



Implementasi Isolation Forest dalam Pemantauan Suhu dan pH Air untuk Optimalisasi Pertumbuhan Ikan pada Kolam Budi Daya Berbasis Web

Implementation of Isolation Forest in Water Temperature and pH Monitoring to Optimize Fish Growth in a Web-Based Aquaculture Pond

Amir Rozy Sinaga*, Ria Ester

Fakultas Ilmu Komputer, Program Studi Teknik Informatika, Universitas Pamulang, Tangerang Selatan, Indonesia

Email: ^{1,*}amirrozy02@gmail.com, ²dosen02665@unpam.ac.id

Email Penulis Korespondensi: amirrozy02@gmail.com

Received: 17/07/2026, Revised: 16/10/2026, Accepted: 18/10/2026, Published: 23/10/2026

Abstrak—Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan algoritma Isolation Forest dalam sistem pemantauan suhu dan pH air guna meningkatkan efektivitas pengawasan kualitas air dan mendukung optimalisasi pertumbuhan ikan pada kolam budidaya di Cisauk, yang mengelola 18 keramba dengan total populasi sekitar 40.000 ekor ikan dari berbagai jenis, yaitu nila, patin, gurame, dan lele. Salah satu permasalahan utama yang dihadapi adalah terjadinya fluktuasi suhu dan pH air yang dipengaruhi oleh perubahan kondisi lingkungan, terutama akibat variabel cuaca seperti hujan deras yang dapat menurunkan pH secara drastis, intensitas panas matahari yang meningkatkan suhu air secara signifikan, serta peralihan musim yang mengubah stabilitas parameter kualitas air. Perubahan tersebut sering bersifat mendadak sehingga berpotensi menimbulkan stres fisiologis, penurunan metabolisme, gangguan pertumbuhan, bahkan meningkatkan tingkat mortalitas ikan. Sistem pemantauan yang digunakan sebelumnya masih belum terkomputerisasi, sehingga proses pencatatan data bergantung pada pengukuran manual yang tidak dapat memberikan informasi secara real-time maupun mendeteksi kondisi kritis dengan cepat dan akurat. Pada penelitian ini, data suhu dan pH diperoleh melalui sensor digital yang terintegrasi dengan sistem pemantauan berbasis Web sebagai media visualisasi dan pengelolaan data. Algoritma Isolation Forest diterapkan untuk mendeteksi anomali pada parameter kualitas air secara otomatis dengan memanfaatkan pola penyimpanan data yang dihasilkan akibat perubahan cuaca maupun faktor lingkungan lainnya. Pengembangan sistem dilakukan dengan model Prototyping agar rancangan sistem dapat disesuaikan secara iteratif berdasarkan kebutuhan pengguna lapangan. Hasil implementasi menunjukkan bahwa algoritma Isolation Forest berhasil diterapkan pada sistem. Dataset yang digunakan memiliki rentang suhu 26,10°C–33,20°C dan pH 6,69–9,62. Hasil pengujian terhadap 450 data historis menunjukkan bahwa model berhasil mengidentifikasi 427 data normal dan 23 data anomali dengan tingkat akurasi sebesar 94,89%, di mana data anomali umumnya ditandai oleh suhu dan pH yang lebih tinggi dibandingkan data normal, dengan rata-rata suhu anomali sebesar 31,26°C dan rata-rata pH anomali sebesar 8,79 akibat pengaruh cuaca panas. Integrasi algoritma ini dengan Dashboard berbasis Web juga terbukti efektif dalam memberikan peringatan dini kepada petugas, sehingga tindakan korektif dapat dilakukan secara tepat waktu. Secara keseluruhan, sistem ini terbukti mampu mendeteksi anomali kualitas air secara akurat dan cepat, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi operasional, menjaga stabilitas kualitas air, dan mendukung keberlanjutan budidaya ikan di Cisauk.

