hujan dari sensor FC-37. Melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi, sistem mampu menentukan status risiko banjir dalam kategori Aman, Waspada, atau Bahaya. Berdasarkan hasil implementasi, seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak telah terintegrasi dan beroperasi secara optimal sesuai rancangan. Sensor ultrasonik terbukti mampu memantau perubahan ketinggian air secara konsisten, sementara sensor hujan secara akurat mendeteksi tingkat intensitas hujan. Data yang diperoleh dari kedua sensor kemudian diolah menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto, yang memungkinkan sistem untuk mengklasifikasikan tingkat risiko banjir berdasarkan kondisi lingkungan terkini. Hasil pengujian mengonfirmasi bahwa sistem mampu melakukan klasifikasi kondisi banjir secara tepat berdasarkan *rule base* yang telah ditetapkan. Validasi antara hasil perhitungan sistem dengan kalkulasi manual membuktikan bahwa implementasi logika metode Fuzzy Tsukamoto telah berjalan sesuai konsep. Selain itu,

sistem terbukti mampu merespons status banjir secara real-time melalui aktivasi indikator LED, buzzer, serta pengiriman notifikasi via aplikasi Telegram. Integrasi metode Fuzzy Tsukamoto dalam penelitian ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih adaptif terhadap ketidakpastian kondisi lingkungan. Dengan memanfaatkan dua parameter *input*-ketinggian air dan curah hujan-sistem mampu menghasilkan klasifikasi risiko yang lebih akurat dibandingkan pendekatan berbasis satu variabel. Hasilnya, sistem ini menawarkan solusi mitigasi bencana banjir yang tangguh, memberikan peringatan dini secara real-time, serta praktis untuk diimplementasikan di kawasan yang rentan terdampak banjir.

REFERENSI

- [1] W. A. Wicaksono and L. M. Silalahi, "Rancang Bangun Alat Pendeteksi Banjir Menggunakan Arduino Dengan Metode Fuzzy Logic," *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 11, no. 2, p. 93, 2020, doi: 10.22441/jte.2020.v11i2.005.
- [2] H. Kurnia, "IMPLEMENTASI IOT PADA SISTEM MONITORING SUHU DAN KELEMBABAN MENGGUNAKAN ESP32, FIREBASE DAN KODULAR," 2025. doi: <https://doi.org/10.36040/jati.v9i1.12874>.
- [3] M. Syahputra and A. I. Santoso, "Rancang Bangun Sistem Absensi Otomatis Berbasis RFID Dan ESP32 Di Kampus AMIK Polibisnis Perdagangan," *Jurnal Minfo Polgan*, vol. 14, no. 1, pp. 614–622, May 2025, doi: 10.33395/jmp.v14i1.14816.
- [4] S. P. Adjie, M. K. Muzhaffar, S. Adinaufal, N. Lastara, and R. Susanto, "Implementasi Alat Pendeteksi Banjir dengan Arduino Uno dan Sensor Ultrasonic pada Rumah Panggung Tradisional Suku Betawi," pp. 1129–1138, 2025.
- [5] F. Damsi and M. Alzahra, "ANALISIS KOMPARATIF EFEKTIVITAS SENSOR PADA," vol. 13, no. 3.
- [6] M. E. Denata, "Rancang Bangun Alat Pendeteksi Ketinggian Air Dan Pembuangan Air Otomatis Berbasis Arduino Uno," vol. 17, no. 1, p. 24, 2022.
- [7] A. M. Putra, T. Rismawan, and S. Bahri, "Implementasi Metode Fuzzy Tsukamoto Pada Sistem Prediksi Pembelian Barang Toko Abila Collection Berbasis Website," *Coding Jurnal Komputer dan Aplikasi*, vol. 9, no. 01, p. 152, 2021, doi: 10.26418/coding.v9i01.45903.
- [8] V. Rimba, S. Nur, B. S. Kom, M. Kom, and Z. H. Khinanti, "Implementasi Logika Fuzzy Tsukamoto Dalam Web," vol. 16, no. 1, pp. 1–5, 2025.
- [9] Hidayatullah, J. Eska, and Zulkhairani, "Analisa Sistem Deteksi Kerentanan Rawan Banjir Di Kota Perdagangan Sumatera Utara Menggunakan Logika Fuzzy Mamdani," *Journal of Science and Social Research*, vol. 4307, no. 2, pp. 1678–1684, 2025, [Online]. Available: <http://jurnal.goretanpena.com/index.php/JSSR>
- [10] Y. G. Purba and D. Avianto, "Implementasi Logika Fuzzy Tsukamoto untuk Optimasi Jumlah Produksi Es Batu Kemasan," *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, vol. 5, no. 1, pp. 119–129, 2024, doi: 10.57152/malcom.v5i1.1736.
- [11] Y. Pransiska, L. Yulianti, and J. Jumadi, "Fuzzy Tsukamoto Method in Service Satisfaction Assessment at the Village Office Tanjung Aur 1 Penerapan Metode Fuzzy Tsukamoto Dalam Penilaian Kepuasan Pelayanan Pada Kantor Desa Tanjung Aur 1," vol. 4, no. 2, pp. 129–138, 2025, doi: <https://doi.org/10.37676/jmcs.v4i2.8150>
- [12] N. Kasim, P. Angraini Aziz, and A. Hari Wibowo, "Prediksi Tingkat Kerawanan Banjir Di Kendari Menggunakan Metode Fuzzy Tsukamoto," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 9, no. 3, pp. 3784–3790, 2025, doi: 10.36040/jati.v9i3.13374.
- [13] T. Tsuchiya, H. Yu, T. Marjanov, A. Hutchings, N. Christin, and A. Cuevas, "A Large-Scale Study of Telegram Bots," Apr. 2026, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2603.24302>
- [14] R. Ramadani Ritonga, "Sistem Kontrol LED IoT Menggunakan Wi-Fi melalui Bot Telegram IoT LED Control System Implementation and Optimization Using Wi-Fi Through a Telegram Bot," *JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS ENGINEERING | COSIE*, vol. 04, no. 1, pp. 10–20, 2025, [Online]. Available: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>
- [15] Rahmi Hidayati and Teodora Fenny Aliansih, "Sistem Pemantauan Infus Berbasis IoT dengan Notifikasi Real-Time Melalui Telegram," *Jurnal PROCESSOR*, vol. 19, no. 2, Oct. 2024, doi: 10.33998/processor.2024.19.2.1843.
- [16] G. Ali, M. M. Mijwil, I. Adamopoulos, and J. Ayad, "Leveraging the Internet of Things, Remote Sensing, and Artificial Intelligence for Sustainable Forest Management," *Babylonian Journal of Internet of Things*, vol. 2025, pp. 1–65, Jan. 2025, doi: 10.58496/bjiot/2025/001.

