

Evaluasi Akurasi Sensor Ultrasonik dan Latensi Notifikasi Blynk pada Prototipe Sistem Pemantauan Banjir Berbasis IoT

Gunawan Prayitno*, Aprilia Anes Sarira

STMIK Pesat Nabire, Indonesia

Email: binaanakpapua@gmail.com*, apriliasarira344@gmail.com

Keywords:

Internet of Things; Flood monitoring; HC-SR04; Latency; Sensor accuracy

Abstract

Delays in obtaining information regarding rising water levels can increase the risk of damage and reduce the effectiveness of flood mitigation efforts. Therefore, a monitoring system capable of providing responsive and continuous real-time observations is required. This study evaluates the performance of an Internet of Things (IoT)-based flood monitoring system utilizing the HC-SR04 ultrasonic sensor, NodeMCU ESP8266, and the Blynk platform through an integrated assessment of measurement accuracy and communication performance. Experiments were conducted at three water-level variations, namely 5 cm, 10 cm, and 15 cm, with ten repetitions performed for each measurement level. Sensor accuracy was analyzed using Mean Absolute Error (MAE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), standard deviation, and coefficient of variation (CV). Communication performance was evaluated using mean latency, p95 latency, standard deviation, and a 95% confidence interval under strong and moderate RSSI conditions. The experimental results demonstrate that the developed system was capable of maintaining stable measurement performance, with MAE values ranging from 0.029 cm to 0.039 cm and MAPE values below 1%. In communication testing, the average latency was recorded at 0.968 seconds under strong RSSI conditions and 1.925 seconds under moderate RSSI conditions. The findings indicate that network quality directly affects communication stability in cloud-based IoT systems. The contribution of this study lies in the establishment of an empirical evaluation framework integrating sensor accuracy and communication latency analysis within a single experimental scenario for a low-cost IoT-based flood monitoring system. Overall, the proposed system demonstrated adequate performance for prototype-scale real-time water-level monitoring applications.

Kata Kunci:

Internet of Things; Pemantauan banjir; HC-SR04; Latency; Akurasi sensor.

Abstrak

Keterlambatan penyampaian informasi mengenai peningkatan muka air dapat memperbesar risiko kerusakan serta mengurangi efektivitas tindakan mitigasi banjir. Kondisi tersebut mendorong kebutuhan terhadap sistem pemantauan yang mampu melakukan pengukuran dan distribusi informasi secara cepat serta berkesinambungan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi performa sistem pemantauan banjir berbasis Internet of Things (IoT) dengan memanfaatkan sensor ultrasonik HC-SR04, NodeMCU ESP8266, dan platform Blynk melalui pendekatan evaluasi terpadu antara akurasi pengukuran dan performa komunikasi data. Pengujian dilakukan pada tiga variasi level air, yaitu 5 cm, 10 cm, dan 15 cm dengan sepuluh kali pengulangan pada setiap level pengukuran. Evaluasi akurasi sensor dianalisis menggunakan Mean Absolute Error (MAE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), standar deviasi, dan coefficient of variation (CV), sedangkan performa komunikasi dianalisis berdasarkan mean latency, p95 latency, standar deviasi, dan confidence interval 95% pada kondisi RSSI kuat dan RSSI sedang. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem mampu

mempertahankan performa pengukuran yang stabil dengan nilai MAE sebesar 0.029–0.039 cm dan nilai MAPE di bawah 1%. Pada pengujian komunikasi, rata-rata latency tercatat sebesar 0.968 detik pada kondisi RSSI kuat dan 1.925 detik pada kondisi RSSI sedang. Temuan tersebut menunjukkan bahwa kualitas jaringan memberikan pengaruh langsung terhadap kestabilan komunikasi pada sistem IoT berbasis cloud. Kontribusi penelitian ini terletak pada penyusunan kerangka evaluasi empiris yang mengintegrasikan analisis akurasi sensor dan latency komunikasi dalam satu skenario pengujian sistem pemantauan banjir berbasis IoT berbiaya rendah. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan menunjukkan performa yang memadai untuk kebutuhan monitoring level air secara real-time pada skala prototipe.

PENDAHULUAN

Banjir merupakan salah satu bencana hidrometeorologi yang memiliki dampak luas terhadap keselamatan masyarakat, kerusakan infrastruktur, serta gangguan terhadap aktivitas sosial dan ekonomi. Dalam banyak kasus, tingginya tingkat kerugian tidak hanya disebabkan oleh besarnya debit air, tetapi juga oleh keterlambatan penyampaian informasi mengenai kenaikan muka air kepada masyarakat maupun pihak terkait. Kondisi tersebut menyebabkan proses mitigasi dan evakuasi tidak dapat dilakukan secara optimal. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan yang mampu menyediakan informasi kondisi air secara cepat, kontinu, dan mudah diakses untuk mendukung pengambilan keputusan pada situasi darurat (Ratmini et al., 2025; Wandu & Ashari, 2025).

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah mendorong transformasi sistem pemantauan lingkungan dari metode konvensional menuju sistem berbasis sensor terintegrasi yang mampu melakukan akuisisi data secara berkelanjutan dan mentransmisikannya melalui jaringan internet secara *real-time*. Integrasi sensor, mikrokontroler, dan layanan *cloud* memungkinkan proses *monitoring* dilakukan dari jarak jauh dengan fleksibilitas yang lebih tinggi dibanding pendekatan manual. Dalam konteks pemantauan banjir, pendekatan berbasis IoT dinilai mampu meningkatkan efektivitas sistem karena perubahan level air dapat dipantau secara langsung melalui perangkat bergerak sehingga respons terhadap potensi bencana dapat dilakukan lebih cepat (Choosumrong et al., 2025; Chen et al., 2023; Zhang et al., 2025).

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem pemantauan banjir berbasis IoT menggunakan pendekatan yang beragam. Choosumrong et al. (2025) mengembangkan sistem *monitoring* banjir berbasis IoT yang terintegrasi dengan *Geographic Information System* (GIS) untuk meningkatkan kemampuan visualisasi spasial pada wilayah pertanian dataran rendah. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa integrasi IoT dan GIS mampu meningkatkan kemudahan interpretasi kondisi lingkungan secara *real-time*. Di sisi lain, Arante et al. (2025) mengusulkan sistem pemantauan dan prediksi banjir berbasis IoT menggunakan pendekatan *neuro-fuzzy* berbasis *genetic algorithm* yang difokuskan pada peningkatan kemampuan prediksi banjir. Sementara itu, Chen et al. (2023) mengembangkan sistem *monitoring* air berbasis IoT untuk lingkungan perkotaan dan ekologi dengan penekanan pada integrasi sensor serta pengelolaan data secara *real-time*. Penelitian lain oleh Fadilah et al. (2024), Lengkong et al. (2025), dan Iqbal et al. (2024) juga menunjukkan bahwa integrasi IoT dengan platform *monitoring cloud* seperti Blynk mampu mendukung sistem peringatan dini banjir secara efektif.