Kata Kunci: Isolation Forest; Kualitas Air; Deteksi Anomali; Perubahan Cuaca; Sistem Peringatan Dini; Budi Daya Ikan

Abstract—This study aims to implement the Isolation Forest algorithm in a water temperature and pH monitoring system to enhance the effectiveness of water quality supervision and support the optimization of fish growth in aquaculture ponds at Cisauk, which manages 18 fish cages with a total population of approximately 40,000 fish of various species, namely tilapia, Pangasius (patin), gourami, and catfish (lele). One of the primary challenges faced in this environment is the fluctuation of water temperature and pH caused by environmental changes, particularly weather variables such as heavy rainfall that can drastically lower pH, high solar intensity that significantly raises water temperature, and seasonal transitions that disrupt the stability of water quality parameters. These changes often occur suddenly, potentially inducing physiological stress, reduced metabolism, impaired growth, and even increased fish mortality. The monitoring system previously used was not yet computerized, so data recording relied on manual measurement, which could not provide real-time information or detect critical conditions quickly and accurately. In this study, temperature and pH data were obtained through digital sensors integrated with a Web-based monitoring system serving as a medium for data visualization and management. The Isolation Forest algorithm was applied to automatically detect anomalies in water quality parameters by leveraging deviation patterns in the data caused by weather changes and other environmental factors. The system was developed using the Prototyping model so that the system design could be adjusted iteratively based on field user needs. The implementation results show that the Isolation Forest algorithm was successfully applied to the system. The dataset used had a temperature range of 26.10°C–33.20°C and a pH range of 6.69–9.62. Testing on 450 historical data points showed that the model successfully identified 427 normal data points and 23 anomalous data points, with an accuracy rate of 94.89%, where anomalous data were generally marked by higher temperature and pH than normal data, with an average anomalous temperature of 31.26°C and an average anomalous pH of 8.79 due to the influence of hot weather. The integration of this algorithm with the Web-based Dashboard also proved effective in providing early warnings to staff, enabling corrective actions to be taken in a timely manner. Overall, this system has proven capable of detecting water quality anomalies accurately and quickly, thereby having the potential to improve operational efficiency, maintain water quality stability, and support the sustainability of fish farming at Cisauk.

Keywords: Isolation Forest; Water Quality; Anomaly Detection; Weather Variation; Early Warning System; Fish Farming

1. PENDAHULUAN

Sektor budidaya ikan air tawar merupakan penopang penting dalam pemenuhan kebutuhan pangan nasional. Keberhasilan budidaya ini sangat bergantung pada pengelolaan kualitas air yang optimal, di mana parameter suhu dan derajat keasaman (pH) memegang peranan krusial terhadap proses metabolisme dan kelangsungan hidup ikan. Fluktuasi suhu dan pH yang





ekstrem, yang sering kali tidak terprediksi dan berlangsung cepat akibat perubahan cuaca, dapat memicu stres fisiologis, penurunan nafsu makan, hingga kematian massal ikan [1]. Oleh karena itu, kemampuan untuk memantau dan mendeteksi penyimpangan (anomali) pada parameter kualitas air menjadi kunci mitigasi risiko dalam kegiatan budidaya ikan.

PT. IVES, yang berlokasi di Cisauk, merupakan perusahaan yang bergerak di bidang budidaya ikan air tawar dengan pengelolaan 18 keramba untuk membudidayakan nila, patin, gurame, dan lele, dengan total populasi mencapai kurang lebih 40.000 ekor ikan. Skala budidaya yang cukup besar ini menuntut pengelolaan kualitas air yang konsisten dan terkontrol. Namun demikian, metode yang saat ini digunakan oleh PT. IVES dalam memantau kualitas air masih bersifat manual, yaitu menggunakan alat penguji kualitas air digital yang dicelupkan ke dalam air. Metode ini hanya menghasilkan data sesaat (diskret) dan memiliki keterbatasan dalam mendeteksi perubahan kondisi air yang terjadi di luar waktu pengukuran, seperti pada malam hari atau saat tidak ada pengawasan. Permasalahan tersebut diperparah dengan keterbatasan sumber daya manusia, karena hanya empat karyawan yang bertanggung jawab terhadap seluruh operasional kolam maupun perawatan greenhouse, sehingga pengawasan kualitas air sering kali bukan menjadi prioritas utama. Ketidadaan sistem pencatatan data yang terkomputerisasi juga menyebabkan tidak tersedianya data historis yang dapat dianalisis untuk mengetahui pola perubahan kualitas air dari waktu ke waktu.

