

RANCANG BANGUN PROTOTYPE SISTEM MONITORING KETINGGIAN AIR SUNGAI DENGAN DETEKSI ANOMALI MENGGUNAKAN ALGORITMA ISOLATION FOREST BERBASIS IOT

Vito Hafizh Cahaya Putra ¹, Muhammad Al-Husaini², Agung Rachmat Raharja ³,
Ghanim Kanugrahan ⁴, Pebrianti Panjaitan ⁵, Karen Etania Saputra ⁶

^{1,4,5} Informatika, Universitas Satu

Jl. BKR No.63, Ancol, Kec. Regol, Kota Bandung, Jawa Barat 40253

³ Teknik Informatika, Universitas Bandung

Jl. Cipagalo Girang No.24, Margasari, Kec. Buahbatu, Kota Bandung, Jawa Barat 40286

² Informatika, Universitas Siliwangi

Jl. Siliwangi No.24, Kahuripan, Kec. Tawang, Kab. Tasikmalaya, Jawa Barat 46115

⁶ Teknik Informatika, Universitas Bina Nusantara

Jl. Sentra Dago Pakar Raya Komplek Dago Pakar Blok F-2, Mekarsaluyu, Kec. Cimenyan,
Kabupaten Bandung, Jawa Barat 40191

vito.putra@univ.satu.ac.id

ABSTRAK

Ketinggian air sungai yang berubah secara dinamis merupakan salah satu indikator penting dalam mengidentifikasi potensi terjadinya banjir, terutama pada wilayah dengan intensitas curah hujan yang tinggi. Perubahan tersebut tidak selalu berlangsung secara teratur, melainkan dapat terjadi secara tiba-tiba dan menyimpang dari pola normal sehingga sulit dideteksi apabila hanya mengandalkan pengamatan manual atau pendekatan berbasis ambang batas tertentu. Penelitian ini mengembangkan prototype sistem monitoring ketinggian air sungai berbasis Internet of Things (IoT) dengan deteksi anomali menggunakan algoritma Isolation Forest. Sistem memanfaatkan sensor ultrasonik yang terintegrasi dengan ESP32 untuk melakukan pengukuran, pengolahan, dan pengiriman data ke platform ThingSpeak secara real-time. Dataset historis yang digunakan berjumlah 6.621 data dengan pembagian 4.634 data latih dan 1.987 data uji. Hasil pengujian menunjukkan model mampu mendeteksi 22 data anomali pada data uji dengan persentase anomali sebesar 1,11% dan nilai rata-rata anomaly score sebesar 0,1885. Pada pengujian real-time selama 60 menit, sistem berhasil mendeteksi 50 anomali dari 235 data sensor serta mengklasifikasikan kondisi ke dalam kategori aman, waspada, dan bahaya. Integrasi IoT dan Isolation Forest menghasilkan sistem monitoring yang responsif, adaptif, dan berpotensi mendukung pengembangan early warning system banjir secara lebih efektif dan berkelanjutan.

Kata kunci : *Internet of Things, ketinggian air, deteksi anomali, Isolation Forest, monitoring real-time, ThingSpeak*

1. PENDAHULUAN

Banjir merupakan salah satu bencana hidrometeorologi yang kerap terjadi di berbagai wilayah Indonesia, khususnya pada daerah yang dilalui aliran sungai dengan intensitas curah hujan tinggi. Meluapnya air sungai dapat menimbulkan dampak yang signifikan, seperti kerusakan infrastruktur, kerugian ekonomi, serta ancaman terhadap keselamatan masyarakat di sekitar daerah aliran sungai. Oleh karena itu, pemantauan ketinggian air sungai secara berkala menjadi langkah penting dalam mendukung upaya mitigasi bencana banjir serta penyediaan informasi peringatan dini bagi masyarakat dan pihak terkait [1], [2].

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam beberapa tahun terakhir memberikan peluang yang luas dalam pengembangan sistem pemantauan lingkungan yang bersifat otomatis dan terintegrasi. Melalui teknologi ini, berbagai perangkat sensor dapat dimanfaatkan untuk mengumpulkan data kondisi lingkungan secara *real-time* dan mengirimkannya ke platform berbasis *cloud*,

sehingga memungkinkan proses pemantauan dilakukan secara jarak jauh [3], [4]. Dalam konteks *monitoring* ketinggian air sungai, penggunaan sensor ultrasonik menjadi salah satu solusi yang cukup efektif karena mampu melakukan pengukuran tinggi permukaan air secara kontinu dengan tingkat efisiensi yang lebih baik dibandingkan metode manual [5].

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem monitoring berbasis IoT untuk mendukung sistem peringatan dini banjir. Umumnya, sistem tersebut memanfaatkan mikrokontroler dan jaringan komunikasi untuk mengirimkan data ketinggian air ke platform monitoring secara real-time [6], [7].

Namun demikian, sebagian besar pendekatan yang digunakan masih berbasis ambang batas tertentu dalam menentukan kondisi aman, waspada, atau bahaya. Pendekatan ini memiliki keterbatasan karena perubahan ketinggian air tidak selalu mengikuti pola yang tetap, sehingga potensi kenaikan yang bersifat tidak normal dapat terlewatkan [2], [8].