Meskipun penelitian-penelitian tersebut menunjukkan perkembangan yang signifikan, sebagian besar studi masih berorientasi pada pengembangan arsitektur sistem, integrasi teknologi, maupun peningkatan kompleksitas model prediksi. Evaluasi performa sistem secara kuantitatif, khususnya yang berkaitan dengan karakteristik akurasi sensor, *latency* komunikasi, dan konsistensi transmisi data, masih relatif terbatas. Beberapa penelitian lebih menitikberatkan pada kemampuan sistem dalam melakukan *monitoring* atau prediksi, tetapi belum secara spesifik mengaitkan performa *sensing* dan performa komunikasi dalam satu kerangka evaluasi empiris yang terintegrasi. Padahal, pada sistem peringatan dini berbasis IoT, kualitas *monitoring* tidak hanya ditentukan oleh kemampuan sensor dalam mendeteksi perubahan kondisi lingkungan, tetapi juga oleh kemampuan sistem dalam menjaga kontinuitas data dan menyampaikan informasi dalam waktu yang memadai (Borankulova et al., 2025; Susila et al., 2025).

Selain itu, performa komunikasi merupakan aspek krusial dalam sistem *monitoring* berbasis *cloud*. Tingginya *latency* komunikasi dapat menyebabkan keterlambatan penyampaian informasi sehingga mengurangi efektivitas proses mitigasi bencana. Penelitian yang dilakukan oleh Alhartomi et al., (2023) menunjukkan bahwa optimasi komunikasi dan pengurangan *latency* menjadi faktor penting dalam meningkatkan kualitas layanan pada sistem IoT, terutama pada kondisi jaringan yang terbatas. Hal tersebut menunjukkan bahwa evaluasi terhadap respons komunikasi perlu dilakukan secara sistematis karena penurunan kualitas jaringan dapat berdampak langsung terhadap kecepatan distribusi informasi pada sistem *monitoring real-time*. Temuan serupa juga disampaikan oleh Islam et al. (2024) pada sistem notifikasi *real-time* berbasis IoT.

Di sisi lain, perkembangan sistem IoT untuk pemantauan lingkungan juga mulai dikombinasikan dengan teknologi lain seperti blockchain dan kecerdasan buatan guna meningkatkan efisiensi pengelolaan data serta transparansi sistem (Biswas et al., 2025). Integrasi Artificial Intelligence (AI) dan IoT juga telah diterapkan pada sektor pertanian cerdas dan *monitoring* otomatis untuk meningkatkan efisiensi pengambilan keputusan berbasis data (AlZubi & Galyna, 2023). Namun demikian, peningkatan kompleksitas teknologi tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan efektivitas implementasi pada skala prototipe. Pada tahap pengembangan awal, evaluasi terhadap performa fundamental sistem justru menjadi aspek yang lebih penting untuk memastikan bahwa sistem mampu bekerja secara konsisten sebelum dikembangkan menuju arsitektur yang lebih kompleks.

Berdasarkan kajian tersebut, masih terdapat kesenjangan penelitian pada aspek evaluasi performa sistem pemantauan banjir berbasis IoT yang dilakukan secara empiris dan terintegrasi. Sebagian besar penelitian sebelumnya mengevaluasi parameter *sensing* dan komunikasi secara terpisah atau lebih berfokus pada pengembangan fitur sistem, sehingga hubungan antara ketelitian pengukuran sensor dan respons komunikasi belum banyak dianalisis dalam satu skenario pengujian yang terstruktur. Padahal, kombinasi antara akurasi pengukuran dan kecepatan distribusi informasi merupakan faktor penting yang menentukan kualitas sistem *monitoring real-time*, terutama pada implementasi sistem peringatan dini banjir berbasis *cloud*.

Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada evaluasi performa sistem pemantauan banjir berbasis IoT menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04, NodeMCU ESP8266, dan platform Blynk melalui pendekatan eksperimen terkontrol. Evaluasi dilakukan dengan mengintegrasikan analisis akurasi pengukuran dan performa komunikasi dalam satu kerangka

pengujian empiris. Pengujian akurasi dilakukan pada beberapa variasi level air menggunakan parameter *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), standar deviasi, dan *coefficient of variation* (CV). Sementara itu, performa komunikasi dianalisis menggunakan *mean latency*, *p95 latency*, standar deviasi, dan *confidence interval* 95% pada beberapa kondisi kualitas jaringan.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyusunan pendekatan evaluasi empiris yang menghubungkan performa *sensing* dan performa komunikasi dalam satu skenario pengujian sistem *monitoring* banjir berbasis IoT berbiaya rendah. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang lebih berorientasi pada pengembangan fitur atau peningkatan kompleksitas model, penelitian ini berfokus pada karakterisasi performa fundamental sistem melalui analisis statistik terhadap akurasi pembacaan sensor dan respons komunikasi data. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memberikan dasar evaluasi teknis yang lebih komprehensif dalam pengembangan sistem pemantauan banjir berbasis IoT, khususnya pada tahap implementasi awal dan pengembangan prototipe.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan *Research and Development* (R&D) dengan metode *prototyping* untuk merancang sekaligus mengevaluasi performa sistem pemantauan banjir berbasis *Internet of Things* (IoT). Pendekatan *prototyping* banyak digunakan dalam pengembangan sistem IoT karena memungkinkan proses iterasi perangkat keras dan perangkat lunak dilakukan secara fleksibel selama tahap pengujian awal (Guerrero-Ulloa et al., 2023). Fokus penelitian tidak diarahkan pada pengembangan algoritma prediksi maupun kompleksitas arsitektur sistem, melainkan pada karakterisasi performa dasar sistem monitoring melalui analisis akurasi pengukuran dan respons komunikasi data. Oleh karena itu, penelitian dilakukan menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif dalam lingkungan terkontrol agar parameter pengujian dapat diamati secara sistematis dan dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif.