Sebagai metode pembandingan, pendekatan terawasi (supervised learning) telah digunakan pada budi daya ikan, misalnya XGBoost untuk memprediksi kualitas air budi daya lele [2], Decision Tree untuk mengklasifikasikan kondisi kualitas air budi daya bibit nila [3], serta Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost, Support Vector Machine, Logistic Regression, dan Neural Network pada budi daya nila [4]. Pendekatan terawasi memerlukan data berlabel, sedangkan Isolation Forest tidak memerlukan data berlabel dan, dalam perbandingannya dengan Local Outlier Factor (LOF), menghasilkan akurasi deteksi anomali yang lebih tinggi [5].

Berbagai penelitian terdahulu telah membahas topik deteksi anomali dan pemantauan kualitas air pada sektor akuakultur. Tabassum dkk. membandingkan model berbasis Isolation Forest dan Local Outlier Factor (LOF) untuk mendeteksi anomali pada data rekam medis elektronik yang tidak berlabel, dan melaporkan bahwa varian berbasis Isolation Forest menghasilkan akurasi tertinggi sebesar 99,21% [5]. Huang dkk. mengembangkan kombinasi Isolation Forest dengan algoritma K-Means untuk deteksi intrusi pada big data jaringan industri secara real-time, namun penerapannya masih berfokus pada ranah keamanan siber, bukan kualitas air kolam budidaya [6]. Isolation Forest juga telah diterapkan pada data kualitas udara Torino untuk mendeteksi 468 anomali (5%) dari 9.357 data [7], pada identifikasi curah hujan berpotensi banjir yang dikombinasikan dengan LSTM [8], serta pada log keamanan jaringan dan server [8], [9], tetapi belum diterapkan pada bidang budidaya perikanan. Singh dkk. mengusulkan sistem akuakultur cerdas berbasis Internet of Things (IoT) yang memanfaatkan Random Forest, Gradient Boosting Machine, dan M5 Model Tree untuk memprediksi parameter kualitas air, tetapi memerlukan infrastruktur sensor dan jaringan yang kompleks [10]. Ahmed dkk. mengembangkan sistem IoT dan machine learning untuk budidaya udang di Bangladesh dengan berbagai sensor serta beberapa algoritma klasifikasi, namun tetap bergantung pada infrastruktur IoT otomatis dan berbagai sensor tambahan [11]. Marselina dkk. merancang dashboard IoT untuk pemantauan budidaya lobster air tawar yang mampu menampilkan data secara real-time, tetapi belum menerapkan metode deteksi anomali berbasis machine learning [12]. Rasyid dkk. mengintegrasikan IoT dan chatbot berbasis Natural Language Processing untuk membantu pembudidaya memperoleh informasi kolam, namun tanpa mekanisme deteksi anomali otomatis [13]. Alaka mengkaji integrasi machine learning dan IoT untuk pemantauan kualitas air cerdas dan menyimpulkan bahwa Isolation Forest merupakan salah satu metode yang efektif digunakan pada kondisi data tanpa label (unlabeled data) [14]. Baena-Navarro dkk. menerapkan Random Forest sebagai modul deteksi anomali pada sistem IoT kolam ikan di Montería, Kolombia, tetapi masih bergantung pada infrastruktur sensor IoT yang kompleks [15], sedangkan Alnemari dkk. mengembangkan sistem pendukung keputusan pada budidaya nila menggunakan dataset sintesis yang belum divalidasi pada kolam budidaya nyata [5].