Seiring dengan perkembangan analisis data,

metode *machine learning* mulai dimanfaatkan untuk meningkatkan kemampuan analisis pada sistem pemantauan. Salah satu pendekatan yang relevan adalah deteksi anomali, yang bertujuan mengidentifikasi data yang menyimpang dari pola normal [9].

Algoritma *Isolation Forest* menjadi salah satu metode yang banyak digunakan karena kemampuannya dalam mengisolasi data anomali secara efisien [10], [11].

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan merancang *prototype* sistem *monitoring* ketinggian air sungai berbasis IoT yang terintegrasi dengan algoritma *Isolation Forest* guna mendeteksi anomali secara *real-time* sebagai bagian dari sistem peringatan dini banjir.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Berbagai penelitian telah mengembangkan sistem *monitoring* ketinggian air dengan memanfaatkan sensor yang terintegrasi dengan mikrokontroler dan platform berbasis *cloud*. Sensor ultrasonik maupun sensor tekanan air umum digunakan untuk mendeteksi perubahan tinggi permukaan air secara *real-time*, dengan data yang dikirim melalui jaringan seperti Wi-Fi atau GSM dan ditampilkan dalam bentuk grafik. Penelitian terkini menunjukkan bahwa sistem *monitoring* berbasis IoT mampu menyediakan informasi ketinggian air secara kontinu serta mendukung sistem peringatan dini banjir [12].

Pemanfaatan mikrokontroler seperti ESP32 juga semakin luas karena mendukung komunikasi nirkabel dan efisiensi daya. Penelitian untuk mengembangkan sistem berbasis IoT menggunakan sensor ultrasonik dan ESP32 untuk pengukuran otomatis serta pengiriman data ke platform internet [13].

Terdapat pengembangan sistem bernama RiverCore sebagai sistem *monitoring* berbasis IoT dengan jaringan seluler untuk pemantauan jarak jauh [14].

Sebagian besar sistem masih menggunakan pendekatan ambang batas untuk menentukan kondisi. Metode ini memiliki keterbatasan karena hanya merespons saat nilai melampaui batas tertentu, sehingga perubahan tidak normal dapat terlewat. Sistem *threshold* umumnya memicu peringatan tanpa mempertimbangkan pola perubahan data secara menyeluruh [15].

Oleh karena itu, *machine learning* mulai dimanfaatkan untuk meningkatkan kemampuan analisis. Pengembangan sistem yang telah dilakukan menunjukkan bahwa integrasi IoT dan kecerdasan buatan mampu meningkatkan adaptivitas sistem [16], sementara adanya penelitian menunjukkan bahwa deteksi anomali dapat mengidentifikasi pola data secara lebih akurat [17].

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa integrasi IoT dan *machine*

learning memiliki potensi besar dalam meningkatkan efektivitas sistem peringatan dini banjir serta menghasilkan sistem *monitoring* yang lebih responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

2.2. Anomali

Anomali merupakan kondisi ketika data menyimpang dari pola normal atau kebiasaan yang telah terbentuk. Dalam suatu kumpulan data, anomali ditandai oleh nilai yang tidak wajar, baik berupa kenaikan maupun penurunan dari pola umum. Pada data deret waktu, anomali dapat dikenali melalui perubahan nilai yang terjadi secara tiba-tiba dan tidak mengikuti tren sebelumnya [18].

2.3. Machine Learning

Machine learning [19] merupakan bagian dari kecerdasan buatan yang memanfaatkan data untuk mempelajari pola tanpa perlu diprogram secara rinci. Pendekatan ini memungkinkan sistem meningkatkan kinerja berdasarkan pengalaman dan data yang tersedia. Proses pembelajaran dilakukan melalui pengenalan pola untuk menghasilkan prediksi atau keputusan. *Machine learning* terdiri dari *supervised*, *unsupervised*, dan *reinforcement learning*, serta banyak digunakan karena mampu mengolah data secara efektif dan beradaptasi terhadap perubahan kondisi.

2.4. Algoritma Isolation Forest

Algoritma *Isolation Forest* [20] banyak digunakan dalam deteksi anomali karena kemampuannya mengidentifikasi data menyimpang melalui proses isolasi. Metode ini berasumsi bahwa data anomali lebih mudah dipisahkan dibandingkan data normal. Prosesnya dilakukan dengan membangun sejumlah pohon secara acak, sehingga data anomali akan terisolasi dalam percabangan yang lebih sedikit. Pendekatan ini tidak bergantung pada jarak atau kepadatan data, sehingga lebih efisien untuk data besar dan berdimensi tinggi.

2.5. Internet of Things

Internet of Things (IoT) [21] merupakan konsep jaringan yang menghubungkan berbagai objek melalui internet sehingga dapat saling berkomunikasi dan bertukar data secara mandiri. Perangkat yang digunakan umumnya dilengkapi sensor, aktuator, dan kemampuan komputasi untuk mengumpulkan serta mengirimkan data secara *real-time*. Integrasi teknologi ini memungkinkan terciptanya sistem cerdas yang adaptif, efisien, dan mendukung pengambilan keputusan.