Sistem yang dikembangkan terdiri atas sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai perangkat utama pengukuran *level* air, NodeMCU ESP8266 sebagai unit pemrosesan dan komunikasi data, serta platform Blynk sebagai media *monitoring* berbasis *cloud*. Penggunaan sensor ultrasonik pada sistem *monitoring level* air dinilai efektif karena memiliki biaya implementasi yang rendah, konsumsi daya kecil, dan mampu melakukan pengukuran tanpa kontak langsung dengan air (Pereira et al., 2022; Bresnahan et al., 2023). Sensor ultrasonik juga telah banyak digunakan pada sistem *monitoring* berbasis IoT untuk kebutuhan pemantauan banjir dan pasang surut air (Kusuma et al., 2025; Hasanah et al., 2025). Sensor dipasang pada bagian atas wadah pengujian berbentuk tabung kaca dengan tinggi sekitar 17 cm untuk mendeteksi perubahan jarak terhadap permukaan air. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh ESP8266 sebelum dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi menuju server Blynk sehingga informasi *level* air dapat dipantau secara *real-time* melalui perangkat *smartphone*. Selain *monitoring* berbasis *cloud*, sistem juga menampilkan data secara lokal melalui LCD untuk memudahkan observasi langsung selama proses eksperimen berlangsung.

Untuk mengurangi fluktuasi pembacaan yang bersifat acak, sistem menerapkan *moving average filter* dengan ukuran jendela tiga sampel pembacaan berturut-turut. Pendekatan *filtering* sederhana seperti *moving average* umum digunakan pada sistem IoT berbasis sensor

untuk meningkatkan kestabilan pembacaan dan mereduksi *noise* jangka pendek tanpa menambah kompleksitas komputasi secara signifikan (Darma Kotama et al., 2025). Pemilihan ukuran jendela tersebut dilakukan untuk menjaga keseimbangan antara stabilitas data dan respons sistem. Penggunaan ukuran filter yang terlalu besar berpotensi meningkatkan kestabilan pembacaan, tetapi dapat menambah *delay* respons terhadap perubahan *level* air secara cepat. Sebaliknya, ukuran filter yang terlalu kecil menyebabkan *noise* pembacaan sensor masih cukup dominan. Oleh sebab itu, moving average tiga sampel dipilih sebagai pendekatan kompromi pada sistem *monitoring* skala prototipe.

Evaluasi performa sistem difokuskan pada dua parameter utama, yaitu akurasi pengukuran sensor dan *latency* komunikasi data. Pengujian akurasi dilakukan pada tiga variasi *level* air, yaitu 5 cm, 10 cm, dan 15 cm. Ketiga *level* tersebut dipilih untuk merepresentasikan variasi jarak pengukuran pada kapasitas efektif wadah pengujian sekaligus untuk mengamati perubahan karakteristik pembacaan sensor seiring meningkatnya jarak deteksi. Pada setiap *level* air dilakukan sepuluh kali pengukuran independen dengan interval waktu pengambilan data yang konstan. Sebelum pengukuran dilakukan, permukaan air dibiarkan berada dalam kondisi relatif tenang untuk meminimalkan gangguan pantulan akibat riak air. Posisi sensor juga dijaga tetap tegak lurus terhadap permukaan air guna mengurangi deviasi pembacaan yang disebabkan oleh perubahan sudut refleksi gelombang ultrasonik.

Nilai referensi diperoleh menggunakan pengukuran manual dengan alat ukur berskala milimeter. Tingkat akurasi sistem dianalisis menggunakan *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). MAE digunakan untuk menggambarkan rata-rata deviasi absolut antara hasil pembacaan sensor dan nilai referensi, sedangkan MAPE digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesalahan relatif sistem dalam bentuk persentase sehingga perbedaan performa antar *level* pengukuran dapat diamati secara lebih proporsional. Selain itu, standar deviasi dan *coefficient of variation* (CV) digunakan untuk mengevaluasi tingkat dispersi data dan konsistensi hasil pembacaan sensor. Penggunaan CV dinilai penting karena parameter tersebut mampu menggambarkan tingkat variasi relatif terhadap nilai rata-rata pengukuran pada masing-masing *level* air.

Pengujian *latency* dilakukan untuk mengevaluasi performa komunikasi data pada sistem *monitoring* berbasis *cloud*. *Latency* didefinisikan sebagai selisih waktu antara saat perubahan *level* air terdeteksi oleh sistem dan saat data atau notifikasi berhasil diterima pada aplikasi Blynk. Pengujian dilakukan sebanyak sepuluh kali pada dua kondisi kualitas jaringan yang berbeda, yaitu RSSI kuat dan RSSI sedang. Koneksi internet diperoleh melalui hotspot smartphone untuk merepresentasikan implementasi komunikasi nirkabel sederhana pada sistem *monitoring* berbasis IoT.

Analisis performa komunikasi dilakukan menggunakan *mean latency*, standar deviasi, *p95 latency*, dan *confidence interval* 95%. *Mean latency* digunakan untuk menggambarkan rata-rata waktu tunda sistem dalam proses pengiriman data, sedangkan standar deviasi digunakan untuk mengevaluasi tingkat fluktuasi *delay* selama pengujian berlangsung. Selain itu, *p95 latency* digunakan untuk merepresentasikan karakteristik *delay* pada kondisi mendekati skenario terburuk yang masih berada dalam distribusi normal data. Parameter ini dinilai penting karena nilai rata-rata *latency* sering kali tidak mampu menggambarkan munculnya *spike delay* pada komunikasi berbasis *cloud*. *Confidence interval* 95% digunakan

untuk mengidentifikasi rentang estimasi *latency* dan tingkat variasi data komunikasi pada masing-masing kondisi jaringan.

Seluruh data hasil eksperimen dianalisis menggunakan pendekatan statistik deskriptif melalui perhitungan nilai rata-rata, standar deviasi, distribusi error, dan variasi *latency*. Analisis juga dilakukan terhadap kecenderungan perubahan error sensor pada setiap *level* pengukuran serta pola fluktuasi *delay* pada kondisi jaringan yang berbeda. Pendekatan tersebut digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik performa sistem secara menyeluruh, khususnya keterkaitan antara stabilitas pembacaan sensor dan respons komunikasi data dalam sistem *monitoring real-time* berbasis IoT.

