



Pengembangan FMEWS Berbasis IoT dan MQTT untuk Peringatan Banjir

I Komang Darma Wiguna*, Ketut Agus Seputra, Kadek Yota Ernanda Aryanto

Fakultas Teknik dan Kejuruan, Program Studi Teknologi Rekayasa Perangkat Lunak, Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja, Indonesia

Email: ^{1,*}darma.wiguna@student.undiksha.ac.id, ²agus.seputra@undiksha.ac.id, ³yota.ernanda@undiksha.ac.id

Email Penulis Korespondensi: darma.wiguna@student.undiksha.ac.id

Abstrak—Banjir merupakan bencana yang sering menimbulkan kerugian fisik, sosial, dan ekonomi, termasuk di Kabupaten Buleleng, Bali. Permasalahan utama dalam mitigasi banjir terletak pada keterlambatan penyampaian informasi peringatan dini dan belum tersedianya platform terpusat yang mengintegrasikan data pemantauan lapangan dengan data operasional kebencanaan. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun Flood Monitoring and Early Warning System (FMEWS) berbasis Internet of Things (IoT) dengan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) untuk mendukung pemantauan banjir dan peringatan dini secara real-time. Sistem dikembangkan menggunakan model System Development Life Cycle (SDLC) Waterfall dan terdiri atas perangkat IoT, IoT Gateway, serta sistem informasi berbasis web yang mengintegrasikan monitoring ketinggian air, notifikasi peringatan dini, manajemen shelter, fasilitas publik, aduan masyarakat, dan visualisasi spasial. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi pemantauan banjir real-time berbasis IoT dengan data operasional kebencanaan dalam satu platform terpusat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa laju pengiriman data 2–5 Hz memberikan keseimbangan terbaik antara latency dan keandalan komunikasi dengan Packet Delivery Ratio (PDR) $\geq 96,67\%$. Pengujian usability terhadap 22 responden menghasilkan skor System Usability Scale (SUS) rata-rata 70,0 yang berada pada kategori Acceptable. Hasil tersebut menunjukkan bahwa FMEWS layak digunakan sebagai platform pendukung pemantauan dan peringatan dini banjir di Kabupaten Buleleng.

Kata Kunci: Banjir; IoT; MQTT; Peringatan Dini; Sistem Informasi

Abstract—Floods are disasters that frequently cause physical, social, and economic losses, including in Buleleng Regency, Bali. The main problem in flood mitigation lies in delayed early warning delivery and the absence of a centralized platform that integrates field monitoring data with operational disaster management data. This study aims to design and develop the Flood Monitoring and Early Warning System (FMEWS) based on the Internet of Things (IoT) and the Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol to support real-time flood monitoring and early warning. The system was developed using the Waterfall model of the System Development Life Cycle (SDLC) and consists of IoT devices, an IoT Gateway, and a web-based information system integrating water level monitoring, early warning notifications, shelter management, public facility management, community reports, and spatial visualization. The novelty of this study lies in integrating real-time IoT-based flood monitoring with operational disaster management data into a single centralized platform. The results show that a transmission rate of 2–5 Hz provides the best balance between latency and communication reliability, with a Packet Delivery Ratio (PDR) of at least 96.67%. Usability testing involving 22 respondents produced an average System Usability Scale (SUS) score of 70.0, which falls into the Acceptable category. These findings indicate that FMEWS is feasible as a supporting platform for flood monitoring and early warning in Buleleng Regency.

Keywords: Flood; IoT; MQTT; Early Warning; Information System

1. PENDAHULUAN

Banjir merupakan salah satu bencana alam yang paling sering menimbulkan kerugian besar di Indonesia. Data Informasi Bencana Indonesia (DIBI) mencatat bahwa sepanjang tahun 2024 terjadi 814 kejadian banjir yang mengakibatkan 191 orang meninggal dunia, 32 orang hilang, dan lebih dari 4 juta orang terdampak (DIBI, 2024). Tingginya angka tersebut menunjukkan bahwa upaya mitigasi dan peringatan dini banjir di Indonesia masih memerlukan penguatan yang signifikan. Di Kabupaten Buleleng, Bali, ancaman banjir juga menjadi perhatian serius karena sebanyak 78 desa dan kelurahan di sembilan kecamatan dikategorikan sebagai wilayah rawan banjir bandang oleh Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Buleleng (A. H. Ahmad Muzakky Alhasan, 2023). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa banjir tidak hanya menjadi persoalan nasional, tetapi juga merupakan ancaman nyata di tingkat daerah. Contoh konkretnya terjadi pada banjir bandang di Desa Sumberklampok, Kecamatan Gerokgak, pada Januari 2025 yang datang tanpa peringatan dini sehingga menyebabkan kerusakan pada 30 rumah dan menimbulkan kerugian material yang cukup besar (Wadrianto et al., 2025). Peristiwa ini mempertegas bahwa keterlambatan deteksi dan penyampaian informasi banjir dapat memperbesar risiko korban jiwa maupun kerugian material.

Permasalahan utama dalam mitigasi banjir saat ini terletak pada masih dominannya sistem pemantauan manual dan belum tersedianya platform terpusat yang mampu mengintegrasikan data pemantauan lapangan dengan data pendukung operasional kebencanaan. Dalam situasi seperti ini, proses pengambilan keputusan sering menjadi lambat karena data tersebar dan tidak tersaji secara *real-time*. Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) membuka peluang untuk mengatasi masalah tersebut melalui pemantauan kondisi lingkungan secara otomatis, berkelanjutan, dan terhubung melalui jaringan komunikasi data (Gitakarma et al., 2024). Namun, implementasi IoT dalam sistem pemantauan banjir memerlukan protokol komunikasi yang ringan, efisien, dan andal karena perangkat lapangan umumnya memiliki keterbatasan daya, bandwidth, dan kapasitas pemrosesan. Protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) menjadi salah satu solusi yang relevan karena dirancang untuk komunikasi *publish-subscribe* dengan *overhead* paket yang rendah dan konsumsi sumber daya yang kecil, sehingga sesuai untuk lingkungan



komunikasi IoT yang dinamis (Wibowo & Zain, 2021). Keandalan MQTT untuk kebutuhan pemantauan banjir juga didukung oleh hasil evaluasi performa yang menunjukkan kemampuan protokol ini dalam menjaga latensi rendah dan efisiensi *bandwidth* pada sistem pemantauan banjir berbasis IoT (Kertiasih et al., 2024).

Berbagai penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa IoT dan MQTT memiliki potensi besar dalam mendukung pengembangan sistem pemantauan dan peringatan dini banjir. Penelitian (Ramadhan & Triono, 2020) serta (Rosadi et al., 2022) menunjukkan bahwa perangkat mikrokontroler dan sensor dapat dimanfaatkan untuk memantau ketinggian air secara otomatis, tetapi sistem yang dikembangkan masih lebih berorientasi pada fungsi teknis pemantauan dasar. Pengembangan lain oleh (Aji & Nurwasito, 2023) telah memanfaatkan MQTT untuk mendukung pengiriman data sensor sekaligus notifikasi peringatan dini, namun belum menyediakan dashboard operasional yang komprehensif. (Putra et al., 2025) melengkapi pendekatan tersebut melalui sistem monitoring berbasis website yang dapat digunakan instansi pemerintah untuk memantau kondisi banjir secara *real-time*, tetapi belum mengintegrasikan data pendukung kebencanaan seperti shelter, fasilitas publik, dan laporan masyarakat. Di sisi lain, (Finni Alvionita & Yuwanda Purnamasari Pasrun, 2025) mengembangkan sistem informasi kebencanaan berbasis web, sedangkan (Muhendra & Solihin, 2022) mengembangkan sistem pemantauan potensi banjir online berbasis IoT, namun keduanya masih berfokus pada fungsi manajemen data dan belum menggabungkan pemantauan sensor *real-time* dengan kebutuhan operasional kebencanaan secara menyeluruh. Pendekatan spasial juga telah dikembangkan melalui integrasi Web GIS dengan data kebencanaan untuk mendukung pemetaan potensi banjir secara lebih komprehensif (Ony Andewi et al., 2025). Selain itu, pemanfaatan teknologi geospasial untuk edukasi kebencanaan juga telah diperlihatkan melalui simulasi banjir berbasis ARCore *Geospatial* yang menunjukkan pentingnya dukungan informasi spasial dalam konteks kesiapsiagaan bencana (Dhananjaya, 2026). Meskipun demikian, keterhubungan langsung antara data sensor IoT *real-time* dengan data operasional kebencanaan dan visualisasi spasial dalam satu platform terpusat masih belum banyak ditemukan.

Berdasarkan sintesis penelitian terdahulu tersebut, terlihat adanya celah penelitian yang cukup jelas. Sebagian besar penelitian masih menitikberatkan pada salah satu aspek secara terpisah, seperti pemantauan ketinggian air, pengiriman notifikasi, penyediaan *dashboard*, manajemen data kebencanaan, atau visualisasi spasial. Padahal, dalam praktik penanganan bencana, instansi seperti BPBD membutuhkan sistem yang tidak hanya mampu menampilkan kondisi ketinggian air secara *real-time*, tetapi juga menyediakan data pendukung yang relevan untuk pengambilan keputusan secara cepat dan akurat. Data tersebut meliputi informasi shelter pengungsian, fasilitas publik, laporan aduan masyarakat, serta visualisasi kondisi wilayah terdampak dalam satu platform yang terintegrasi. Ketiadaan integrasi ini menyebabkan banyak sistem yang ada masih berfungsi sebagai alat pemantauan teknis semata dan belum sepenuhnya mendukung kebutuhan operasional kebencanaan. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem yang mampu menjembatani pemantauan lapangan berbasis IoT dengan pengelolaan data operasional kebencanaan dalam satu lingkungan sistem informasi yang terpusat.