Berdasarkan kajian terhadap penelitian-penelitian tersebut, dapat diidentifikasi beberapa celah penelitian (research gap). Pertama, dari sisi mekanisme input data, sebagian besar penelitian mengandalkan sensor IoT otomatis penuh, sedangkan penelitian yang secara khusus menjembatani input data manual hasil pembacaan alat digital portable dengan algoritma Isolation Forest untuk kolam ikan air tawar belum banyak ditemukan. Kedua, dari sisi efisiensi algoritma, penelitian deteksi anomali sebelumnya banyak menggunakan Deep Learning yang memerlukan komputasi tinggi dan data berlabel, sedangkan Isolation Forest sebagai teknik unsupervised learning lebih ringan dan sesuai untuk data tanpa label yang dikumpulkan secara manual. Ketiga, dari sisi fokus operasional, belum ditemukan penelitian yang secara khusus merancang sistem web minimalis yang berfokus pada dua parameter paling kritis, yaitu suhu dan pH, untuk membantu pembudidaya dengan keterbatasan sumber daya manusia seperti pada PT. IVES agar tetap memperoleh peringatan dini secara otomatis. Celah-celah inilah yang menjadi kebaruan (novelty) sekaligus justifikasi utama dilaksanakannya penelitian ini.

Untuk menjawab tantangan tersebut, penelitian ini mengusulkan penerapan algoritma Isolation Forest sebagai metode deteksi anomali pada data suhu dan pH air kolam budidaya PT. IVES. Isolation Forest dipilih karena merupakan teknik unsupervised machine learning yang dirancang khusus untuk mengidentifikasi data yang menyimpang (outlier) secara efisien tanpa memerlukan data berlabel, serta mampu bekerja dengan baik pada dataset berukuran terbatas hasil pengukuran manual [16]. Machine learning sendiri semakin luas digunakan pada berbagai sistem modern untuk analisis data dan deteksi pola secara otomatis [17]. Proses pengambilan keputusan dalam sistem dimulai dari data hasil pengukuran suhu dan pH yang diperoleh melalui pembacaan manual berkala, yang selanjutnya digunakan sebagai dataset untuk melatih model dalam mengenali pola kondisi normal dan mendeteksi penyimpangan. Sistem yang dikembangkan



berbasis web sehingga dapat diakses secara fleksibel oleh pengguna kapan saja dan di mana saja, serta mampu menampilkan notifikasi peringatan dini pada antarmuka web ketika terdeteksi kondisi kualitas air yang menyimpang dari kondisi normal.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan Sistem Informasi Pemantauan Suhu dan pH Air Berbasis Web dengan penerapan algoritma Isolation Forest sebagai mekanisme deteksi anomali dan peringatan dini pada kolam budidaya ikan PT. IVES. Rumusan masalah penelitian ini adalah: (1) bagaimana membangun sistem peringatan dini (early warning system) berbasis web untuk meminimalisasi risiko ketidakstabilan suhu dan pH air kolam budidaya yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan di PT. IVES; (2) bagaimana meningkatkan efektivitas pemantauan kualitas air agar data hasil pengukuran manual dapat segera dianalisis komputasinya untuk mendeteksi status kelayakan air secara cepat dan akurat; (3) bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem berbasis web untuk mengumpulkan dan memvisualisasikan data suhu dan pH air pada kolam budidaya ikan secara terpusat serta dapat diakses kapan saja; dan (4) bagaimana menerapkan algoritma Isolation Forest untuk menganalisis data suhu dan pH air pada kolam budidaya ikan dalam mendeteksi penyimpangan (anomali) secara otomatis berdasarkan perhitungan algoritma, tanpa memerlukan penilaian manual dari petugas.