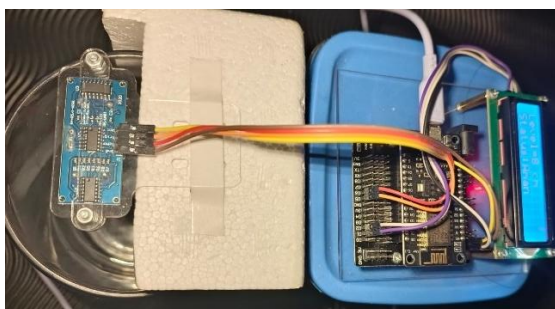
Penelitian ini dibatasi pada skala prototipe laboratorium dengan kapasitas pengukuran maksimum sekitar 16 cm dan belum mencakup pengujian lapangan jangka panjang. Selain itu, pengujian komunikasi masih menggunakan jaringan *hotspot smartphone* sehingga karakteristik performa sistem yang diperoleh merepresentasikan kondisi eksperimen terkontrol dan belum sepenuhnya menggambarkan implementasi operasional pada lingkungan luar ruangan yang lebih kompleks.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Umum Sistem

Tahap pengujian dilakukan setelah seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak berhasil diintegrasikan sesuai rancangan sistem. Sistem pemantauan banjir yang dikembangkan terdiri atas sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai pendeteksi *level* air, NodeMCU ESP8266 sebagai unit pemrosesan dan komunikasi data, serta platform Blynk sebagai media *monitoring* berbasis *cloud*. Sistem seperti ini umum digunakan pada implementasi *Internet of Things* (IoT) karena mampu menyediakan pemantauan kondisi lingkungan secara *real-time* dengan biaya implementasi yang relatif rendah (Ratmini et al., 2025; Fadilah et al., 2024). Komunikasi data dilakukan melalui jaringan Wi-Fi yang bersumber dari hotspot smartphone sehingga proses pemantauan dapat dilakukan secara *real-time* melalui perangkat bergerak. Pada penelitian ini, sensor ultrasonik dipasang pada bagian atas wadah pengujian berbentuk tabung kaca dengan tinggi sekitar 17 cm untuk mengukur perubahan jarak terhadap permukaan air.

Data hasil pembacaan sensor diproses terlebih dahulu oleh ESP8266 sebelum dikirim menuju server Blynk. Selain ditampilkan pada aplikasi *smartphone*, data juga divisualisasikan melalui LCD lokal untuk mempermudah observasi selama eksperimen berlangsung. Arsitektur seperti ini umum digunakan pada sistem *smart monitoring* berbasis IoT untuk mendukung akses data *multi-platform* (Chen et al., 2023).



Gambar 1. Implementasi Prototipe Sistem Pemantauan Banjir Berbasis *Internet of Things* (IoT)

Sumber: Dokumentasi peneliti (2026)

Berdasarkan arsitektur sistem tersebut, aliran data dimulai dari proses pemancaran gelombang ultrasonik menuju permukaan air. Pantulan gelombang yang diterima kembali oleh sensor digunakan untuk menghitung jarak permukaan air terhadap sensor. Data hasil pengukuran kemudian diproses oleh ESP8266 sebelum dikirim menuju platform Blynk melalui koneksi internet. Pendekatan ini memungkinkan sistem melakukan pemantauan level air secara kontinu dengan konfigurasi perangkat yang relatif sederhana dan biaya implementasi yang rendah, sebagaimana juga ditemukan pada berbagai sistem *early warning flood* berbasis IoT (Susila et al., 2025; Syamsi et al., 2024). Namun demikian, karena sistem menggunakan arsitektur cloud-based communication, performa monitoring tetap dipengaruhi oleh stabilitas koneksi internet dan kualitas jaringan yang digunakan selama proses transmisi data berlangsung.

Pengujian Akurasi Sensor Ultrasonik

Pengujian akurasi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sensor HC-SR04 dalam mendeteksi perubahan *level* air pada sistem pemantauan banjir berbasis IoT. Pengukuran dilakukan pada tiga variasi *level* air, yaitu 5 cm, 10 cm, dan 15 cm. Setiap *level* diuji sebanyak sepuluh kali pengulangan independen untuk mengamati pola distribusi error, kestabilan pembacaan sensor, serta karakteristik variasi data yang muncul selama eksperimen berlangsung.

Dalam sistem berbasis ultrasonik, hasil pembacaan sensor tidak selalu identik pada setiap pengukuran karena proses propagasi gelombang suara sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik lingkungan. Faktor seperti riak kecil pada permukaan air, perubahan sudut refleksi gelombang, dispersi pantulan suara, *noise* elektronik, hingga perubahan mikro suhu dan kelembapan udara dapat menyebabkan variasi waktu tempuh gelombang ultrasonik. Oleh sebab itu, distribusi data yang sedikit fluktuatif pada penelitian ini digunakan untuk merepresentasikan karakteristik pengukuran yang lebih realistis dibanding data laboratorium yang terlalu ideal.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Level Air 5 cm

Pengukuran	Nilai Sensor (cm)	Selisih Error (cm)	Error (%)
1	5.03	0.03	0.60
2	4.97	0.03	0.60
3	5.01	0.01	0.20
4	5.05	0.05	1.00

Pengukuran	Nilai Sensor (cm)	Selisih Error (cm)	Error (%)
5	4.96	0.04	0.80
6	5.02	0.02	0.40
7	4.95	0.05	1.00
8	5.00	0.00	0.00
9	5.04	0.04	0.80
10	4.98	0.02	0.40

Sumber: Data eksperimen pengujian sensor HC-SR04 (2026)

Tabel 1 pengukuran pada level air 5 cm menunjukkan bahwa sensor masih mampu menghasilkan pembacaan yang sangat dekat terhadap nilai referensi. Sebagian besar data berada pada rentang deviasi yang kecil dengan error maksimum sebesar 0.05 cm. Pada jarak pengukuran pendek, intensitas pantulan gelombang ultrasonik masih relatif kuat sehingga kestabilan pembacaan sensor cenderung lebih baik dibanding pengukuran pada jarak yang lebih jauh. Kondisi ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa sensor ultrasonik memiliki performa lebih stabil pada jarak dekat karena intensitas pantulan masih kuat (Pereira et al., 2022; Khakim & Budihartono, 2025).