Penelitian ini mengembangkan *Flood Monitoring and Early Warning System* (FMEWS), yaitu sistem informasi peringatan risiko banjir berbasis IoT dengan protokol MQTT yang dirancang untuk mengintegrasikan pemantauan ketinggian air secara *real-time*, notifikasi peringatan dini otomatis, manajemen shelter pengungsian, pengelolaan fasilitas publik, laporan aduan masyarakat, dan visualisasi spasial berbasis peta interaktif dalam satu platform. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi antara monitoring banjir *real-time* berbasis IoT dan data operasional kebencanaan yang sebelumnya cenderung dikembangkan secara terpisah. Dengan pendekatan tersebut, FMEWS tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan teknis, tetapi juga sebagai sistem pendukung pengambilan keputusan bagi instansi kebencanaan sekaligus media informasi bagi masyarakat. Penelitian ini memiliki tiga kontribusi utama, yaitu pengembangan platform monitoring banjir terintegrasi berbasis IoT dan MQTT, evaluasi performa komunikasi data menggunakan parameter *latency*, *throughput*, *Packet Loss Rate* (PLR), *Packet Delivery Ratio* (PDR), dan *availability*, serta penyediaan visualisasi spasial berbasis peta interaktif untuk mendukung kebutuhan operasional BPBD. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun FMEWS berbasis IoT dengan protokol MQTT, mengimplementasikan mekanisme peringatan dini banjir yang terintegrasi, serta mengevaluasi performa komunikasi data dan tingkat kebergunaan sistem sebagai platform pemantauan dan pendukung mitigasi banjir di Kabupaten Buleleng.

2. METODOLOGI PENELITIAN

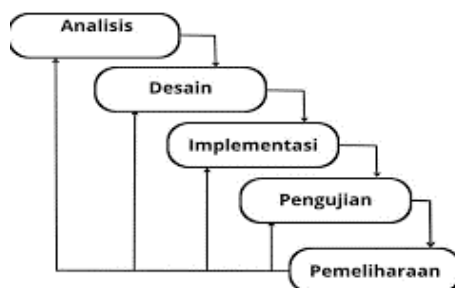
2.1 Kerangka Dasar Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian pengembangan sistem (*research and development*) yang bertujuan merancang, membangun, dan mengevaluasi sistem informasi peringatan risiko banjir berbasis *Internet of Things* (IoT). Penelitian dilaksanakan di Kampus Tengah Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja, Kabupaten Buleleng, Bali, pada periode Juni sampai November 2025 dengan melibatkan BPBD Kabupaten Buleleng sebagai mitra dalam identifikasi kebutuhan sistem. Pemilihan lokasi didasarkan pada kondisi Kabupaten Buleleng yang memiliki tingkat kerawanan banjir cukup tinggi sehingga membutuhkan dukungan sistem pemantauan dan peringatan dini yang lebih terintegrasi (A. H. Ahmad Muzakky Alhasan, 2023). Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan dan wawancara dengan pihak BPBD Buleleng untuk menggali kebutuhan fungsional dan nonfungsional sistem. Data sekunder diperoleh dari laporan resmi kebencanaan, literatur ilmiah, dan penelitian

terdahulu yang relevan dengan pemantauan banjir berbasis IoT, protokol MQTT, dan sistem informasi kebencanaan (Gitakarma et al., 2024). Sistem yang dikembangkan diberi nama *Flood Monitoring and Early Warning System* (FMEWS), yang terdiri atas perangkat IoT, IoT Gateway, dan sistem informasi berbasis web yang terintegrasi. Evaluasi sistem dilakukan melalui pengujian teknis dan pengujian pengguna. Pengujian usability menggunakan *System Usability Scale* (SUS) melibatkan 22 responden yang dipilih secara *purposive sampling* berdasarkan keterwakilan calon pengguna sistem dari berbagai latar belakang. Pelibatan responden yang beragam dimaksudkan untuk memperoleh gambaran awal tingkat kebergunaan sistem pada kelompok pengguna dengan tingkat familiaritas teknologi yang berbeda. Pendekatan ini sejalan dengan praktik evaluasi usability pada sistem informasi yang menempatkan umpan balik pengguna nyata sebagai dasar penilaian kualitas penggunaan sistem secara awal (Aiswarya et al., 2026).

2.2 Tahapan Penelitian

Pengembangan FMEWS menggunakan pendekatan *System Development Life Cycle* (SDLC) dengan model *Waterfall*. Model ini dipilih karena kebutuhan sistem telah diidentifikasi sejak awal melalui observasi dan wawancara bersama mitra, sehingga ruang lingkup pengembangan dapat didefinisikan dengan cukup jelas. Dalam penelitian ini, Waterfall digunakan sebagai kerangka kerja yang mendukung proses pengembangan sistem secara terstruktur mulai dari analisis hingga pemeliharaan (Qolbi et al., 2024). Tahap pertama adalah mengidentifikasi masalah, kebutuhan pengguna, dan kebutuhan sistem berdasarkan kondisi lapangan serta proses operasional kebencanaan di BPBD Buleleng. Tahap kedua adalah desain, yang mencakup perancangan arsitektur sistem, basis data, alur komunikasi data MQTT, dan rancangan antarmuka pengguna. Tahap ketiga adalah implementasi, yaitu merealisasikan rancangan menjadi prototipe FMEWS yang terdiri atas perangkat IoT, IoT Gateway, dan sistem informasi berbasis web. Komunikasi antarkomponen diimplementasikan menggunakan MQTT karena protokol ini ringan dan sesuai untuk lingkungan IoT dengan keterbatasan sumber daya (Wibowo & Zain, 2021). Tahap keempat adalah pengujian, yang dilakukan untuk memastikan setiap komponen dan keseluruhan sistem sesuai rancangan. Tahap terakhir adalah pemeliharaan, yaitu pemantauan, dokumentasi, dan penyesuaian minor setelah pengujian dilakukan. Alur tahapan penelitian ini disajikan pada Gambar 1, yang menunjukkan hubungan antara analisis, desain, implementasi, pengujian, dan pemeliharaan dalam pengembangan FMEWS.



Gambar 1. Diagram Alur Tahapan Penelitian

2.3 Metode Pengujian

Pengujian *device* IoT dilakukan untuk memastikan seluruh komponen perangkat keras berfungsi sesuai spesifikasi. Pengujian ini mencakup kalibrasi dan validasi akurasi empat sensor, yaitu JSN-SR04T, DHT22, raindrop sensor, dan GPS U-blox Neo-6M, serta verifikasi konektivitas perangkat ESP32 ke jaringan WiFi dan broker MQTT HiveMQ. Keberhasilan pengujian ditandai dengan diterimanya payload JSON dari perangkat pada topic MQTT yang telah ditentukan serta tampilnya data pada *dashboard* monitoring secara real-time. Pengujian unit backend difokuskan pada verifikasi fungsi individual dari delapan modul utama sistem Laravel, yaitu autentikasi pengguna, manajemen perangkat IoT, command dan kontrol IoT, *webhook* IoT, *firmware* dan *over-the-air* (OTA), manajemen shelter, manajemen fasilitas publik, serta aduan masyarakat. Setiap modul diuji berdasarkan skenario yang mencakup kondisi normal maupun kondisi tepi (*edge case*). Pengujian integrasi *blackbox* dilakukan untuk memverifikasi alur data *end-to-end* antar seluruh modul sistem. Pengujian ini mengacu pada activity diagram yang menggambarkan alur operasional sistem, mulai dari pengiriman data oleh perangkat IoT hingga interaksi pengguna dengan modul pendukung. Fokus pengujian adalah kesesuaian keluaran sistem terhadap kebutuhan fungsional tanpa memperhatikan detail implementasi internal.

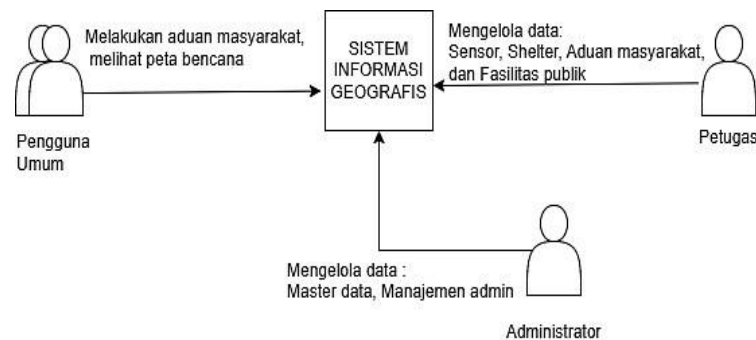
Pengujian performa MQTT dilaksanakan dengan mengacu pada metodologi sebelumnya (Sonklin & Sonklin, 2024), menggunakan script otomatis berbasis *Python* sebagai *publisher* dan *subscriber* dalam arsitektur *publish-subscribe*. Pengujian menerapkan empat variasi laju pengiriman pesan, yaitu 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, dan 10 Hz, yang masing-masing menggunakan QoS level 0 (*at most once delivery*) untuk merepresentasikan kondisi komunikasi ringan dan *real-time* yang umum pada sistem IoT peringatan dini. Setiap skenario diulang sebanyak 30 kali untuk memperoleh nilai rata-rata yang lebih stabil secara statistik. Parameter yang diukur meliputi *latency*, *throughput*, *Packet Loss Rate* (PLR), *Packet Delivery Ratio* (PDR), dan *availability*. *User Acceptance Testing* (UAT) dilakukan oleh pengguna akhir dari BPBD Buleleng dan masyarakat umum dengan menjalankan skenario penggunaan yang merepresentasikan aktivitas nyata, meliputi proses login, pemantauan ketinggian air, pengelolaan perangkat IoT, manajemen data shelter, akses peta

interaktif, hingga pengelolaan laporan masyarakat. Keberhasilan UAT diukur dari terpenuhinya seluruh skenario sesuai spesifikasi fungsional yang telah ditetapkan. Pengujian System Usability Scale (SUS) menggunakan instrumen standar yang terdiri atas 10 pernyataan dengan skala Likert 1–5 untuk menilai persepsi pengguna terhadap kemudahan penggunaan sistem (Brooke, 1986). Pendekatan ini banyak digunakan dalam evaluasi usability sistem informasi karena mampu memberikan gambaran cepat mengenai tingkat penerimaan dan kemudahan penggunaan sistem oleh pengguna akhir (Diani et al., 2026; Putra et al., 2023).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