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan solusi konkrit atas keterbatasan pemantauan kualitas air yang selama ini dilakukan secara konvensional, sekaligus meningkatkan efektivitas pengelolaan pada budidaya ikan air tawar. Secara ilmiah, penelitian ini memberikan sumbangsih akademis terkait penerapan teknologi machine learning berbasis unsupervised learning pada sektor perikanan skala kecil hingga menengah. Bagi PT. IVES, kontribusi nyata dari penelitian ini ditunjukkan melalui peningkatan efisiensi operasional dan efektivitas pengawasan harian. Kehadiran sistem berbasis web yang dilengkapi fitur peringatan dini (early warning system) untuk anomali suhu dan pH memungkinkan mitigasi cepat, sehingga risiko kerugian akibat penurunan kualitas air dapat diminimalkan. Sementara itu, secara teoritis, penelitian ini memperkaya khazanah literatur sebagai referensi empiris mengenai implementasi algoritma Isolation Forest serta penerapan metode Prototyping dalam pengembangan sistem pemantauan kualitas air budidaya.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan Model Pengembangan Prototyping. Model Prototyping dipilih karena memungkinkan pengembangan sistem dilakukan secara iteratif, di mana pengguna, yaitu petugas dan admin PT. IVES, terlibat langsung dalam evaluasi dan penyempurnaan sistem sehingga hasil akhir benar-benar adaptif terhadap kebutuhan operasional nyata di lapangan. Tahapan penelitian secara ringkas disajikan pada Gambar 1 dan dijelaskan pada subbab 2.2 sampai 2.5, sedangkan objek penelitian diuraikan pada subbab 2.1.

2.1 Objek Penelitian

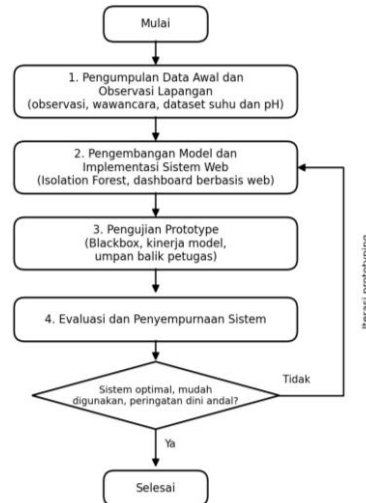
Objek penelitian ini berlokasi di fasilitas budidaya ikan air tawar milik PT. IVES yang terletak di kawasan Cisauk. Fasilitas ini mengelola sebanyak 18 unit keramba aktif untuk membudidayakan empat varietas ikan komersial, yaitu nila, patin, gurame, dan lele, dengan perkiraan total populasi mencapai 40.000 ekor. Pengambilan data parameter lingkungan berupa suhu dan tingkat keasaman (pH) difokuskan pada kolam yang berada di Area Timur PT. IVES. Selanjutnya, sistem yang dikembangkan dirancang untuk mengakomodasi dua tingkatan pengguna (user) dengan hak akses dan peran berbeda, yakni Admin dan Petugas.

2.2 Pengumpulan Data Awal dan Observasi Lapangan

Tahap ini diawali dengan pelaksanaan observasi langsung dan wawancara mendalam dengan pihak pengelola di PT. IVES. Kegiatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi tantangan dalam proses pengawasan kondisi air, serta memahami karakteristik dan pola perubahan parameter suhu dan pH secara kontekstual. Selanjutnya, dilakukan proses pembentukan dataset lingkungan. Pengumpulan data primer ini diperoleh melalui prosedur pembacaan manual secara berkala menggunakan alat penguji kualitas air digital yang dicelupkan langsung ke dalam kolam budidaya. Dari proses tersebut, berhasil dihimpun sebanyak 450 data pengukuran dalam rentang waktu Desember 2025 hingga Maret 2026. Dataset ini kemudian dimanfaatkan sebagai data latih (training data) dan data uji (testing data) pada pemodelan deteksi anomali.

2.3 Pengembangan Model dan Implementasi Sistem Web

Model deteksi anomali dibangun dengan menerapkan algoritma Isolation Forest menggunakan pustaka scikit-learn dengan konfigurasi parameter $n_estimators = 100$, $contamination = 0,05$, $random_state = 42$, $max_samples = 'auto'$, dan $bootstrap = False$. Model dilatih menggunakan dataset suhu dan pH yang telah diolah untuk mengenali pola kondisi normal serta mengidentifikasi penyimpangan. Setelah model memiliki performa yang memadai, model tersebut diintegrasikan ke dalam dashboard berbasis web yang dikembangkan menggunakan arsitektur client-server, dengan basis data MySQL [18] sebagai media penyimpanan data historis, serta antarmuka yang dibangun menggunakan kombinasi HTML, CSS, dan JavaScript. Perancangan sistem menggunakan notasi Unified Modeling Language (UML) [19], meliputi Use Case Diagram, Activity Diagram, Sequence Diagram, dan Class Diagram, serta perancangan basis data menggunakan Entity Relationship Diagram (ERD) yang selanjutnya ditransformasikan ke Logical Record Structure (LRS).