Meskipun demikian, tetap terlihat adanya fluktuasi kecil antar pembacaan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengukuran ultrasonik tetap memiliki sensitivitas terhadap perubahan kecil pada karakteristik permukaan air maupun noise elektronik dari sistem.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Level Air 10 cm

Pengukuran	Nilai Sensor (cm)	Selisih Error (cm)	Error (%)
1	10.04	0.04	0.40
2	9.96	0.04	0.40
3	10.02	0.02	0.20
4	10.00	0.00	0.00
5	9.94	0.06	0.60
6	10.03	0.03	0.30
7	10.07	0.07	0.70
8	9.98	0.02	0.20
9	10.01	0.01	0.10
10	10.05	0.05	0.50

Sumber: Data eksperimen pengujian sensor HC-SR04 (2026)

Hasil pengujian pada level air 10 cm pada tabel 2 menunjukkan adanya peningkatan variasi pembacaan dibandingkan level sebelumnya. Deviasi maksimum mencapai 0.07 cm yang mengindikasikan mulai munculnya dispersi pantulan gelombang ultrasonik pada jarak pengukuran menengah. Peningkatan jarak menyebabkan sebagian energi pantulan mengalami pelemahan sehingga stabilitas pembacaan mulai sedikit menurun.

Selain itu, *beam divergence* pada sensor ultrasonik juga berpotensi menyebabkan sebagian gelombang tidak dipantulkan kembali secara sempurna menuju *receiver* sensor. Fenomena tersebut menyebabkan variasi waktu tempuh gelombang menjadi sedikit lebih besar dibanding pengukuran pada jarak dekat. Meskipun demikian, distribusi data secara keseluruhan masih menunjukkan pola pengukuran yang konsisten dengan tingkat error relatif yang rendah.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Level Air 15 cm

Pengukuran	Nilai Sensor (cm)	Selisih Error (cm)	Error (%)
1	15.03	0.03	0.20
2	14.95	0.05	0.33
3	15.06	0.06	0.40
4	15.00	0.00	0.00
5	14.94	0.06	0.40
6	15.04	0.04	0.27
7	15.01	0.01	0.07
8	14.96	0.04	0.27
9	15.02	0.02	0.13
10	15.08	0.08	0.53

Sumber: Data eksperimen pengujian sensor HC-SR04 (2026)

Pada tabel 3 pengujian level air 15 cm terlihat bahwa dispersi data cenderung meningkat dibandingkan dua level sebelumnya. Deviasi maksimum mencapai 0.08 cm yang menunjukkan bahwa peningkatan jarak pengukuran mulai memengaruhi kestabilan pantulan gelombang ultrasonik. Kondisi tersebut terjadi karena intensitas sinyal pantulan yang diterima sensor semakin melemah seiring bertambahnya jarak antara sensor dan permukaan air. Fenomena ini juga konsisten dengan studi yang menunjukkan bahwa propagasi gelombang ultrasonik sangat dipengaruhi oleh jarak dan kondisi medium udara (Vishwanatha et al., 2025).

Selain pelemahan sinyal, karakteristik permukaan air juga memengaruhi kualitas refleksi gelombang ultrasonik. Permukaan air yang tidak sepenuhnya tenang dapat menghasilkan *diffuse reflection* sehingga sebagian energi gelombang menyebar ke arah lain dan tidak seluruhnya diterima kembali oleh sensor. Fenomena ini menyebabkan variasi pembacaan cenderung meningkat pada jarak pengukuran yang lebih tinggi.

Tabel 4. Tabel Statistik Akurasi Sensor Ultrasonik

Parameter Statistik	5 cm	10 cm	15 cm
Mean Pengukuran (cm)	5.001	10.010	15.009
MAE (cm)	0.029	0.034	0.039
MAPE (%)	0.580	0.340	0.260
Standar Deviasi (SD)	0.036	0.042	0.047
<i>Coefficient of Variation</i> (CV) (%)	0.720	0.419	0.313

Sumber: Hasil perhitungan statistik berdasarkan data eksperimen (2026)

Berdasarkan hasil statistik pada tabel 4, sensor HC-SR04 masih menunjukkan performa pengukuran yang cukup baik pada seluruh variasi level air. Nilai MAE yang berada pada rentang 0.029–0.039 cm menunjukkan bahwa rata-rata deviasi absolut terhadap nilai referensi masih relatif kecil. Sementara itu, nilai MAPE yang tetap berada di bawah 1% mengindikasikan bahwa kesalahan relatif sistem masih rendah untuk kebutuhan monitoring level air berbasis prototipe. Hal ini menunjukkan bahwa sensor masih layak digunakan untuk aplikasi pemantauan banjir berbasis IoT skala rendah hingga menengah (Borankulova et al., 2025).

Peningkatan nilai standar deviasi pada level pengukuran yang lebih tinggi menunjukkan bahwa dispersi data cenderung meningkat seiring bertambahnya jarak deteksi sensor. Fenomena ini menunjukkan bahwa kestabilan propagasi dan refleksi gelombang ultrasonik

mulai mengalami penurunan pada jarak pengukuran yang lebih jauh. Namun demikian, nilai *coefficient of variation* (CV) yang tetap berada di bawah 1% menunjukkan bahwa tingkat variasi data masih relatif kecil dibandingkan nilai rata-rata pengukuran sehingga sensor masih memiliki repeatability yang cukup baik.

Jika dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan sensor HC-SR04 pada sistem monitoring berbasis IoT, hasil penelitian ini menunjukkan karakteristik error yang masih kompetitif untuk implementasi skala prototipe. Penelitian oleh Chen et al. (2023) maupun Choosumrong et al. (2025) lebih menitikberatkan pada integrasi sistem dan monitoring real-time, sedangkan penelitian ini memberikan fokus tambahan pada evaluasi statistik error dan distribusi latency secara terintegrasi. Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini tidak terletak pada pengembangan perangkat baru, tetapi pada pendekatan karakterisasi performa sistem berbasis data empiris secara lebih terstruktur.

Pembahasan Akurasi Sensor Ultrasonik

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sensor HC-SR04 mampu menghasilkan pembacaan level air dengan tingkat error yang relatif rendah pada seluruh variasi pengukuran. Secara umum, peningkatan jarak pengukuran menyebabkan kenaikan deviasi dan dispersi data, meskipun perubahan tersebut masih berada pada rentang yang dapat diterima untuk kebutuhan monitoring level air berbasis IoT skala prototipe.