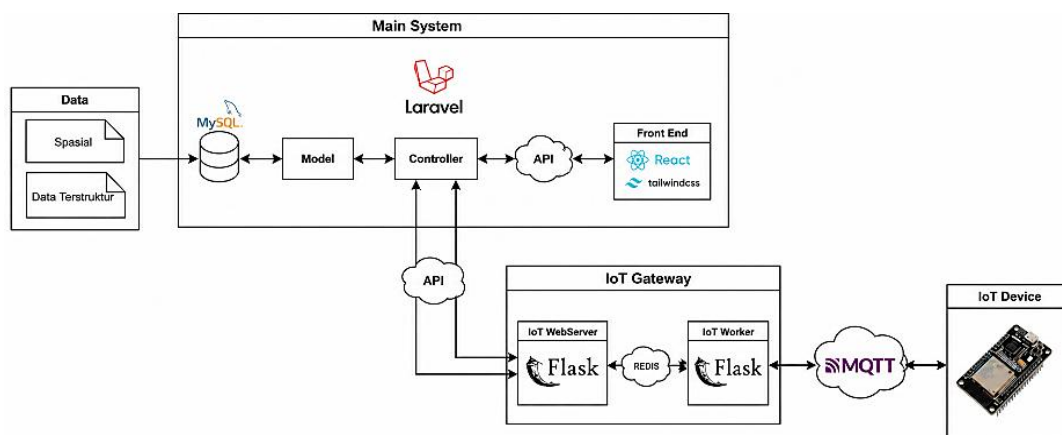
3.1 Desain Sistem

Berdasarkan analisis kebutuhan yang dilakukan bersama pihak BPBD Singaraja, sistem FMEWS dirancang untuk melayani tiga aktor utama dengan hak akses yang berbeda, yaitu masyarakat, petugas BPBD, dan administrator. Masyarakat memperoleh akses publik terbatas untuk mengirimkan laporan kejadian bencana dan memantau kondisi terkini melalui peta interaktif. Petugas BPBD memiliki akses operasional untuk mengelola perangkat IoT, memantau data ketinggian air secara *real-time* maupun historis, serta mengelola data shelter, fasilitas publik, dan laporan masyarakat. Administrator memiliki hak akses tertinggi untuk pengelolaan data master dan manajemen akun petugas. Rancangan umum sistem yang memperlihatkan hubungan antaraktor dan komponen utama disajikan pada Gambar 2. Gambar tersebut menunjukkan bahwa FMEWS dirancang sebagai sistem terpusat yang menghubungkan pengguna, perangkat IoT, layanan pemrosesan data, dan antarmuka informasi dalam satu alur kerja terpadu. Pembagian hak akses pada tiga aktor utama dilakukan untuk memastikan bahwa setiap pengguna memperoleh fungsi sesuai kebutuhannya, sehingga sistem dapat melayani kebutuhan operasional instansi kebencanaan sekaligus kebutuhan informasi publik.



Gambar 2. Rancangan Umum Sistem

Arsitektur sistem dirancang dalam tiga lapis terpisah secara fungsional, yaitu lapisan perangkat IoT, lapisan pemrosesan data, dan lapisan presentasi. Lapisan perangkat IoT mencakup ESP32, sensor, broker MQTT, dan *gateway*, yang berfungsi sebagai sumber dan saluran awal data lapangan. Lapisan pemrosesan mencakup backend Laravel serta basis data MySQL dan InfluxDB untuk mengelola data transaksional maupun data deret waktu. Lapisan presentasi mencakup *frontend* ReactJS yang menyajikan data kepada pengguna. Arsitektur sistem disajikan pada Gambar 3.



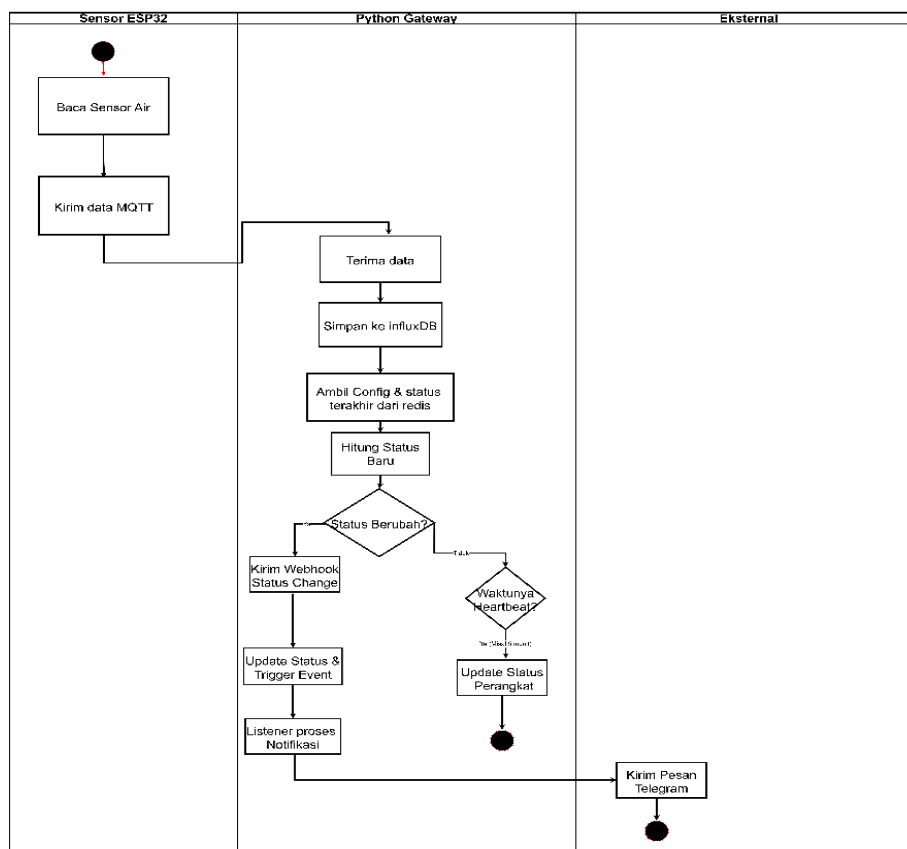
Gambar 3. Arsitektur Sistem

Gambar 3 memperlihatkan bahwa pemisahan arsitektur ke dalam tiga lapis dipilih untuk memudahkan integrasi, pemeliharaan, dan pengembangan sistem. Data sensor dari lapangan diteruskan melalui MQTT untuk diproses secara cepat pada lapisan pemrosesan, kemudian disajikan kembali kepada pengguna melalui antarmuka web. Komunikasi real-time antara server dan klien difasilitasi oleh Socket.IO melalui Redis Pub/Sub, sehingga pembaruan *dashboard* dapat berlangsung otomatis tanpa *reload* halaman. Pendekatan ini sejalan dengan temuan bahwa integrasi visualisasi

spasial dan data kebencanaan dapat meningkatkan kualitas informasi bagi pemangku kepentingan (Ony Andewi et al., 2025). Selain mendukung pemantauan data ketinggian air, desain sistem juga mengintegrasikan mekanisme peringatan dini otomatis berbasis ambang batas. Ketika data sensor menunjukkan perubahan status yang melampaui batas yang telah dikonfigurasi, sistem menghasilkan notifikasi melalui Telegram kepada pihak BPBD dan pengguna yang berlangganan. Dengan demikian, desain sistem FMEWS tidak hanya berorientasi pada pemantauan teknis, tetapi juga pada dukungan pengambilan keputusan operasional dalam konteks mitigasi banjir.

3.2 Implementasi Sistem

Implementasi FMEWS dilakukan dengan merealisasikan rancangan sistem ke dalam tiga komponen utama, yaitu perangkat IoT, IoT Gateway, dan sistem informasi utama berbasis web. Perangkat IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk membaca data dari empat sensor, kemudian mengirimkannya dalam format JSON melalui topik MQTT `iot/waterlevel`. Payload data mencakup `device_id`, `water_level`, `distance`, `latitude`, `longitude`, `status_hujan`, `fw_version`, `rssi`, dan `timestamp`. Pengiriman dilakukan secara periodik dengan interval yang dapat dikonfigurasi melalui antarmuka sistem. Implementasi ini menunjukkan bahwa perangkat IoT tidak hanya berfungsi sebagai pengumpul data lapangan, tetapi juga sebagai titik awal integrasi informasi *real-time* dalam keseluruhan arsitektur FMEWS. Pemilihan format JSON dilakukan karena lebih ringkas, mudah diurai, dan kompatibel dengan komponen lain dalam sistem. Dengan pendekatan ini, data dari perangkat dapat diproses secara konsisten oleh gateway dan sistem utama. IoT Gateway berbasis Flask berfungsi sebagai *smart gateway* yang tidak hanya meneruskan data, tetapi juga melakukan pemrosesan awal. Proses tersebut mencakup validasi perangkat melalui *whitelist* di Redis, kalkulasi status ketinggian air berdasarkan empat level peringatan, serta mekanisme heartbeat untuk memantau keaktifan perangkat. Ketika terjadi perubahan status level, gateway mengirimkan *webhook* ke *backend* Laravel yang kemudian memicu pengiriman notifikasi Telegram secara otomatis. Alur logika deteksi dan peringatan dini ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Activity Diagram Deteksi dan Peringatan Dini

Gambar 4 tersebut memperlihatkan bahwa mekanisme peringatan dini pada FMEWS dibangun melalui alur berjenjang, mulai dari pembacaan sensor, pengiriman data, validasi, klasifikasi status, hingga distribusi notifikasi. Alur ini penting karena memastikan bahwa notifikasi tidak dikirim hanya berdasarkan data mentah, tetapi berdasarkan hasil pemrosesan yang telah melalui logika sistem. Dengan demikian, implementasi sistem tidak hanya menitikberatkan pada komunikasi data, tetapi juga pada pengendalian kualitas keputusan otomatis yang dihasilkan.