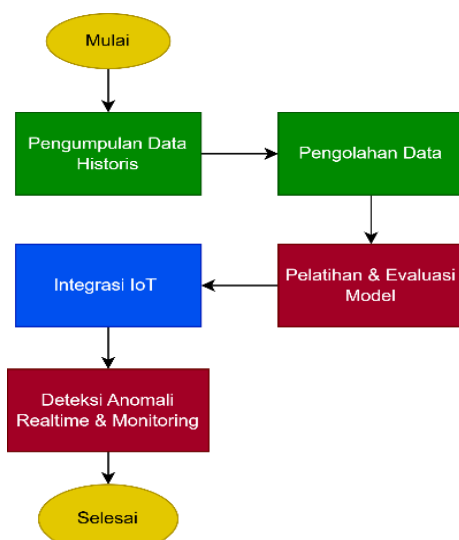
2.6. Board Development Berbasis ESP32

Board development berbasis ESP32 [22] merupakan mikrokontroler yang banyak digunakan dalam sistem *Internet of Things* karena telah dilengkapi modul Wi-Fi dan Bluetooth. Perangkat ini memiliki kemampuan pemrosesan yang baik serta mendukung berbagai antarmuka seperti GPIO, ADC, dan PWM.

Dengan konsumsi daya yang efisien dan fleksibilitas pemrograman, ESP32 banyak dimanfaatkan dalam sistem *monitoring* dan otomasi.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan merancang *prototype* sistem *monitoring* ketinggian air sungai berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan deteksi anomali menggunakan algoritma *Isolation Forest*. Sistem dirancang untuk memantau ketinggian air secara berkala serta mendeteksi perubahan pola yang tidak normal sebagai bagian dari peringatan dini banjir. Tahapan penelitian meliputi pengolahan data historis, pembentukan fitur, pelatihan model, dan implementasi sistem yang terintegrasi dengan platform IoT, seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan alur penelitian pada Gambar 1, proses dimulai dari pengumpulan dan *preprocessing* data historis, dilanjutkan dengan feature engineering dan pelatihan model *Isolation Forest*. Model yang dihasilkan kemudian diimplementasikan pada sistem monitoring untuk mendeteksi anomali ketinggian air secara *real-time*.

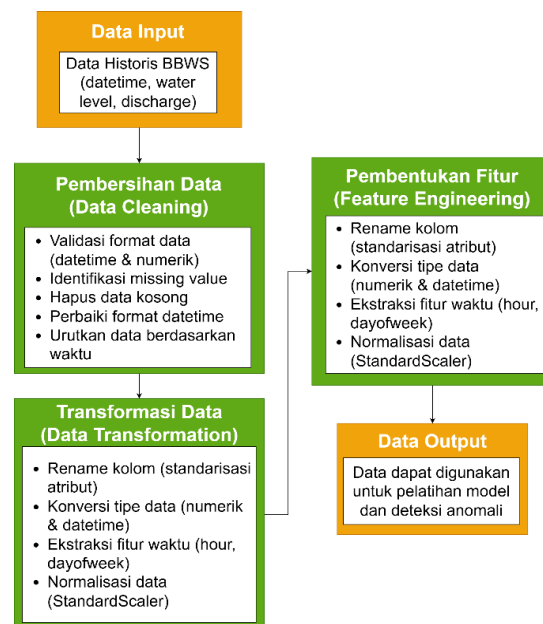
3.1. Pengumpulan Data Historis

Tahap awal penelitian dimulai dengan pengumpulan data historis ketinggian air sungai sebagai dasar pengembangan model deteksi anomali. Data diperoleh dari sistem pemantauan BBWS Citarum di Baleendah melalui platform

daring. Dataset terdiri atas atribut waktu, ketinggian air, dan debit dengan total 6.627 *record* dalam format CSV. Karena masih berupa data mentah, dilakukan pembersihan melalui identifikasi nilai hilang, kesalahan format, dan inkonsistensi waktu. Data tidak valid dihapus, sedangkan data valid diurutkan berdasarkan waktu untuk tahap pengolahan selanjutnya.

3.2. Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan untuk memastikan kualitas data historis sebelum analisis. Tahapan yang dilakukan meliputi pembersihan data, transformasi data, serta pembentukan fitur agar sesuai dengan kebutuhan pemodelan.



Gambar 2. Pengolahan Data

Pada tahap pembersihan data dilakukan pengecekan format waktu, nilai numerik, serta identifikasi data hilang untuk menghapus data tidak lengkap. Data kemudian diseragamkan dan diurutkan. Tahap transformasi mencakup standarisasi kolom dan tipe data. Selanjutnya dilakukan ekstraksi informasi waktu seperti jam dan hari. Normalisasi dengan *StandardScaler* diterapkan untuk menyetarakan skala variabel. Hasil pengolahan ini menghasilkan fitur yang digunakan dalam pelatihan model dan deteksi anomali, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