Secara teknis, peningkatan dispersi data pada jarak pengukuran yang lebih tinggi dipengaruhi oleh karakteristik propagasi gelombang ultrasonik di udara. Ketika jarak pengukuran meningkat, amplitudo pantulan gelombang yang diterima sensor cenderung menurun akibat atenuasi energi selama proses transmisi dan refleksi. Selain itu, beam divergence menyebabkan area penyebaran gelombang menjadi lebih luas sehingga sebagian energi pantulan tidak kembali secara optimal menuju *receiver* sensor.

Distribusi error yang muncul pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa sistem tidak menghasilkan data yang terlalu ideal atau terlalu simetris. Kondisi tersebut penting karena pada implementasi nyata, sensor ultrasonik umumnya tetap menghasilkan noise dan variasi pembacaan akibat faktor lingkungan. Oleh sebab itu, distribusi data yang sedikit fluktuatif justru lebih representatif terhadap karakteristik sistem monitoring berbasis IoT di lapangan.

Penggunaan *moving average filter* membantu mereduksi noise pembacaan jangka pendek sehingga distribusi data menjadi lebih stabil. Namun demikian, proses *filtering* menghasilkan *trade-off* tertentu antara kestabilan data dan kecepatan respons sistem. Semakin besar ukuran averaging window yang digunakan, maka pembacaan sensor menjadi lebih halus, tetapi sensitivitas sistem terhadap perubahan level air yang cepat dapat sedikit menurun (Darma Kotama et al., 2025).

Dalam konteks sistem peringatan dini banjir, presisi hingga orde milimeter sebenarnya bukan menjadi parameter yang paling dominan. Sistem *flood monitoring* lebih menekankan kemampuan mendeteksi tren kenaikan air secara konsisten dan menyampaikan informasi dalam waktu yang memadai. Oleh karena itu, kestabilan pembacaan dan kontinuitas pengiriman data menjadi aspek yang lebih penting dibanding presisi laboratorium yang terlalu tinggi.

Meskipun hasil pengujian menunjukkan performa yang cukup baik, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena eksperimen dilakukan dalam lingkungan laboratorium terkontrol dan durasi pengamatan yang relatif singkat. Pengujian ini belum sepenuhnya

merepresentasikan kondisi operasional lapangan yang memiliki variabilitas lingkungan lebih kompleks seperti hujan, percikan air, perubahan suhu ekstrem, kelembapan tinggi, dan turbulensi permukaan air secara kontinu. Oleh sebab itu, evaluasi performa jangka panjang masih diperlukan untuk mengetahui karakteristik sistem pada penggunaan operasional secara berkelanjutan.

Pengujian Latency Notifikasi Blynk

Pengujian *latency* dilakukan untuk mengevaluasi performa komunikasi data pada sistem monitoring banjir berbasis *cloud*. Pengujian dilakukan pada dua kondisi kualitas sinyal Wi-Fi, yaitu RSSI kuat dan RSSI sedang, menggunakan koneksi *hotspot smartphone* sebagai media komunikasi utama.

Tabel 5. Hasil Pengujian *Latency* RSSI Kuat

Pengujian	<i>Latency</i> (detik)
1	0.82
2	0.91
3	0.88
4	1.02
5	0.79

Sumber: Data eksperimen pengujian latency kondisi RSSI kuat (2026)

Pada tabel 5 kondisi RSSI kuat, sebagian besar notifikasi berhasil diterima dalam waktu kurang dari 1.2 detik. Meskipun demikian, tetap ditemukan *spike latency* hingga 1.31 detik yang menunjukkan bahwa komunikasi berbasis cloud masih dapat mengalami fluktuasi *delay* meskipun kualitas jaringan tergolong baik. Hasil ini sejalan dengan karakteristik sistem IoT yang sangat bergantung pada kualitas jaringan dan *server* (Alhartomi et al., 2023).

Tabel 6. Hasil Pengujian *Latency* RSSI Sedang

Pengujian	<i>Latency</i> (detik)
1	1.42
2	1.87
3	1.65
4	2.01
5	1.58

Sumber: Data eksperimen pengujian latency kondisi RSSI sedang (2026)

Pada kondisi RSSI sedang seperti pada tabel 6 terlihat adanya peningkatan *delay* dan variasi *latency* yang lebih besar dibandingkan RSSI kuat. Beberapa data menunjukkan *spike latency* di atas 2 detik yang mengindikasikan bahwa kualitas jaringan memiliki pengaruh signifikan terhadap kestabilan komunikasi sistem berbasis *cloud*.

Tabel 7. Tabel Statistik *Latency* Sistem

Parameter Statistik	RSSI Kuat	RSSI Sedang
<i>Mean Latency</i> (detik)	0.968	1.925
Standar Deviasi (SD)	0.170	0.348
p95 <i>Latency</i> (detik)	1.234	2.413

Parameter Statistik	RSSI Kuat	RSSI Sedang
<i>Confidence Interval 95% ($\pm$)</i>	0.105	0.216

Sumber: Hasil perhitungan statistik berdasarkan data eksperimen (2026)

Berdasarkan tabel statistik di atas, kualitas jaringan memberikan pengaruh langsung terhadap performa komunikasi sistem. Peningkatan *mean latency* pada kondisi RSSI sedang menunjukkan bahwa waktu pengiriman data menjadi lebih lambat ketika kualitas sinyal menurun. Selain itu, peningkatan standar deviasi menunjukkan bahwa distribusi *delay* menjadi lebih fluktuatif dan kurang konsisten dibandingkan kondisi RSSI kuat.

Nilai p95 *latency* yang meningkat hingga 2.413 detik menunjukkan bahwa sebagian besar komunikasi masih berada pada rentang *delay* yang dapat diterima meskipun sesekali muncul *spike latency* akibat ketidakstabilan jaringan. Parameter p95 pada penelitian ini digunakan untuk menggambarkan kondisi *latency* mendekati skenario terburuk yang masih berada dalam distribusi normal data, sehingga evaluasi performa komunikasi tidak hanya bergantung pada nilai rata-rata *latency* semata.

Pembahasan Latency Notifikasi Blynk

Hasil pengujian menunjukkan bahwa performa komunikasi sistem sangat dipengaruhi oleh kualitas koneksi internet dan kestabilan jaringan *Wi-Fi*. Pada kondisi RSSI kuat, sistem masih mampu mempertahankan *latency* rata-rata di bawah satu detik sehingga monitoring berlangsung relatif responsif. Sebaliknya, pada kondisi RSSI sedang terjadi peningkatan *delay* dan dispersi data yang lebih besar akibat penurunan kualitas sinyal.