Dalam pengembangan FMEWS, sejumlah teknologi dipilih sesuai kebutuhan fungsional dan nonfungsional sistem. Daftar teknologi yang digunakan disajikan pada Tabel 1, yang menunjukkan bahwa sistem dikembangkan menggunakan kombinasi kerangka kerja web, basis data relasional dan *time-series*, protokol komunikasi ringan, serta



pustaka visualisasi antarmuka. Pemilihan teknologi tersebut dilakukan untuk mendukung kebutuhan pemantauan *real-time*, pengelolaan data operasional kebencanaan, dan kemudahan interaksi pengguna melalui antarmuka yang responsif.

Tabel 1. Adopsi Teknologi

No	Nama Teknologi	Fungsi
1	Laravel 12 (PHP)	Kerangka kerja <i>PHP</i> untuk logika bisnis utama, menangani manajemen pengguna, registrasi perangkat IOT, manajemen data <i>shelter</i> /fasilitas, dan menyediakan <i>RESTful API</i> .
2	Python (Flask)	Layanan mikro independen untuk pemrosesan data sensor berkecepatan tinggi, menerima pesan MQTT, memvalidasi perangkat, mendeteksi anomali (banjir), dan mengirim data ke <i>InfluxDB</i> serta <i>WebSocket</i> .
3	React.js (Vite)	Pustaka <i>JavaScript</i> berbasis komponen untuk membangun <i>User Interface (UI)</i> yang interaktif, digunakan untuk membuat <i>Single Page Application (SPA)</i> pada Peta Publik dan <i>Dashboard Admin</i> .
4	MySQL/MariaDB	<i>Database</i> utama untuk menyimpan data terstruktur yang memiliki relasi, seperti profil pengguna, konfigurasi perangkat, data <i>shelter</i> , laporan bencana, dan <i>log</i> aktivitas sistem.
5	InfluxDB	<i>Database</i> yang dioptimalkan untuk menyimpan data berurut waktu (<i>timestamped data</i>), digunakan untuk menyimpan jutaan titik data ketinggian air (<i>water level logs</i>) agar pembacaan grafik riwayat tetap cepat.
6	Redis	Penyimpanan data berbasis <i>RAM</i> yang cepat, berfungsi sebagai: 1. <i>Caching</i> untuk validasi data sensor. 2. <i>Pub/Sub</i> sebagai jembatan komunikasi <i>real-time</i> antara <i>worker</i> pemroses data dan <i>WebSocket server</i> .
7	MQTT (Hivemq)	Protokol komunikasi ringan berbasis <i>publish-subscribe</i> untuk pengiriman data telemetri dari perangkat keras (ESP32) ke <i>server</i> , dipilih karena efisiensinya pada jaringan dengan <i>bandwidth</i> rendah atau tidak stabil.
8	Socket.IO	<i>Library</i> yang memungkinkan komunikasi dua arah secara <i>real-time</i> antara <i>server</i> dan <i>browser</i> klien, digunakan untuk visualisasi pergerakan grafik air secara langsung (<i>live</i>) dan notifikasi bahaya.
9	Leaflet.js (React-Leaflet)	Pustaka <i>JavaScript</i> open-source untuk menampilkan peta digital interaktif, digunakan untuk memetakan lokasi sensor, <i>shelter</i> evakuasi, dan titik laporan bencana.
10	Ant Design (AntD)	Sistem desain antarmuka tingkat enterprise, menyediakan komponen siap pakai untuk mempercepat pengembangan antarmuka dashboard admin.
11	Chart.js	Pustaka <i>JavaScript</i> yang dipergunakan untuk menghasilkan visualisasi data dan grafik interaktif pada antarmuka pengguna (<i>user interface</i>).
12	Tailwind CSS	Kerangka kerja <i>CSS</i> untuk styling tampilan aplikasi, memungkinkan pembuatan desain yang responsif (cocok untuk <i>Mobile</i> dan <i>Desktop</i>) secara cepat langsung pada kode <i>HTML/JSX</i> .
13	Axios	Pustaka klien <i>HTTP</i> yang berfungsi memfasilitasi komunikasi dan pertukaran data melalui permintaan <i>HTTP</i> ke <i>API</i> .
14	Zustand	Pustaka manajemen state yang berfungsi mengorganisasi dan mengelola kondisi (<i>state</i>) aplikasi <i>Web</i> secara terpusat.
15	Esptools-js	<i>esptool-js</i> merupakan <i>library</i> berbasis <i>JavaScript</i> untuk melakukan <i>flashing</i> dan pembaruan <i>firmware</i> pada perangkat ESP32 melalui browser. Teknologi ini digunakan untuk mempermudah proses instalasi dan pembaruan <i>firmware</i> tanpa memerlukan perangkat lunak tambahan.
16	GDAL (ogr2ogr)	<i>Library geospasial open-source</i> untuk pemrosesan dan transformasi data vektor. Digunakan melalui <i>command-line tool ogr2ogr</i> untuk melakukan konversi format data spasial, transformasi sistem koordinat (CRS), serta manipulasi data vektor yang ditampilkan pada peta bencana
17	Telegram (Bot API)	<i>Platform</i> pesan instan yang digunakan sebagai media notifikasi peringatan dini. Memanfaatkan <i>Telegram Bot API</i> untuk mengirimkan pesan otomatis kepada pengguna atau grup yang telah terdaftar ketika sistem mendeteksi anomali ketinggian air yang melebihi ambang batas bahaya

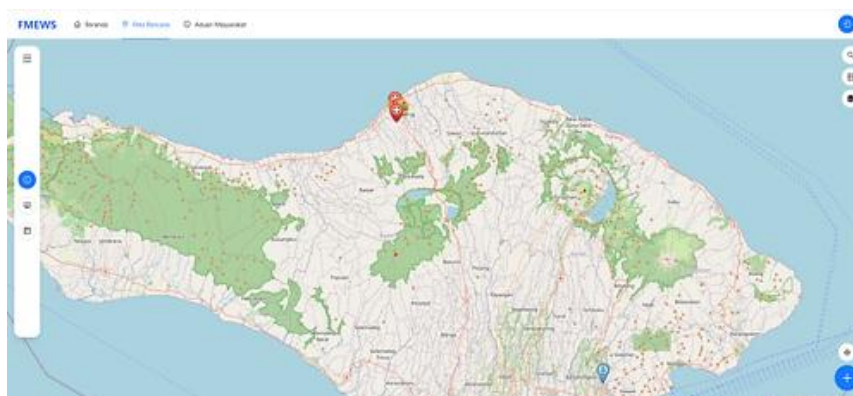
Selain itu, sistem informasi utama menyediakan delapan fitur inti sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Tabel 2 menunjukkan bahwa fitur-fitur yang dikembangkan tidak hanya mencakup kebutuhan teknis pemantauan banjir, tetapi juga kebutuhan operasional kebencanaan seperti pengelolaan shelter, fasilitas publik, aduan masyarakat, dan visualisasi spasial. Integrasi dua kelompok kebutuhan tersebut menjadi salah satu pembeda utama FMEWS dibanding sistem pemantauan banjir yang hanya berfokus pada data sensor.

Tabel 2. Fitur utama sistem

No	Nama Fitur	Penjelasan Fitur
1	Monitoring data ketinggian	Menampilkan data ketinggian air secara langsung dilengkapi grafik historis dan

No	Nama Fitur	Penjelasan Fitur
	air real-time	peta interaktif berbasis Leaflet.js.
2	Peringatan dini otomatis via Telegram	Mengirimkan notifikasi peringatan dini secara otomatis melalui Telegram yang dipicu oleh perubahan status level sensor.
3	Manajemen perangkat IoT	Menyediakan fasilitas registrasi, konfigurasi, dan pembaruan firmware Over-The-Air (OTA) untuk perangkat IoT melalui mekanisme token sekali pakai.
4	Konfigurasi dan pembaruan firmware OTA	Memungkinkan pembaruan firmware perangkat IoT secara remote (Over-The-Air) menggunakan token sekali pakai sebagai mekanisme keamanan.
5	Manajemen data shelter pengungsian	Mengelola informasi shelter pengungsian yang dapat diperbarui secara real-time oleh petugas BPBD.
6	Manajemen data fasilitas publik	Mengelola informasi fasilitas publik yang dapat diperbarui secara real-time oleh petugas BPBD.
7	Pengelolaan aduan masyarakat	Menerima dan memproses aduan dari masyarakat dengan alur verifikasi bertahap yang dilakukan oleh petugas.
8	Visualisasi data spasial pada peta interaktif	Menampilkan data spasial secara komprehensif pada peta interaktif, mencakup lokasi perangkat, shelter, fasilitas publik, dan titik rawan bencana.