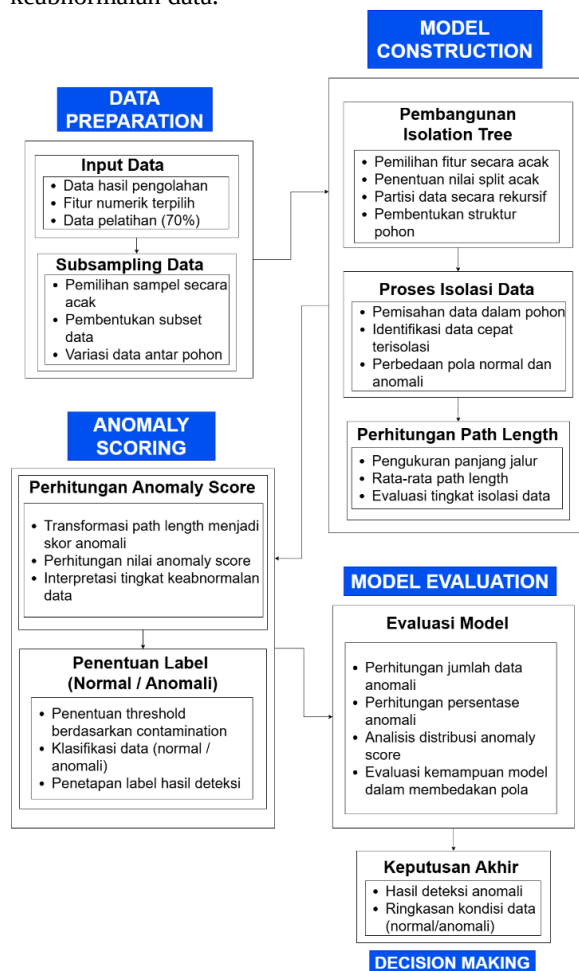
Tabel 1. Kumpulan Atribut Hasil Pengolahan Data

No	Nama Fitur	Tipe Data	Deskripsi
1	datetime	Datetime	Waktu pencatatan data tinggi muka air dan debit
2	water_level	Float	Nilai tinggi muka air pada waktu tertentu
3	discharge	Float	Nilai debit air pada waktu tertentu
4	hour	Integer	Informasi jam yang diekstraksi dari atribut datetime
5	day_of_week	Integer	Informasi hari dalam seminggu (0–6) yang diekstraksi dari datetime
6	water_level_norm	Float	Nilai tinggi muka air yang telah dinormalisasi
7	discharge_norm	Float	Nilai debit air yang telah dinormalisasi

Berdasarkan Tabel 1, fitur yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari atribut utama dan atribut hasil transformasi. Atribut waktu dimanfaatkan untuk mengekstraksi informasi temporal, sedangkan atribut numerik yang telah dinormalisasi digunakan untuk meningkatkan kinerja model dalam mengenali pola data. Kombinasi fitur tersebut diharapkan mampu merepresentasikan karakteristik data secara lebih optimal dalam proses deteksi anomali.

3.3. Pelatihan dan Evaluasi Model

Penelitian ini dilakukan melalui tahapan terstruktur untuk membangun model deteksi anomali menggunakan algoritma *Isolation Forest*. Tahap awal meliputi data preparation dengan pemilihan fitur numerik dan pembagian data pelatihan sebesar 70%. Selanjutnya dilakukan *subsampling* untuk meningkatkan keberagaman data. Pada tahap model *construction*, algoritma membangun *isolation tree* secara acak dan mempartisi data secara rekursif. Data menyimpang akan lebih cepat terisolasi, kemudian dihitung *path length* untuk menentukan tingkat keabnormalan data.



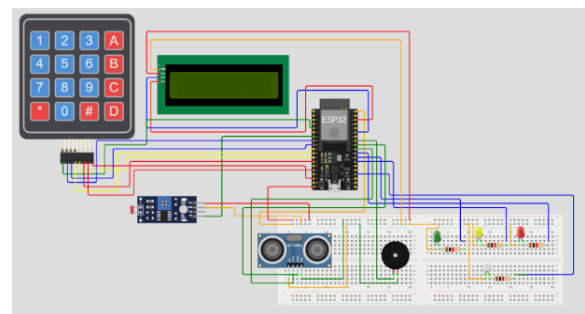
Gambar 3. Pelatihan dan Evaluasi Model

Nilai *path length* ditransformasikan menjadi *anomaly score* sebagai dasar penentuan label dengan *threshold* berdasarkan parameter *contamination*. Data

kemudian diklasifikasikan sebagai normal atau anomali, dan dievaluasi melalui analisis jumlah, persentase, serta distribusi *anomaly score*.

3.4. Skematik ESP32 dengan Sensor dan Aktuator

Integrasi sistem dalam penelitian ini dirancang untuk mendukung pemantauan ketinggian air secara otomatis dan berkelanjutan melalui pendekatan *Internet of Things (IoT)*. Sensor ultrasonik digunakan untuk mengukur jarak permukaan air secara kontinu dengan memanfaatkan gelombang ultrasonik yang dipantulkan dari permukaan air. Data hasil pengukuran tersebut kemudian diproses oleh ESP32 yang berperan sebagai pusat kendali sekaligus modul komunikasi dalam sistem. Selanjutnya, data dikirimkan secara periodik ke *platform ThingSpeak* untuk disimpan, diolah, dan divisualisasikan dalam bentuk grafik, sehingga memungkinkan proses pemantauan dilakukan secara jarak jauh melalui jaringan internet. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan indikator LED yang berfungsi sebagai penanda kondisi tertentu berdasarkan tingkat ketinggian air. *Buzzer* digunakan sebagai media peringatan dini untuk memberikan notifikasi suara ketika terjadi perubahan signifikan atau kondisi yang berpotensi berbahaya, sehingga dapat meningkatkan respons pengguna terhadap potensi banjir.