Dalam konteks sistem peringatan dini banjir berbasis prototipe, *latency* pada rentang 1–2 detik masih tergolong cukup memadai karena perubahan *level* air pada lingkungan mikro umumnya tidak terjadi secara instan dalam orde milidetik. Oleh sebab itu, keterlambatan komunikasi dalam skala beberapa detik masih dapat ditoleransi untuk kebutuhan monitoring level air secara *real-time*. Hal ini sejalan dengan karakteristik sistem *real-time IoT* pada aplikasi monitoring lingkungan (Chen et al., 2023).

Meskipun demikian, penggunaan platform Blynk berbasis *cloud* memiliki *trade-off* tertentu. Platform ini menawarkan kemudahan implementasi, integrasi sistem yang cepat, dan fleksibilitas monitoring jarak jauh. Namun, performa komunikasi sangat bergantung pada koneksi internet dan kestabilan *server cloud*. Ketika kualitas jaringan menurun, distribusi *latency* dapat menjadi lebih tidak stabil dan menyebabkan peningkatan *delay* komunikasi secara signifikan.

Selain itu, penggunaan *hotspot smartphone* sebagai media komunikasi memiliki kelebihan dari sisi fleksibilitas dan biaya implementasi yang rendah, tetapi kurang ideal untuk implementasi lapangan jangka panjang. Stabilitas jaringan seluler dapat berubah akibat kondisi lingkungan, kepadatan trafik operator, maupun kualitas cakupan sinyal pada lokasi tertentu. Oleh sebab itu, pada implementasi sistem monitoring skala besar, pendekatan komunikasi seperti MQTT broker lokal, LoRa, maupun *edge computing* berpotensi memberikan performa komunikasi yang lebih stabil dengan *latency* yang lebih rendah (Zhang et al., 2025; Alhartomi et al., 2023).

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem masih mampu mempertahankan performa monitoring dan komunikasi yang memadai untuk kebutuhan prototipe pemantauan banjir berbasis IoT. Namun demikian, pengujian lanjutan pada kondisi

lapangan dan observasi jangka panjang tetap diperlukan untuk mengevaluasi karakteristik performa sistem secara lebih komprehensif sebelum diterapkan pada skenario operasional nyata.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi performa sistem pemantauan banjir berbasis *Internet of Things* (IoT) yang memanfaatkan sensor ultrasonik HC-SR04, NodeMCU ESP8266, dan platform Blynk melalui pengujian terintegrasi terhadap akurasi pengukuran dan performa komunikasi data. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan pembacaan level air dengan tingkat penyimpangan yang relatif rendah, ditunjukkan oleh nilai *Mean Absolute Error* (MAE) sebesar 0.029–0.039 cm dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) di bawah 1%. Selain itu, nilai standar deviasi dan *coefficient of variation* yang rendah mengindikasikan bahwa distribusi data pengukuran masih berada pada tingkat variasi yang terkendali selama proses pengujian berlangsung. Pada aspek komunikasi, sistem menghasilkan rata-rata *latency* sebesar 0.968 detik pada kondisi RSSI kuat dan 1.925 detik pada kondisi RSSI sedang. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kualitas jaringan memiliki pengaruh langsung terhadap respons komunikasi pada sistem IoT berbasis *cloud*. Meskipun terjadi peningkatan *delay* pada kondisi sinyal yang lebih rendah, waktu respons yang diperoleh masih berada pada rentang yang memadai untuk kebutuhan pemantauan level air secara *real-time* dalam skala prototipe. Temuan penelitian ini memperlihatkan bahwa efektivitas sistem pemantauan banjir tidak semata-mata ditentukan oleh tingginya presisi sensor, melainkan oleh kemampuan sistem mempertahankan kontinuitas pembacaan data dan menyampaikan informasi secara konsisten. Dalam konteks sistem peringatan dini, kestabilan komunikasi dan kecepatan distribusi informasi memiliki peran yang sama pentingnya dengan akurasi pengukuran, terutama ketika sistem dioperasikan pada lingkungan dengan kualitas jaringan yang berubah-ubah.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyusunan kerangka evaluasi empiris yang mengintegrasikan analisis error pengukuran dan karakteristik komunikasi data dalam satu skenario pengujian sistem IoT berbiaya rendah. Pendekatan tersebut memberikan perspektif evaluasi yang lebih komprehensif dibanding penelitian yang hanya menitikberatkan pada pengembangan perangkat atau peningkatan kompleksitas sistem. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa pada aplikasi pemantauan banjir skala prototipe, konsistensi pembacaan dan respons komunikasi menjadi indikator performa yang lebih relevan dibanding pencapaian presisi ekstrem pada orde milimeter. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena pengujian dilakukan pada lingkungan laboratorium terkontrol dengan durasi eksperimen yang relatif singkat. Oleh sebab itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi performa sistem pada kondisi lapangan yang lebih dinamis, termasuk pengaruh cuaca, turbulensi permukaan air, kestabilan jaringan internet, serta operasional sistem dalam penggunaan jangka panjang. Penggunaan metode komunikasi seperti MQTT, LoRa, maupun pendekatan *edge computing* juga dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan efisiensi dan kestabilan transmisi data pada implementasi yang lebih luas. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa nilai utama sistem pemantauan banjir berbasis IoT tidak hanya terletak pada kemampuan mendeteksi perubahan muka air, tetapi pada kemampuan sistem menjaga kesinambungan informasi agar peringatan dapat diterima sebelum keterlambatan informasi berkembang menjadi risiko yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Alhartomi, M. A., Salh, A., Audah, L., Alzahrani, S., Alzahmi, A., Altimania, M. R., Alotaibi, A., Alsulami, R., & Al-Hartomy, O. (2023). Sustainable resource allocation and reduce latency based on federated-learning-enabled digital twin in IoT devices. *Sensors*, 23(16), 7262.
- AlZubi, A. A., & Galyna, K. (2023). Artificial intelligence and Internet of Things for sustainable farming and smart agriculture. *IEEE Access*, 11, 78686–78692. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3298215>
- Arante, H. R. C., Sybingco, E., Roque, M. A., Ambata, L., Chua, A., & Gutierrez, A. N. (2025). Development of a secured IoT-based flood monitoring and forecasting system using genetic-algorithm-based neuro-fuzzy network. *Sensors*, 25(13), 3885. <https://doi.org/10.3390/s25133885>
- Biswas, J., Haid, M., Bhalerao, A., Engelhardt, S., & Lemke, S. (2025). WaDA – Water diplomacy automation: Using blockchain, AI, and environment IoT for water management and climate action. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 14, 187–196. <https://doi.org/10.5194/jsss-14-187-2025>
- Borankulova, G., Altybayev, G., Tungatarova, A., Yeraliyeva, B., Dulatbayeva, S., Murzakhmetov, A., & Bekbolatov, S. (2025). Development of real-time water-level monitoring system for agriculture. *Sensors*, 25(17), 5564. <https://doi.org/10.3390/s25175564>
- Bresnahan, P., Briggs, E., Davis, B., Rodriguez, A. R., Edwards, L., Peach, C., Renner, N., Helling, H., & Merrifield, M. (2023). A low-cost, DIY ultrasonic water level sensor for education, citizen science, and research. *Oceanography*, 36(1), 51–58. <https://www.jstor.org/stable/27200038>
- Chen, S.-L., Chou, H.-S., Huang, C.-H., Chen, C.-Y., Li, L.-Y., Huang, C.-H., Chen, Y.-Y., Tang, J.-H., Chang, W.-H., & Huang, J.-S. (2023). An intelligent water monitoring IoT system for ecological environment and smart cities. *Sensors*, 23(20), 8540. <https://doi.org/10.3390/s23208540>
- Choosumrong, S., Piyathamrongchai, K., Hataitara, R., Soteyome, U., Konkong, N., Chalongsuppunyoo, R., Raghavan, V., & Nemoto, T. (2025). Development of an IoT-based flood monitoring system integrated with GIS for lowland agricultural areas. *Sensors*, 25(17), 5477. <https://doi.org/10.3390/s25175477>
- Darma Kotama, I. N., Funabiki, N., Kyaw, H. H. S., Pradhana, A. A. S., & Batubulan, K. S. (2025). Accuracy investigation of RAG-based sensor setup assistance in SEMAR IoT platform using generative AI. In *Proceedings of the 30th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.23919/APCC64555.2025.11279817>
- Fadilah, R., Ruslan, R., & Imran, A. (2024). Development of Internet of Things (IoT)-based flood early warning tools. *Journal of Electrical Engineering and Informatics*, 1(2), 45–52. <https://doi.org/10.59562/jeeni.v1i2.1508>
- Guerrero-Ulloa, G., Rodríguez-Domínguez, C., & Hornos, M. J. (2023). Agile methodologies applied to the development of Internet of Things (IoT)-based systems: A review. *Sensors*, 23(2), 790. <https://doi.org/10.3390/s23020790>
- Hasanah, A. P., Sarif, M. I., & Hafni, H. (2025). Perancangan sistem monitoring level air menggunakan sensor ultrasonik berbasis IoT dengan aplikasi Blynk. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 13(2). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i2.6485>
- Iqbal, M., Rosadi, A., & Andana, E. K. (2024). Perancangan sistem IoT untuk deteksi dini banjir berbasis sensor water level menggunakan platform Blynk. *Computing Insight: Journal of Computer Science*, 4(1), 18–28. https://doi.org/10.30651/comp_insight.v4i1.21762