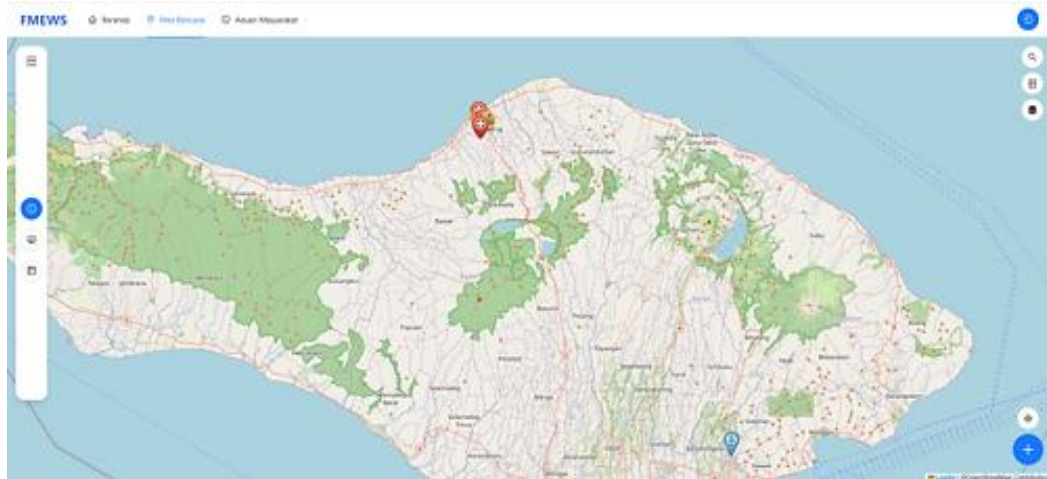
Untuk memperjelas implementasi pada antarmuka pengguna, tampilan dashboard utama disajikan pada Gambar 5 dan tampilan peta interaktif disajikan pada Gambar 6. Untuk gambar 5 menunjukkan antarmuka *dashboard* pemantauan utama yang dirancang sebagai pusat kendali bagi petugas BPBD dalam memantau kondisi banjir secara *real-time*. Pada tampilan ini, informasi utama disajikan dalam bentuk kartu ringkasan yang menampilkan identitas perangkat, status ketinggian air, dan level peringatan sesuai standar BNPB, yaitu Aman, Waspada, Siaga, dan Awas. Penyajian status dalam bentuk indikator visual memudahkan pengguna mengenali kondisi lapangan secara cepat tanpa harus membaca data mentah secara rinci. Selain kartu status, dashboard juga menampilkan grafik historis ketinggian air yang diperbarui secara otomatis. Grafik ini berfungsi untuk membantu petugas mengamati pola perubahan tinggi muka air dari waktu ke waktu, sehingga tidak hanya mengetahui kondisi sesaat, tetapi juga kecenderungan kenaikan atau penurunan yang sedang terjadi. Informasi historis tersebut penting dalam mendukung interpretasi kondisi lapangan dan membantu petugas menilai apakah suatu perubahan data merupakan fluktuasi biasa atau indikasi awal potensi banjir. Pada bagian lain, *dashboard* menyediakan integrasi antara data numerik dan visualisasi spasial sehingga petugas dapat menghubungkan pembacaan sensor dengan lokasi perangkat yang terpasang. Dengan demikian, *dashboard* tidak hanya berfungsi sebagai tampilan pemantauan teknis, tetapi juga sebagai media pemusatan informasi yang mendukung pengambilan keputusan secara cepat. Secara keseluruhan, Gambar ini memperlihatkan bahwa antarmuka dashboard FMEWS dirancang untuk menekankan kecepatan akses informasi, keterbacaan status, dan kemudahan pemantauan banyak perangkat dalam satu tampilan terpusat.



Gambar 5. Tampilan antarmuka dashboard pemantauan utama

Gambar 5 menunjukkan tampilan peta interaktif yang digunakan untuk menyajikan informasi kebencanaan secara spasial kepada masyarakat umum maupun petugas BPBD. Peta ini menampilkan beberapa jenis objek penting dalam satu tampilan terintegrasi, yaitu lokasi perangkat sensor IoT, titik shelter pengungsian, fasilitas publik, dan laporan aduan masyarakat. Penyajian seluruh objek tersebut dalam satu peta memudahkan pengguna memahami hubungan antara kondisi lapangan, lokasi sumber data, dan sumber daya pendukung yang tersedia di wilayah terdampak. Setiap penanda pada peta dilengkapi *popup* informasi yang dapat diakses pengguna untuk melihat detail data. Pada penanda perangkat IoT, informasi yang ditampilkan mencakup identitas perangkat, lokasi pemasangan, dan kondisi ketinggian air terkini. Pada penanda shelter dan fasilitas publik, informasi yang tersedia membantu pengguna mengenali lokasi tujuan evakuasi atau fasilitas yang dapat dimanfaatkan pada kondisi darurat. Sementara itu, pada penanda aduan masyarakat, sistem menyediakan informasi laporan kejadian yang dapat menjadi masukan tambahan bagi petugas dalam menilai situasi lapangan. Keberadaan peta interaktif ini penting karena informasi kebencanaan tidak cukup disajikan dalam bentuk angka atau tabel saja, tetapi juga perlu dipahami berdasarkan konteks lokasi. Melalui peta, petugas BPBD dapat lebih cepat mengidentifikasi wilayah yang terdampak, posisi perangkat yang mendeteksi

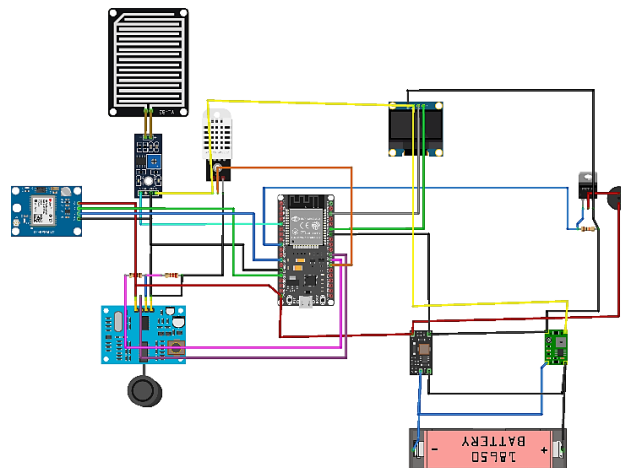
anomali, serta kedekatan lokasi terdampak dengan shelter atau fasilitas publik terdekat. Bagi masyarakat, fitur ini juga meningkatkan akses terhadap informasi kebencanaan yang lebih mudah dipahami secara visual. Dengan demikian, Gambar 6 memperlihatkan bahwa visualisasi spasial pada FMEWS berperan sebagai komponen penting yang menghubungkan data sensor, informasi operasional kebencanaan, dan kebutuhan informasi pengguna dalam satu antarmuka yang terpadu.



Gambar 6. Tampilan Peta Interaktif

3.3 Hasil Pengujian Perangkat IoT

Perangkat IoT dalam sistem FMEWS dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan utama yang mengintegrasikan empat sensor untuk mengukur kondisi lingkungan secara komprehensif. Keempat sensor tersebut terdiri dari JSN-SR04T untuk mengukur ketinggian air menggunakan gelombang ultrasonik, DHT22 untuk membaca suhu dan kelembaban udara, raindrop sensor untuk mendeteksi curah hujan, serta modul GPS U-blox Neo-6M untuk mencatat koordinat geografis perangkat. Data dari seluruh sensor diproses oleh ESP32 dan dikemas dalam format payload JSON sebelum dikirimkan ke server melalui protokol MQTT menggunakan topik yang telah ditentukan. Rancangan fisik perangkat IoT yang menggambarkan susunan komponen dan koneksi antar modul ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Rancangan Perangkat IoT

Gambar 7 ini menunjukkan rancangan fisik perangkat IoT yang terdiri atas beberapa komponen utama yang saling terintegrasi. Komponen utama tersebut meliputi mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses pusat, sensor ultrasonik JSN-SR04T untuk mengukur jarak dan ketinggian air, sensor DHT22 untuk membaca suhu dan kelembaban udara, raindrop sensor untuk mendeteksi curah hujan, serta modul GPS U-blox Neo-6M untuk mencatat koordinat geografis lokasi pemasangan perangkat. Mikrokontroler ESP32 berperan sebagai pengendali utama yang menerima data dari keempat sensor secara bersamaan. Sensor JSN-SR04T dipasang menghadap permukaan air untuk mengukur jarak antara perangkat dengan muka air, yang kemudian dikonversi menjadi data ketinggian. Sensor DHT22 berfungsi melengkapi data lingkungan dengan informasi suhu dan kelembaban, yang berguna untuk memantau kondisi sekitar pada saat pengukuran berlangsung. Raindrop sensor digunakan untuk mendeteksi ada tidaknya curah hujan di lokasi perangkat, sehingga status hujan dapat menjadi indikator pendukung dalam menilai potensi peningkatan debit air (Raihanthoro et al., 2024). Modul GPS U-blox Neo-6M dipasang untuk memberikan informasi posisi geografis



perangkat secara akurat, sehingga data yang dikirimkan dapat diketahui lokasi asalnya secara pasti. Seluruh data dari keempat sensor diproses oleh ESP32 dan dikemas dalam format payload JSON yang mencakup *device_id*, *water_level*, *distance*, *latitude*, *longitude*, *status_hujan*, *fw_version*, *rss*, dan *timestamp*. Data tersebut kemudian dikirimkan secara periodik melalui protokol MQTT ke IoT Gateway untuk diproses lebih lanjut. Dengan demikian, Gambar 7 memperlihatkan bahwa perangkat IoT FMEWS dirancang untuk mengumpulkan data lingkungan secara komprehensif dan mengirimkannya dalam bentuk yang siap diproses oleh sistem.