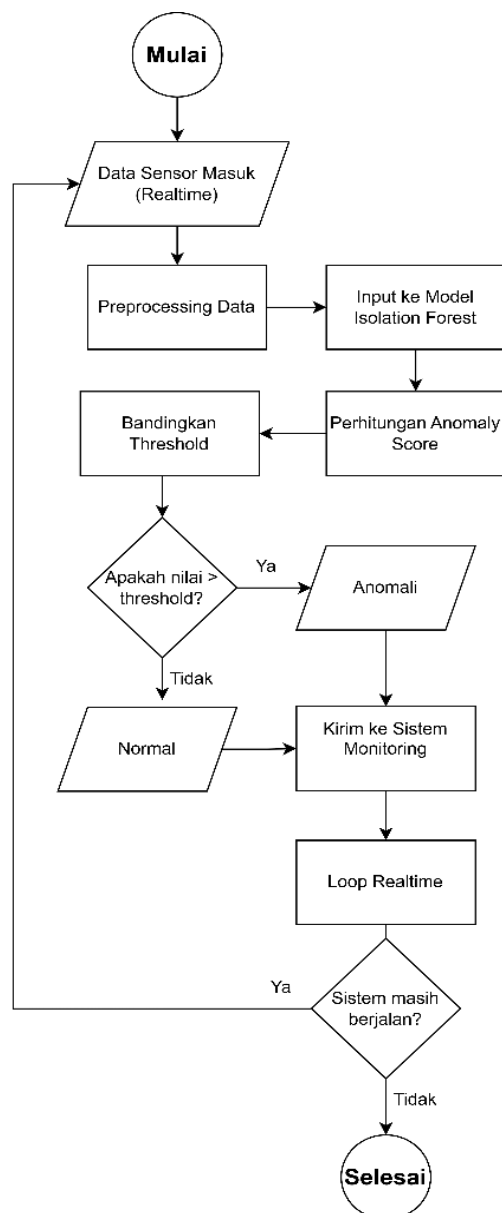
Gambar 4. Skematik ESP32 dengan Sensor dan Aktuator

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4, sistem juga mengintegrasikan sensor LDR untuk mendeteksi kondisi pencahayaan lingkungan secara otomatis. Ketika intensitas cahaya rendah atau kondisi gelap, lampu akan aktif sebagai penerangan tambahan. Informasi ketinggian air ditampilkan melalui LCD I2C agar dapat dibaca secara langsung oleh pengguna di lokasi. Selain itu, keypad 4×4 digunakan sebagai media kontrol manual untuk mengatur fungsi alarm, lampu, serta pengoperasian sistem secara keseluruhan sesuai dengan kebutuhan pengguna di lapangan.

3.5. Deteksi Anomali Real-Time dan Monitoring

Proses deteksi anomali pada penelitian ini dirancang untuk berjalan secara *realtime* dengan memanfaatkan model *Isolation Forest* yang telah dilatih sebelumnya. Alur proses tersebut ditunjukkan

pada gambar berikut.



Gambar 5. Alur Proses Deteksi Anomali

Tahapan dimulai dari akuisisi data sensor, dilanjutkan *preprocessing* dengan normalisasi dan penyesuaian format. Data diproses menggunakan *Isolation Forest* untuk menghasilkan *anomaly score*, kemudian dibandingkan dengan *threshold* untuk klasifikasi, dan divisualisasikan secara *real-time*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahap ini dilakukan evaluasi kinerja model deteksi anomali berbasis *Isolation Forest* pada sistem IoT. Dataset historis berjumlah 6.621 data, dengan pembagian 4.634 data latih dan 1.987 data uji. Hasil pengujian menunjukkan model mendeteksi 22 anomali atau 1,11% dari data uji, dengan rata-rata *anomaly score* sebesar 0,1885. Persentase yang rendah ini menunjukkan model mampu mempelajari pola normal dengan baik.

4.1. Hasil Pengujian Model pada Data Historis

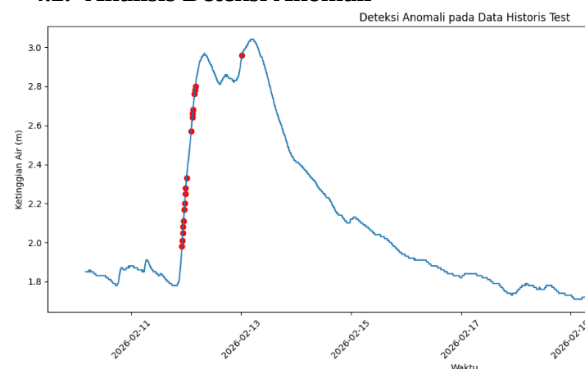
Tabel 2. Ringkasan Hasil Evaluasi pada Data Historis

Parameter	Nilai
Jumlah Data	6621
Data Training	4634
Data Testing	1987
Jumlah Anomali	22
Persentase Anomali	1.11%
Mean Anomaly Score	0.1885

Hasil penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan beberapa studi terkini dalam deteksi anomali berbasis *machine learning*. Penggunaan [23] *Isolation Forest* menghasilkan jumlah anomali yang relatif kecil, sehingga anomali dianggap sebagai kejadian yang jarang dalam dataset.