Gambar 1. Flowchart Tahapan Penelitian

Analisis sistem berjalan menunjukkan bahwa pemantauan kualitas air di PT. IVES masih dilakukan secara manual: petugas mengukur suhu dan pH menggunakan alat penguji digital yang dicelupkan ke kolam, kemudian mencatat hasilnya pada kertas atau buku laporan harian tanpa sistem penyimpanan terkomputerisasi, sehingga pengambilan keputusan sepenuhnya bergantung pada pengalaman dan penilaian subjektif petugas. Sistem usulan memiliki fitur utama: (1) dashboard monitoring yang dapat diakses secara real-time; (2) form input suhu dan pH dengan prediksi status otomatis menggunakan model Isolation Forest; (3) sistem peringatan dini yang menampilkan notifikasi BAHAYA pada antarmuka web; (4) penyimpanan data historis pada basis data MySQL; (5) visualisasi grafik tren tujuh hari terakhir; serta (6) manajemen pengguna dengan dua tingkat akses, yaitu Admin dan Petugas. Struktur basis data terdiri atas empat entitas utama, yaitu Users, monitoring_data, activity_log, dan system_settings, dengan relasi one-to-many antara entitas Users dengan monitoring_data dan activity_log melalui foreign key user_id, yang telah dinormalisasi hingga bentuk normal ketiga (3NF).

Use Case Diagram digunakan untuk menggambarkan interaksi antara aktor (pengguna) dengan sistem yang dikembangkan. Terdapat dua aktor dalam sistem ini, yaitu Admin dan Petugas, sebagaimana disajikan pada Gambar 2. Admin memiliki akses penuh terhadap seluruh fitur manajemen sistem, meliputi pengelolaan pengguna, pemantauan seluruh data monitoring, input data suhu dan pH, dan melihat log aktivitas. Petugas memiliki akses untuk menambahkan data, melakukan pengecekan status prediksi, menyimpan data, dan melihat riwayat data pribadi.

2.4 Pengujian Prototype

Pengujian sistem dilakukan melalui tiga pendekatan, yaitu pengujian Black Box menggunakan metode Equivalence Partitioning dan Boundary Value Analysis untuk memastikan fungsionalitas dashboard dan alur data berjalan sesuai spesifikasi, pengujian White Box untuk menelusuri jalur logika kritikal pada proses autentikasi, kontrol akses, dan pemanggilan model Isolation Forest, sekaligus memastikan keamanan query bebas dari celah SQL Injection, serta kuesioner kepada 5 responden (4 karyawan dan 1 supervisor PT. IVES) dengan tujuh pertanyaan berskala 1 (sangat tidak setuju) sampai 5 (sangat setuju). Selain itu, dilakukan pengujian kinerja model dalam mendeteksi anomali suhu dan pH secara tepat berdasarkan data historis yang tersedia. Petugas PT. IVES turut memberikan umpan balik langsung mengenai kemudahan akses dan keefektifan notifikasi yang dihasilkan sistem.



Gambar 2. Use Case Diagram



2.5 Evaluasi dan Penyempurnaan Sistem

Masukan yang dikumpulkan dari tahap pengujian digunakan sebagai dasar penyempurnaan prototype secara iteratif hingga sistem dinyatakan optimal, mudah digunakan, dan mampu memberikan peringatan dini yang andal. Tujuan akhir tahapan ini adalah menghasilkan sistem fungsional dan praktis yang dapat membantu karyawan PT. IVES mengambil keputusan secara cepat meskipun perhatian mereka juga terbagi pada aktivitas greenhouse.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Algoritma Isolation Forest