Pengujian perangkat IoT dilakukan untuk memverifikasi bahwa seluruh komponen berfungsi sesuai spesifikasi dan alur data dari perangkat hingga dashboard berjalan dengan benar. Rangkaian pengujian mencakup verifikasi konektivitas ESP32 ke jaringan WiFi dan broker MQTT HiveMQ, kalibrasi dan validasi akurasi pembacaan masing-masing sensor, serta keberhasilan transmisi payload JSON ke topik MQTT yang ditentukan. Hasil pengujian menunjukkan seluruh komponen perangkat berhasil berfungsi sesuai yang diharapkan, di mana data sensor berhasil diterima, diproses oleh IoT Gateway, dan ditampilkan pada dashboard monitoring secara real-time. Ringkasan hasil pengujian masing-masing komponen perangkat IoT disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Komponen Perangkat IoT

Komponen	Fungsi	Status
ESP32	Koneksi WiFi dan MQTT broker	Berhasil
JSN-SR04T	Pembacaan ketinggian air ultrasonik	Berhasil
DHT22	Pembacaan suhu dan kelembaban udara	Berhasil
Raindrop Sensor	Deteksi curah hujan	Berhasil
GPS U-blox Neo-6M	Pembacaan koordinat lokasi perangkat	Berhasil
Pengiriman JSON	Transmisi payload ke topik MQTT	Berhasil

Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian terhadap enam komponen utama perangkat IoT, yaitu ESP32 untuk konektivitas jaringan dan MQTT broker, sensor JSN-SR04T untuk pembacaan ketinggian air secara ultrasonik, sensor DHT22 untuk pembacaan suhu dan kelembaban, raindrop sensor untuk deteksi curah hujan, modul GPS U-blox Neo-6M untuk pembacaan koordinat lokasi, serta pengiriman payload JSON ke topik MQTT. Berdasarkan Tabel 3, seluruh komponen menunjukkan status Berhasil. ESP32 mampu terhubung dengan jaringan WiFi dan broker MQTT HiveMQ tanpa kendala. Sensor JSN-SR04T dapat membaca jarak dan mengonversinya menjadi data ketinggian air secara akurat. Sensor DHT22 mampu memberikan data suhu dan kelembaban yang sesuai dengan kondisi lingkungan sekitar. Raindrop sensor berhasil mendeteksi keberadaan air hujan. Modul GPS U-blox Neo-6M dapat memperoleh koordinat lokasi yang stabil. Seluruh data dari sensor berhasil dikemas dalam format JSON dan dikirimkan ke topik MQTT yang ditentukan, serta tampil pada *dashboard* monitoring secara *real-time*. Keberhasilan seluruh komponen perangkat IoT pada Tabel 3 menunjukkan bahwa prototipe perangkat telah memenuhi fungsi dasar akuisisi dan transmisi data lapangan. Hasil ini penting karena keandalan perangkat di tahap awal menjadi prasyarat bagi keberhasilan pengujian integrasi, pengujian performa MQTT, dan pengujian UAT pada tahap selanjutnya. Dengan demikian, perangkat IoT FMEWS dinyatakan layak digunakan sebagai sumber data utama pada keseluruhan sistem.

3.4 Hasil Pengujian Integrasi (Blackbox)

Pengujian integrasi blackbox dilakukan untuk memverifikasi kesesuaian keluaran sistem terhadap kebutuhan fungsional dari perspektif pengguna tanpa memperhatikan detail implementasi internal. Pengujian diorganisir berdasarkan tujuh fitur inti FMEWS dengan tambahan satu modul infrastruktur autentikasi, mencakup total 16 skenario yang disusun mengacu pada activity diagram operasional sistem. Setiap skenario diuji dengan memverifikasi kesesuaian keluaran aktual sistem terhadap hasil yang diharapkan sebagaimana telah ditetapkan dalam spesifikasi fungsional. Rekapitulasi hasil pengujian integrasi blackbox disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Pengujian Integrasi Sistem

No	Fitur	Skenario	Hasil
1	Monitoring data ketinggian air real-time	Pengiriman data sensor, tampilan grafik, filter data historis	Berhasil
2	Peringatan dini otomatis via Telegram	Deteksi kondisi bahaya dan pengiriman notifikasi	Berhasil
3	Manajemen perangkat IoT dan firmware OTA	Registrasi perangkat, pembaruan threshold, unduh firmware OTA	Berhasil
4	Manajemen data shelter pengungsian	Penambahan data shelter, pembaruan status ketersediaan	Berhasil
5	Manajemen data fasilitas publik	Penambahan fasilitas, validasi penghapusan kategori aktif	Berhasil
6	Pengelolaan aduan masyarakat	Pengiriman aduan, pembaruan status tindak lanjut	Berhasil
7	Visualisasi data spasial pada peta interaktif	Tampilan data sensor pada peta monitoring	Berhasil
8	Autentikasi pengguna	Login kredensial valid, pembatasan akses berbasis peran	Berhasil

Tabel 4 menunjukkan bahwa pengujian integrasi dilakukan pada delapan modul utama sistem, yaitu monitoring data ketinggian air *real-time*, peringatan dini otomatis via Telegram, manajemen perangkat IoT dan *firmware* OTA, manajemen data shelter pengungsian, manajemen data fasilitas publik, pengelolaan aduan masyarakat, visualisasi data



spasial pada peta interaktif, dan autentikasi pengguna. Masing-masing modul diuji melalui skenario yang merepresentasikan alur penggunaan utama sesuai kebutuhan fungsional sistem. Berdasarkan Tabel 4, seluruh modul menunjukkan hasil Berhasil. Pada modul monitoring data ketinggian air real-time, sistem berhasil menerima data sensor, menampilkannya dalam grafik, dan menyediakan riwayat data historis. Pada modul peringatan dini otomatis, sistem mampu mendeteksi kondisi bahaya dan mengirimkan notifikasi Telegram sesuai status level yang dihasilkan. Pada modul manajemen perangkat IoT dan firmware OTA, proses registrasi perangkat, pembaruan *threshold*, dan distribusi *firmware* berjalan sesuai fungsi yang dirancang.

Selanjutnya, pada modul manajemen data shelter pengungsian dan fasilitas publik, sistem berhasil melakukan penambahan, pembaruan, dan pengelolaan data secara konsisten. Pada modul pengelolaan aduan masyarakat, sistem dapat menerima laporan, menyimpan data aduan, dan memperbarui status tindak lanjutnya. Pada modul visualisasi data spasial, data sensor dan data kebencanaan lain dapat ditampilkan pada peta interaktif sesuai lokasi masing-masing. Adapun pada modul autentikasi pengguna, sistem mampu memverifikasi kredensial valid dan menerapkan pembatasan akses berbasis peran sesuai hak akses pengguna. Keberhasilan seluruh skenario pada Tabel 4 menunjukkan bahwa FMEWS tidak hanya berfungsi pada level modul individual, tetapi juga mampu menjalankan alur data *end-to-end* secara terpadu. Data yang dikirimkan dari perangkat IoT dapat diterima dan diproses oleh sistem, disimpan pada basis data yang sesuai, lalu disajikan kembali kepada pengguna melalui dashboard, notifikasi Telegram, dan peta interaktif tanpa ditemukan inkonsistensi fungsi antar modul. Hal ini penting karena sistem peringatan dini banjir membutuhkan kesinambungan alur data dari lapangan hingga pengguna akhir agar informasi yang dihasilkan dapat digunakan secara cepat dan akurat. Dengan demikian, hasil pengujian integrasi *blackbox* menegaskan bahwa FMEWS telah memenuhi spesifikasi fungsional yang dirumuskan pada tahap analisis. Sistem dinilai siap digunakan sebagai platform pemantauan dan peringatan dini banjir yang terintegrasi, karena seluruh komponen utama mampu bekerja secara konsisten dalam satu arsitektur sistem.

3.5 Hasil Pengujian Performa MQTT

Pengujian performa protokol MQTT dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan komunikasi data FMEWS pada empat variasi laju pengiriman pesan, yaitu 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, dan 10 Hz, dengan QoS level 0 *at most once delivery*. Konfigurasi ini dipilih untuk merepresentasikan kebutuhan komunikasi *real-time* pada sistem IoT peringatan dini. Setiap skenario diuji sebanyak 30 kali agar diperoleh nilai rata-rata yang lebih stabil. Ringkasan hasil pengujian performa protokol MQTT disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5.. Hasil Pengujian Protokol MQTT

Rate (Hz)	Latency (ms)	Throughput (B/s)	PLR (%)	PDR (%)	Availability (%)
1	748,83	474,86	0	100	100
2	206,34	896,77	3,33	96,67	96,67
5	217,94	2011,03	0,14	99,86	99,86
10	301,23	3739,16	23,94	76,06	76,06

Tabel 5 menunjukkan bahwa peningkatan laju pengiriman pesan tidak selalu menghasilkan performa komunikasi yang lebih baik secara keseluruhan. Pada laju 1 Hz, sistem memperoleh PDR dan *availability* sebesar 100,00%, yang menunjukkan seluruh pesan berhasil diterima. Namun, laju ini juga menghasilkan *latency* tertinggi, yaitu 748,83 ms, serta *throughput* terendah, yaitu 474,86 B/s. Hasil ini menunjukkan bahwa 1 Hz sangat stabil dari sisi keberhasilan pengiriman, tetapi kurang responsif untuk sistem pemantauan banjir yang membutuhkan pembaruan data lebih cepat. Pada laju 2 Hz, *latency* turun secara signifikan menjadi 206,34 ms, sementara *throughput* meningkat menjadi 896,77 B/s. Walaupun PDR dan *availability* turun sedikit menjadi 96,67%, nilainya masih menunjukkan reliabilitas komunikasi yang tinggi. Kondisi ini menandakan bahwa 2 Hz memberikan keseimbangan yang baik antara kecepatan respons dan kestabilan pengiriman data, sehingga sesuai untuk kebutuhan pemantauan *real-time* yang tetap menuntut keandalan. Pada laju 5 Hz, sistem menghasilkan *throughput* yang jauh lebih tinggi, yaitu 2011,03 B/s, dengan *latency* tetap rendah sebesar 217,94 ms. Selain itu, PLR hanya 0,14%, sedangkan PDR dan *availability* mencapai 99,86%. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi pengiriman hingga 5 Hz masih dapat ditangani dengan sangat baik oleh sistem. Dengan kata lain, 5 Hz mampu memberikan pembaruan data yang lebih rapat tanpa menurunkan kualitas komunikasi secara berarti. Sebaliknya, pada laju 10 Hz, *throughput* memang mencapai nilai tertinggi, yaitu 3739,16 B/s, tetapi reliabilitas sistem menurun secara nyata. Hal ini terlihat dari PLR yang meningkat menjadi 23,94%, serta PDR dan *availability* yang turun menjadi 76,06%. Meskipun *latency* pada 10 Hz masih lebih rendah dibandingkan 1 Hz, penurunan tingkat keberhasilan pengiriman menunjukkan bahwa laju ini terlalu tinggi untuk kondisi sistem yang diuji. Dalam konteks peringatan dini banjir, kondisi tersebut berisiko karena kehilangan data dapat mengurangi ketepatan informasi yang diterima pengguna.