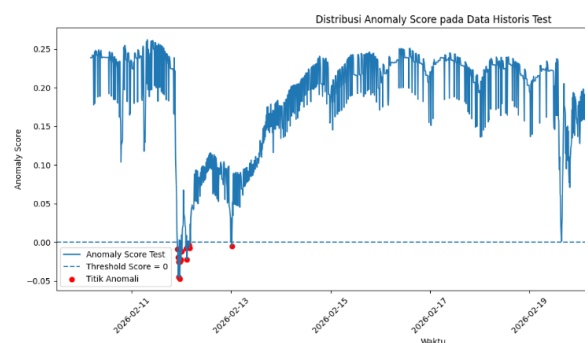
Selain itu, pada sistem IoT [24] menunjukkan bahwa *anomaly score* digunakan untuk mengidentifikasi data menyimpang dengan proporsi yang umumnya minoritas. Studi lain [25] juga melaporkan sekitar 5% data diklasifikasikan sebagai anomali. Berdasarkan perbandingan tersebut, persentase 1,11% dalam penelitian ini masih berada dalam rentang yang wajar.

4.2. Analisis Deteksi Anomali



Gambar 6. Deteksi Anomali pada Data Historis Test

Hal ini menunjukkan model sensitif terhadap fluktuasi ekstrem. Pada Gambar 2, distribusi *anomaly score* menunjukkan nilai di bawah *threshold* diklasifikasikan sebagai anomali.



Gambar 7. Distribusi *Anomaly Score* pada Data Historis Test

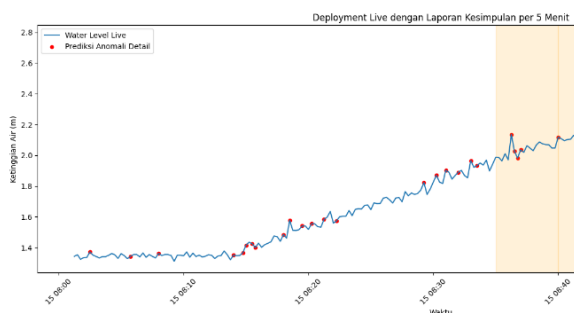
4.3. Pengujian Sistem Secara Real-Time

Pengujian juga dilakukan pada skenario *real-time* menggunakan data simulasi selama 60 menit. Ringkasan hasil pengujian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan Hasil Pengujian

Parameter	Nilai
Jumlah Data Live	235
Jumlah Anomali	50
Jumlah Laporan (5 menit)	12
Kesimpulan Normal	4
Kesimpulan Anomali	8
Status Waspada	3
Status Bahaya	2

Dari 235 data, sistem mendeteksi 50 anomali. Agregasi per 5 menit menghasilkan 8 kondisi anomali dan 4 normal, menunjukkan kemampuan interpretasi periodik serta deteksi peningkatan ketinggian air.



Gambar 8. Deployment Live dan Laporan Kesimpulan per 5 Menit

Akumulasi anomali memicu perubahan status dari aman hingga bahaya, menunjukkan sistem tidak hanya mendeteksi anomali individu, tetapi juga memahami kondisi secara keseluruhan.

4.4. Implementasi Prototype IoT

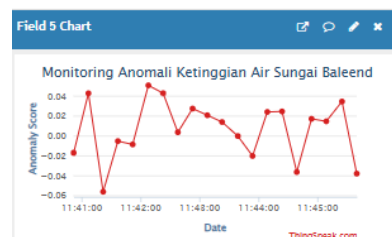
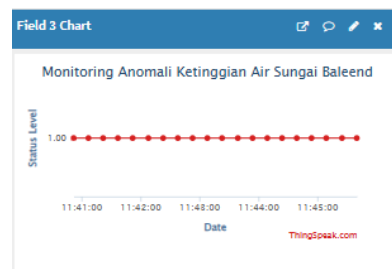
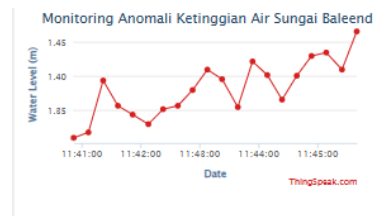
Implementasi sistem pada perangkat IoT ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