- [17] V. Barral Vales, O. C. Fernandez, T. Dominguez-Bolano, C. J. Escudero, and J. A. Garcia-Naya, "Fine Time Measurement for the Internet of Things: A Practical Approach Using ESP32," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 19, pp. 18305–18318, Oct. 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3158701.
- [18] T. D. Hendrawati, "Sistem Peringatan Dini Banjir Berbasis Internet of Things (IoT) dengan Integrasi Multi-Sensor dan Logika Fuzzy," *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, vol. 10, no. 2, p. 131, Jan. 2026, doi: 10.31544/jtera.v10.i2.2025.131-140.
- [19] andi roy Subagia and inggit Marodiyah, "ESP32 CAM Flood Warning System with Fuzzy Logic: Sistem Peringatan Banjir ESP32 CAM dengan Logika Fuzzy," vol. 26 No. 3, no. ESP32 CAM Flood Warning System with Fuzzy Logic: Sistem Peringatan Banjir ESP32 CAM dengan Logika Fuzzy, Jul. 2025.
- [20] S. Correia, "The Internet of Things-Current Trends, Applications and Future Challenges."
- [21] S. Gunasekar, G. Pius Agbulu, and G. Joselin Retna Kumar, "A power-efficient IoT mechanism with adaptive recurrent temporal optimized convolutional learning (ARTOCL) scheme for real-time urban air quality monitoring," *Discover Internet of Things*, vol. 5, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1007/s43926-025-00173-x.
- [22] S. Sujono and M. Rusli M, "Implementasi Sistem Peringatan Banjir Dini dengan Sensor HC-SR04 Berbasis ESP32 Internet of Things," *Computer Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 41–51, Feb. 2026, doi: 10.58477/cj.v4i1.385.
- [23] J. K. S. D. T. P. A. D. B. Berbasis, E. Tinyml, and D. Notifikasi, "Prototipe Alat Deteksi Banjir Berbasis ESP32, TinyML, dan Notifikasi Telegram," 2026.
- [24] R. Khofifattuzahro Didik Hariyanto Ariesta Wulandari Ciptaningtyas Sekolah Tinggi Teknik Multimedia Internasional Malang, "DESAIN DAN IMPLEMENTASI ALARM HUJAN SEDERHANA MENGGUNAKAN RAINDROP SENSOR FC-37 BERBASIS ARDUINO UNO," vol. 12, no. 2, pp. 33–38.
- [25] Zahirulhaq, S. Nurcahyo, and I. Saukani, "Rancang Bangun Sistem Peringatan Dini dan Pencegahan Banjir pada Bendungan Menggunakan Metode Fuzzy," vol. Vol. 4 No. 1, Jan. 2025.
- [26] S. Sofyan, S. Nur Asia, M. Imam Quraisy, and I. Irfan, "Implementation of Tsukamoto Fuzzy Logic in IoT Based Dam Water Level Measuring System Using Nodemcu ESP8266," *Jurnal JEETech*, vol. 7, no. 1, pp. 14–25, Mar. 2026, doi: 10.32492/jeetech.v7i1.71002.
- [27] D. R. Setiadi, E. R. Dalimunthe, N. U. Putri, and A. Zain, "Implementasi Metode Fuzzy Sugeno Pada Prototipe Pendeteksi Banjir," 2024. doi : <https://doi.org/10.23960/elc.v18n3.2721>