Berdasarkan hasil tersebut, rentang 2-5 Hz dapat dinilai sebagai konfigurasi paling optimal untuk FMEWS. Laju 2 Hz unggul dari sisi *latency* terendah, sedangkan 5 Hz unggul dari sisi *throughput* yang lebih tinggi dengan reliabilitas yang tetap sangat baik. Oleh karena itu, kedua laju ini paling sesuai untuk mendukung kebutuhan sistem pemantauan dan peringatan dini banjir yang menuntut keseimbangan antara kecepatan pembaruan data dan kestabilan komunikasi. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa kenaikan laju pengiriman dapat

meningkatkan *throughput*, tetapi tidak selalu menjaga reliabilitas komunikasi pada tingkat yang sama (Luzardo et al., 2023; Sonklin & Sonklin, 2024).

3.6 Hasil User Acceptance Testing (UAT)

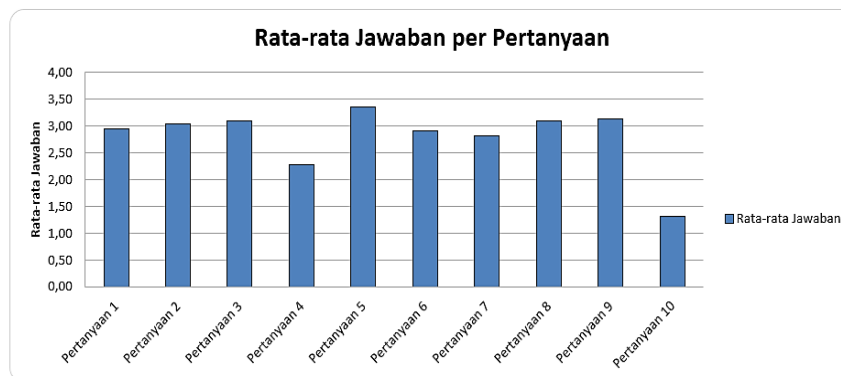
Pengujian *User Acceptance Testing* (UAT) dilakukan untuk menilai kesesuaian fungsi sistem dengan kebutuhan pengguna akhir dalam konteks penggunaan nyata (Nurfadillah et al., 2026). Pengujian ini melibatkan pengguna dari BPBD Buleleng dan masyarakat umum dengan menjalankan skenario penggunaan yang merepresentasikan aktivitas operasional utama pada sistem FMEWS. Skenario UAT mencakup delapan kelompok fungsi utama, yaitu autentikasi dan manajemen akun, pemantauan ketinggian air *real-time* beserta riwayat historisnya, pengelolaan dan konfigurasi perangkat IoT, manajemen data *shelter* pengungsian, manajemen data fasilitas publik, akses dan navigasi peta interaktif, pengelolaan laporan aduan masyarakat, serta pengelolaan data master oleh administrator. Seluruh skenario tersebut dirancang untuk menguji apakah fungsi yang tersedia pada sistem telah berjalan sesuai kebutuhan operasional yang ditetapkan pada tahap analisis.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh skenario UAT berhasil dijalankan sesuai spesifikasi fungsional yang telah ditetapkan. Proses autentikasi dan pembatasan akses berbasis peran berjalan dengan baik, sehingga setiap pengguna hanya dapat mengakses fitur sesuai kewenangannya. Modul pemantauan ketinggian air mampu menampilkan data *real-time* dan riwayat historis secara benar, sedangkan modul pengelolaan perangkat IoT dapat menjalankan fungsi registrasi, konfigurasi, dan pembaruan data sesuai kebutuhan sistem. Pada modul operasional kebencanaan, sistem juga mampu mengelola data *shelter*, fasilitas publik, dan aduan masyarakat secara konsisten. Selain itu, fitur peta interaktif dapat menampilkan data spasial sesuai lokasi masing-masing objek, sehingga mendukung pengguna dalam memahami kondisi lapangan secara visual. Modul administrator juga berjalan sesuai fungsi, terutama dalam pengelolaan data master yang mendukung keberlangsungan operasional sistem secara menyeluruh. Tidak ditemukan kegagalan fungsional baik pada alur penggunaan utama maupun pada kondisi tepi yang diujikan.

Hasil UAT ini menunjukkan bahwa FMEWS telah memenuhi kebutuhan operasional dasar pengguna akhir dan layak digunakan sebagai platform pemantauan serta peringatan dini banjir yang terintegrasi. Keberhasilan seluruh skenario pengujian memperkuat bahwa fitur-fitur yang dikembangkan telah sesuai dengan kebutuhan pengguna yang diidentifikasi pada tahap analisis, baik untuk kebutuhan pemantauan teknis maupun pengelolaan informasi kebencanaan.

3.7 Hasil Pengujian System Usability Scale (SUS)

Untuk memperlihatkan kecenderungan jawaban responden pada setiap butir evaluasi *usability*, rata-rata jawaban responden disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Rata-rata jawaban per pertanyaan

Gambar 8 menunjukkan bahwa sebagian besar butir pertanyaan memperoleh respons yang cenderung positif, yang menandakan bahwa pengguna dapat memahami dan menggunakan sistem dengan cukup baik. Respons tersebut memperlihatkan bahwa fitur-fitur utama sistem dapat diakses dan dijalankan oleh responden tanpa mengalami hambatan yang dominan. Namun demikian, variasi jawaban antarbutir juga menunjukkan bahwa pengalaman penggunaan belum sepenuhnya merata pada seluruh kelompok pengguna. Pengujian SUS melibatkan 22 responden dari berbagai latar belakang pekerjaan, meliputi mahasiswa, pegawai swasta, aparat sipil negara, wirausaha, ibu rumah tangga, pelajar, dan profesi lainnya. Setiap responden mengisi kuesioner yang terdiri atas 10 pernyataan dengan skala Likert 1–5 sesuai instrumen SUS standar (Brooke, 1986). Penggunaan SUS sebagai instrumen evaluasi *usability* juga masih relevan pada penelitian sistem informasi terkini, termasuk pada studi yang dilakukan di lingkungan Undiksha (Diani et al., 2025). Hasil perhitungan menunjukkan skor tertinggi sebesar 90,0 dan skor terendah sebesar 37,5, dengan rata-rata keseluruhan sebesar 70,0. Berdasarkan *acceptability range*, skor 70,0 berada pada kategori *Acceptable* dengan penilaian adjektif *Good*. Hasil ini menunjukkan bahwa FMEWS telah memiliki tingkat kebergunaan yang memadai untuk digunakan oleh pengguna awal. Dengan kata lain, sistem dinilai cukup mudah dipahami dan dioperasikan, meskipun belum mencapai tingkat *usability* yang sangat tinggi.



Meskipun demikian, rentang skor yang cukup lebar menunjukkan bahwa pengalaman penggunaan belum konsisten pada seluruh responden. Skor terendah yang diperoleh dari responden dengan latar belakang nonteknis mengindikasikan bahwa aspek *learnability*, konsistensi antarmuka, dan ketersediaan panduan penggunaan masih perlu ditingkatkan. Oleh karena itu, hasil pengujian SUS tidak hanya menunjukkan bahwa sistem dapat diterima, tetapi juga memberikan arahan perbaikan untuk pengembangan antarmuka pada tahap berikutnya (Diani et al., 2025).

3.8 Pembahasan

Penelitian ini berhasil menjawab ketiga rumusan masalah yang telah ditetapkan. Rumusan masalah pertama mengenai perancangan dan pembangunan sistem pemantauan banjir berbasis IoT dijawab melalui pengembangan FMEWS yang mengintegrasikan perangkat IoT berbasis ESP32, IoT Gateway berbasis Flask, dan sistem informasi berbasis *web* dalam satu arsitektur tiga lapis. Integrasi ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya dirancang untuk mengumpulkan data lapangan, tetapi juga untuk mengelola informasi operasional kebencanaan dalam satu platform terpusat.

Rumusan masalah kedua mengenai kinerja komunikasi MQTT dijawab melalui pengujian performa pada empat variasi laju pengiriman data. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rentang 2-5 Hz merupakan konfigurasi yang paling sesuai karena memberikan keseimbangan terbaik antara *latency*, *throughput*, PDR, dan *availability*. Temuan ini penting karena sistem peringatan dini tidak hanya membutuhkan data yang cepat sampai, tetapi juga membutuhkan keandalan komunikasi yang tinggi agar informasi yang dikirim dapat benar-benar dimanfaatkan dalam pengambilan keputusan.

Rumusan masalah ketiga mengenai tingkat kebergunaan sistem dijawab melalui pengujian SUS yang menghasilkan skor rata-rata 70,0 pada kategori *Acceptable*. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem telah dapat diterima oleh pengguna, meskipun masih terdapat ruang perbaikan pada aspek kemudahan belajar dan konsistensi antarmuka. Dengan demikian, FMEWS dapat dinilai layak secara awal, baik dari sisi teknis maupun dari sisi penerimaan pengguna.