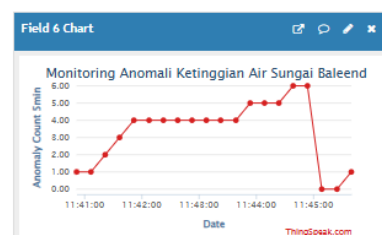
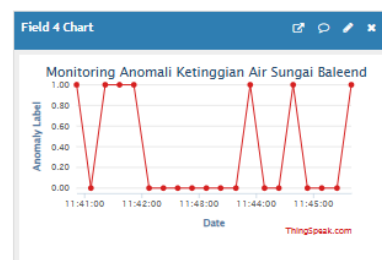
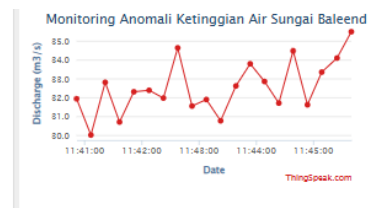
Gambar 9. Implementasi Sistem pada Perangkat IoT

Prototype mengintegrasikan sensor ultrasonik, ESP32, LED, buzzer, sensor LDR, dan LCD I2C

dalam satu sistem. Sistem mampu melakukan akuisisi data secara langsung serta memberikan notifikasi visual dan audio, dengan hasil *monitoring* ditampilkan pada platform *ThingSpeak* seperti pada gambar dibawah ini:



Gambar 10. Grafik Monitoring Water Level, Status Level, dan Anomali



Gambar 11. Grafik Monitoring Discharge, Anomaly Label, Anomaly Count 5 Min

Berdasarkan gambar 10 menunjukkan grafik *water level* yang mengalami kenaikan bertahap dari sekitar 1,34 m hingga mencapai 1,45 m pada akhir periode pengamatan. Fluktuasi nilai tersebut menunjukkan perubahan kondisi permukaan air yang dinamis selama proses monitoring berlangsung. Grafik *status level* berada pada nilai 1 secara konsisten yang menandakan sistem memberikan status kondisi yang stabil selama interval pengamatan. Selain itu, grafik *anomaly score* berfluktuasi pada rentang sekitar -0,06 hingga 0,05. Nilai *anomaly score* yang berada di bawah *threshold* menunjukkan adanya indikasi data anomali yang berhasil dideteksi oleh model Isolation Forest.

Sementara itu, gambar 11 menampilkan perubahan nilai *discharge* pada rentang sekitar 80–85 m³/s dengan pola yang cenderung meningkat pada akhir pengamatan. Grafik *anomaly label* menunjukkan beberapa nilai 1 yang menandakan terjadinya anomali pada data monitoring. Grafik *anomaly count 5 min* memperlihatkan akumulasi anomali dalam interval lima menit yang meningkat hingga lima kejadian sebelum kembali menurun. Hasil tersebut menunjukkan sistem mampu melakukan monitoring dan deteksi anomali secara real-time secara responsif.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode Isolation Forest mampu diterapkan untuk mendeteksi anomali pada data ketinggian air dengan kinerja yang memadai. Model dibangun menggunakan dataset historis sebanyak 6.621 data dengan pembagian 4.634 data latih dan 1.987 data uji. Hasil pengujian menunjukkan model mampu mendeteksi 22 data anomali dengan persentase anomali sebesar 1,11% dan nilai rata-rata *anomaly score* sebesar 0,1885. Pada skenario pengujian real-time selama 60 menit, sistem berhasil memproses 235 data sensor dan mendeteksi 50 anomali, serta menghasilkan 8 kondisi anomali dan 4 kondisi normal berdasarkan agregasi data setiap lima menit.

Sistem berbasis Internet of Things (IoT) yang dikembangkan mampu melakukan monitoring secara real-time melalui integrasi sensor ultrasonik, ESP32, dan platform ThingSpeak. Sistem juga mampu memberikan klasifikasi kondisi aman, waspada, dan bahaya secara otomatis serta didukung indikator visual dan audio sebagai media peringatan dini. Integrasi tersebut menunjukkan bahwa kombinasi teknologi IoT dan metode Isolation Forest mampu menghasilkan sistem monitoring yang responsif, adaptif, dan berpotensi dikembangkan sebagai *early warning system* dalam mitigasi risiko banjir.

Pengembangan selanjutnya disarankan menggunakan dataset yang lebih beragam, pengujian lingkungan nyata berdurasi lebih panjang, serta integrasi fitur notifikasi berbasis aplikasi untuk meningkatkan akurasi dan respons sistem secara

keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Matthew Bartos, Brandon Wong, and Branko Kerkez, "Open storm: a complete framework for sensing and control of urban watersheds," *Royal Society of Chemistry: Environmental Science Water Research & Technology*, Dec. 2017.
- [2] Andi Adriansyah, Muhammad Hanif Budiutomo, Heri Hermawan, Reni Ika Andriani, Rama Sulistyawan, and Abu Ubaidah Shamsudin, "Design of water level detection monitoring system using fusion sensor based on Internet of Things (IoT)," *Jurnal Ilmiah SENERGI*, vol. 28, no. 1, pp. 191–198, Feb. 2024.
- [3] Jirapon Sunkpho and Chaiwat Ootamakorn, "Real-time flood monitoring and warning system," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 33, no. 2, pp. 227–235, Jan. 2011.
- [4] Md. Manirul Islam, Md. Sadad Mahamud, Umme Salsabil, A A M Mazharul Amin, and Samiul Haque Suman, "An IoT Based Water-Logging Detection System: A Case Study of Dhaka," *Global Conference on Technology and Information Management*, Feb. 2024.
- [5] Tanmay Jadhav, Abhishek Kale, Sanket Kakde, Sanket Garud, and Nayana Thombare, "IoT-based Water Level Monitoring and Flood Alert System," *Int. J. Sci. Res. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 5, Sep. 2025.
- [6] Archolito V. Pahuriray and Patrick D. Cerna, "IoT-Enabled Flood Monitoring and Early Warning Systems: A Systematic Review," *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, vol. 14, no. 4, pp. 50–67, Apr. 2025.
- [7] Carlos Moreno *et al.*, "RiverCore: IoT Device for River Water Level Monitoring over Cellular Communications," *MDPI: Sensors*, vol. 19, no. 1, Jan. 2019.
- [8] Herma Robbil Uswelly, Ali Basrah Pulungan, Sukardi Sukardi, and Oriza Candra, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Ketinggian Air Berbasis Internet of Things (IoT)," *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 4, no. 1, Jun. 2023.
- [9] Charu C. Aggarwal, *Outlier Analysis*, Second Edition. Yorktown Heights: Springer Cham, 2016.
- [10] Fei Tony Liu, Kai Ming Ting, and Zhi-Hua Zhou, "Isolation Forest," *2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining*, Feb. 2009.
- [11] Fei Tony Liu, Kai Ming Ting, and Zhi-Hua Zhou, "Isolation-Based Anomaly Detection," *ACM Journals: ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, vol. 6, no. 1, pp. 1–39, Mar. 2012.

- [12] Arnawan Hasibuan *et al.*, “Design of flood warning prototype using ESP32 module-based ultrasonic sensors,” *International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems (IJRES)*, vol. 14, no. 1, pp. 126–135, Mar. 2025.
- [13] K. Praveen and R. Vadivel, “IoT-based flood monitoring and early warning system for proactive security measures,” *WJARR: World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 21, no. 3, pp. 1798–1806, Mar. 2024.
- [14] Tamsir Riski Rahman, Andrizal, Herizon, and Wahyu Eka Febri Anggara, “Design and Construction of an Internet of Things (IoT)-Based Water Level Monitoring System Using ESP32 for Early Flood Prevention,” *Innovative Journal of Intelligent Control And Optimization For Electrical System*, vol. 2, no. 2, Dec. 2025.
- [15] Sushma M P, Namith R, Nirmitha P, Prajwal K T, and Prathiksha M Y, “IoT Based Flood Monitoring And Alerting System,” *IARJSET: International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, vol. 12, no. 5, May 2025.
- [16] Muhammad Darwis, Hafiizh Asrofil Al Banna, Setiawan Restu Aji, Dinda Khoirunnisa, and Nakia Natassa, “IoT Based Early Flood Detection System with Arduino and Ultrasonic Sensors in Flood-Prone Areas,” *Jurnal Teknik Informatika*, vol. 16, no. 2, Dec. 2023.
- [17] I Gede Iwan Sudipa, I Dewa Gede Agung Pandawana, and I Made Subrata Sandhiyasa, “Artificial Intelligence-Assisted IoT Model for Water Level Monitoring and Prediction Systems: A Review and Analysis,” *BIOS: Jurnal Informatika dan Sains*, vol. 2, no. 2, Dec. 2024.
- [18] Venkatraman Umbalacheri Ramasamy, “Overview of Anomaly Detection Techniques across Different Domains: A Systematic Review,” *IJCESEN: International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, vol. 10, no. 4, Nov. 2024.
- [19] Mohd Izhan Mohd Yusoff, “Machine Learning: An Overview,” *Open Journal of Modelling and Simulation*, vol. 12, pp. 89–99, Jul. 2024.
- [20] Haolong Xiang *et al.*, “OptiForest: Optimal Isolation Forest for Anomaly Detection,” *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 2379–2387, 2023.
- [21] Yousef Abuadlla and Ismail Said, “Survey on the Internet of Things Definitions and Applications,” *Bani Waleed University Journal of Humanities and Applied Sciences*, vol. 8, no. 5, pp. 429–440, Dec. 2023.
- [22] Espressif, “ESP32 Series Datasheet Version 5.2,” Shanghai: Espressif Systems, 2025.
- [23] Nur Alamsyah Nur, “Anomaly Detection in Walking Data Using Isolation Forest: An Unsupervised Learning Approach,” *Journal of Information System and Artificial Intelligence*, vol. 6, no. 1, Nov. 2025.
- [24] Hongbin Zhang and Haibin Zhang, “Anomaly Detection and Objective Security Evaluation Using Autoencoder, Isolation Forest, and Multi-Criteria Decision Methods,” *MDPI: Sensors*, vol. 25, no. 19, Oct. 2025.
- [25] Jesus Omaña Iglesias, Carlos Segura Perales, Stefan Geißler, Diego Perino, and Andra Lutu, “Anomaly Detection for IoT Global Connectivity,” *Networking and Internet Architecture*, Aug. 2025.