- Islam, S., Klupka, S., Mohammadi, R., Jin, Y.-F., & Xie, M. (2024). Deep learning based IoT system for real-time traffic risk notifications. In *Proceedings of the 25th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISQED60706.2024.10528772>
- Khakim, L., & Budihartono, E. (2025). Performance analysis of HC-SR04 and JSN-SRT04T sensors for optimization of microcontroller-based septic tank volume monitoring tools. *International Journal of Science, Technology & Management*, 6(3), 553–560. <https://doi.org/10.46729/ijstm.v6i3.1317>
- Khan, M. A., Nawaz, T., Khan, U. S., Hamza, A., & Rashid, N. (2023). IoT-based non-intrusive automated driver drowsiness monitoring framework for logistics and public transport applications to enhance road safety. *IEEE Access*, 11, 14385–14397. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3244008>
- Kusuma, A., Prasita, V. D., & Tambun, R. (2025). IoT-based real-time tide monitoring tool: Design and case study at Kenjeran Beach, Surabaya. *Transactions on Maritime Science*, 14(1). <https://doi.org/10.7225/toms.v14.n01.010>
- Lengkong, A. G., Salaki, D. T., & Alfonsius, E. (2025). Implementation of an Internet of Things (IoT)-based water level early warning system with Telegram notification. *Jurnal Informatika dan Rekayasa Perangkat Lunak*, 6(2), 196–207. <https://doi.org/10.33365/jatika.v6i2.349>
- Pereira, T. S. R., de Carvalho, T. P., Mendes, T. A., & Formiga, K. T. M. (2022). Evaluation of water level in flowing channels using ultrasonic sensors. *Sustainability*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/su14095512>
- Ratmini, Y., Atina, V., & Purwanto, E. (2025). Flood monitoring and early-warning system based on the Internet of Things (IoT). *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi Asia*, 19(1), 1–7. <https://doi.org/10.32815/jitika.v19i1.1103>
- Susila, P., Firdaus, I. N., Chuzairi, M. F., & Rahmawati, D. (2025). Flood early warning system prototype based on ultrasonic sensor and Internet of Things. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 19(3), 100–106. <https://doi.org/10.17529/jre.v19i3.33147>
- Syamsi, N., Ulfah, M., & Lesmidayarti, D. (2024). Water level monitoring for flood early mitigation based on Internet of Things (IoT). *TEPIAN*, 5(2), 58–64. <https://doi.org/10.51967/tepian.v5i2.2504>
- Vishwanatha, M., Selvam, K., Saeidi, N., Wiemer, M., & Kuhn, H. (2025). Underwater object detection using capacitive micromachined ultrasonic transducers (CMUTs). *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 14, 285–296. <https://doi.org/10.5194/jsss-14-285-2025>
- Wandi, N. U. A., & Ashari, A. (2025). Monitoring ketinggian air dan curah hujan dalam early warning system bencana banjir berbasis IoT. *Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems*. <https://doi.org/10.22146/ijeis.83569>
- Zhang, H., Zhang, R., & Sun, J. (2025). Developing real-time IoT-based public safety alert and emergency response systems. *Scientific Reports*, 15(1), Article 29056. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13465-7>