Dibandingkan dengan penelitian terdahulu, FMEWS memberikan kontribusi yang lebih komprehensif. Penelitian (Ramadhan & Triono, 2020) serta (Sutarti et al., 2022) berfokus pada monitoring teknis ketinggian air, sementara (Aji & Nurwasito, 2023) menambahkan notifikasi berbasis MQTT. (Putra et al., 2025) telah memperluas implementasi melalui *dashboard* berbasis *website*, sedangkan (Andewi et al., 2025) menunjukkan pentingnya visualisasi spasial dalam konteks kebencanaan. Namun, sistem-sistem tersebut belum sepenuhnya mengintegrasikan data sensor *real-time* dengan data operasional kebencanaan dalam satu platform. FMEWS mengisi celah tersebut dengan menghadirkan sistem yang tidak hanya mendukung pemantauan teknis, tetapi juga menyediakan informasi *shelter*, fasilitas publik, aduan masyarakat, dan peta interaktif untuk mendukung kebutuhan BPBD.

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa MQTT efektif digunakan pada sistem IoT yang memprioritaskan komunikasi ringan dan *latency* rendah (Aryanto et al., 2026). Namun, penelitian ini menambahkan temuan praktis bahwa peningkatan laju pengiriman data tidak selalu menghasilkan performa yang lebih baik secara menyeluruh. Pada laju tinggi, *throughput* memang meningkat, tetapi reliabilitas dapat menurun. Oleh karena itu, pemilihan konfigurasi komunikasi harus mempertimbangkan kebutuhan aktual sistem, bukan hanya mengejar laju pengiriman tertinggi. Meskipun hasil penelitian menunjukkan performa yang baik, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dicermati. Pengujian sistem masih dilakukan pada skala terbatas, penggunaan QoS hanya difokuskan pada level 0, dan aspek keamanan komunikasi seperti enkripsi TLS belum diterapkan pada jalur MQTT. Selain itu, jumlah responden SUS masih terbatas sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan keragaman pengguna di lapangan. Keterbatasan tersebut menunjukkan bahwa FMEWS sudah layak sebagai prototipe operasional, tetapi masih memerlukan pengujian lapangan yang lebih luas dan penguatan aspek keamanan serta usability pada pengembangan selanjutnya.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan *Flood Monitoring and Early Warning System* (FMEWS) berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan protokol MQTT untuk mendukung pemantauan dan peringatan dini banjir secara *real-time*. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan perangkat IoT, pengolahan data, visualisasi spasial, serta informasi operasional kebencanaan dalam satu platform terpusat. Hasil pengujian blackbox menunjukkan seluruh 48 skenario pengujian pada delapan modul berjalan sesuai fungsi yang dirancang. Evaluasi performa komunikasi MQTT menunjukkan konfigurasi pengiriman data 2-5 Hz menghasilkan kinerja optimal dengan *Packet Delivery Ratio* (PDR) $\geq 96,67\%$ dan *latency* di bawah 220 ms. Selain itu, evaluasi *System Usability Scale* (SUS) memperoleh skor rata-rata 70,0 dengan kategori *Good*, yang menunjukkan tingkat penerimaan pengguna terhadap sistem. FMEWS memberikan kontribusi dalam menjawab keterbatasan penelitian sebelumnya yang umumnya masih berfokus pada pemantauan sensor, notifikasi, atau pengelolaan data kebencanaan secara terpisah. Integrasi monitoring banjir berbasis IoT dengan data operasional kebencanaan dan visualisasi spasial menjadikan sistem tidak hanya sebagai alat pemantauan teknis, tetapi juga sebagai pendukung pengambilan keputusan bagi instansi kebencanaan. Penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada pengujian yang dilakukan dalam lingkungan simulasi, jumlah perangkat IoT yang terbatas, serta jumlah responden usability yang belum merepresentasikan seluruh kelompok pengguna. Penelitian selanjutnya dapat melakukan validasi lapangan dengan skala perangkat yang lebih besar, evaluasi performa komunikasi pada kondisi jaringan yang beragam, serta pengujian penerimaan pengguna dengan cakupan responden yang lebih luas.



REFERENCES

- Ahmad Muzakky Alhasan, A. H. (2023). *78 Desa dan Kelurahan di Buleleng Bali Rawan Terdampak Banjir Bandang*. Kompas.Com.
- Ahmad Muzakky Alhasan, G. K. W. T. (2025). *Banjir Bandang Terjang 1 Desa di Buleleng, 30 Rumah Rusak Terendam*. Kompas.Com.
- Aiswarya, N., Malia, M., Marti, N. W., Purnamawan, I. K., Teknik, F., Studi, P., Rekayasa, T., Lunak, P., & Ganesha, U. P. (2026). *TIN: Terapan Informatika Nusantara Pengembangan Augmented Reality Sebagai Media Pembelajaran Alat Musik Ritmis dan Melodis Tradisional Indonesia untuk Siswa Sekolah Dasar Menggunakan Metode MDLC TIN: Terapan Informatika Nusantara*. 7(1), 490–501. <https://doi.org/10.47065/tin.v7i1.9748>
- Aji, B. W., & Nurwasito, H. (2023). Implementasi Sistem Monitoring Sungai berbasis LoRa-MQTT Gateway. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 7(4), 1689–1698. <https://j-ptiik.ub.ac.id/index.php/j-ptiik/article/view/12562>
- Aryanto, I. M., Fadilah, E., Putri, R., & Firmansyah, Z. (2026). *Implementasi Protokol Mqtt Pada Sistem Monitoring Smart*. 10(2), 3461–3468.
- Dhananjaya, I. G., Aryanto, K. Y. E., & Sindu, I. G. P. (2026). Pemanfaatan ARCore Geospatial untuk simulasi banjir sebagai media edukasi kebencanaan. *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, 23(1). <https://doi.org/10.58578/yasin.v6i3.10421>
- Finni Alvionita, & Yuwanda Purnamasari Pasrun. (2025). Pengembangan Sistem Informasi Berbasis Web untuk Manajemen Data Kebencanaan di BPBD Kabupaten Kolaka Utara. *JISTech : Journal of Information Systems and Technology*, 2(2), 93–99. <https://doi.org/10.71234/jistech.v2i2.103>
- Gitakarma, M. S., Ariawan, K. U., & Pracasitaram, I. G. M. S. B. (2024). Peran Mikrokontroler Dalam Pengembangan Aplikasi IoT : Tinjauan Konseptual Dan Implementasi. *Jurnal Komputer Dan Teknologi Sains (KOMTEKS)*, 3(2), 18–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.37637/komteks.v3i2.2231>
- Kertiasih, N. K., Setemen, K., Aan, A., & Permana, J. (2024). *Asian Journal of*. 2(5), 744–757.
- Diani, M., Rasben Dantes, G., & Made Gede Sunarya, I. (2025). Evaluasi Usability Sistem Informasi Pengajuan Etik Penelitian (Sietik) Undiksha Berdasarkan Metode Usability Testing Menggunakan Teknik Concurrent Think Aloud, Heuristic Evaluation Dan System Usability Scale. *INSERT: Information System and Emerging Technology Journal*, 6(2), 215–225. <https://doi.org/https://doi.org/10.23887/insert.v6i2.102446>
- Muhendra, R., & Solihin. (2022). Pengembangan Sistem Pemantauan Potensi Banjir Online di Desa Mangun Jaya Kabupaten Bekasi. *Jurnal Sains Teknologi Dalam Pemberdayaan Masyarakat*, 3(2), 107–114. <https://doi.org/10.31599/jstpm.v3i2.1657>
- Nurfadillah, N., Maulana, R., & Syahbuddin, S. (2026). *Penerapan User Acceptance Testing (UAT) dalam Evaluasi Sistem Informasi Pencarian & Pemesanan Rumah Kost menggunakan Progressive Web App Berbasis Geospasial*. 4(April).
- Andewi, P., Seputra, K. A., Aryanto, K. Y. E., & Dewi, L. J. E. (2025). Integrasi Teknologi Penginderaan Jauh Dan Machine Learning Pada Web Gis Untuk Pemetaan Potensi Banjir. *Jurnal Pendidikan Teknologi Dan Kejuruan*, 22(1), 12–23. <https://doi.org/10.23887/jptkundiksha.v22i1.87455>
- Putra, B., Pratama, W., Scw, T. D., & Setiawan, R. B. (2025). *Implementasi Website Sebagai Sistem Monitoring*. 6.
- Qolbi, R. M., Putra, R. M., & Nugroho, W. (2024). *Analisis Pengembangan Sistem Informasi Dengan Metode Waterfall : Systematic Literature Review*. 18(2), 1–10.
- Raihanthoro, D., Maulana, Y., Setyadi, N. R., Said, A. M., & Susanto, R. (2024). *Alat Pendeteksi Hujan Dengan Sensor Raindrop*. 205–208.
- Ramadhan, T. F., & Triono, W. (2020). *Sistem Monitoring Ketinggian Air Dan Pengendalian Pintu Air Berbasis Microcontroller Nodecode MCU ESP8266*. X(2).
- Rosadi, S., Studi, P., & Komputer, S. (2022). *Prototype Sistem Pendeteksi Banjir Menggunakan*. 5(1), 38–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.47080/simika.v5i1.1424>
- Sonklin, K., & Sonklin, C. (2024). A performance evaluation of the internet of things-message queue telemetry transport protocol based water level warning system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 14(6), 7178–7185. <https://doi.org/10.11591/ijece.v14i6.pp7178-7185>
- Wibowo, A., & Zain, M. M. (2021). Pemanfaatan ReactJS dan Protokol MQTT untuk Visualisasi Sinyal Lampu dan Notifikasi secara Waktu Nyata pada Sistem Pemonitor APILL di Kota Pekanbaru. *Jurnal Komputer Terapan*, 7(2), 314–328. <https://doi.org/10.35143/jkt.v7i2.5108>