Algoritma Isolation Forest yang pertama kali diperkenalkan oleh Liu, Ting, dan Zhou [16] diterapkan untuk mendeteksi anomali kualitas air pada kolam budidaya PT. IVES. Prinsip kerja algoritma ini didasarkan pada asumsi bahwa data anomali lebih mudah dipisahkan (diisolasi) dari data lain dibandingkan data normal, sehingga jumlah pemisahan (path length) yang dibutuhkan untuk mengisolasi data anomali menjadi lebih sedikit. Model dilatih menggunakan pustaka scikit-learn dengan konfigurasi parameter sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi Parameter Model Isolation Forest

Parameter	Nilai	Keterangan
n_estimators	100	Jumlah pohon isolasi yang dibangun
contamination	0,05	Proporsi estimasi anomali (5%) berdasarkan catatan lapangan petugas
random_state	42	Nilai seed agar hasil pelatihan dapat direproduksi
max_samples	'auto'	Jumlah sampel per pohon: min(256, jumlah data latih)
max_features	1.0	100% fitur (suhu dan pH) digunakan setiap pohon
bootstrap	False	Sampling tanpa penggantian

Anomaly score $s(x,n)$ dihitung menggunakan persamaan (1):

$$s(x,n) = 2^{(-h(x)/c(n))} \quad (1)$$

dengan $h(x)$ merupakan rata-rata path length data x pada seluruh pohon isolasi, dan $c(n)$ merupakan faktor normalisasi yang dihitung melalui persamaan (2):

$$c(n) = 2H(n-1) - 2(n-1)/n \quad (2)$$

dengan $H(i) \approx \ln(i) + \gamma$, dan γ merupakan konstanta Euler-Mascheroni ($\approx 0,5772156649$). Status akhir ditentukan melalui $\text{decision_function}(x) = -s(x,n) - \text{offset_}$, dengan offset_ dikalibrasi otomatis oleh model berdasarkan parameter contamination. Sebagai contoh penerapan pada data uji suhu $26,10^\circ\text{C}$ dan pH 6,97 diperoleh $h(x) = 8,581677$ dan $c(256) = 10,244771$, sehingga $s(x,n) = 2^{(-0,837647)} = 0,559549$, dan $\text{decision_function} = -0,559549 - (-0,528998) = -0,030551$, yang bernilai negatif sehingga data tersebut dinyatakan berstatus BAHAYA meskipun berada tepat di tepi ambang batas.

3.2 Hasil Pelatihan dan Evaluasi Model

Setelah proses pelatihan, model menghitung anomaly score pada seluruh 450 record data historis suhu dan pH periode Desember 2025 hingga Maret 2026. Data dengan skor di bawah threshold 0 (nol) diklasifikasikan sebagai anomali, sedangkan data dengan skor lebih besar atau sama dengan 0 diklasifikasikan normal. Ringkasan hasil pelatihan dan evaluasi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pelatihan dan Evaluasi Model Isolation Forest

Metrik	Nilai	Keterangan
Total Data Dilatih	450 record	Data Des 2025 - Mar 2026
Data Normal (label 1)	427 (94,89%)	Kondisi dalam pola distribusi mayoritas
Data Anomali (label -1)	23 (5,11%)	Menyimpang dari pola mayoritas
Rentang Suhu	$26,10^\circ\text{C} - 33,20^\circ\text{C}$	Nilai minimum-maksimum dataset
Rentang pH	6,69 - 9,62	Nilai minimum-maksimum dataset
Rata-rata Suhu Normal	$28,00^\circ\text{C} (\pm 1,07)$	Pada 427 data berlabel normal
Rata-rata pH Normal	$7,69 (\pm 0,73)$	Pada 427 data berlabel normal
Rata-rata Suhu Anomali	$31,26^\circ\text{C} (\pm 1,52)$	Lebih tinggi $\pm 3,26^\circ\text{C}$ dari data normal
Rata-rata pH Anomali	$8,79 (\pm 0,93)$	Lebih tinggi $\pm 1,10$ dari data normal
Akurasi Model	94,89%	Sesuai proporsi contamination

Dari 450 record yang dilatih, model berhasil mengidentifikasi 427 data normal (94,89%) dan 23 data anomali (5,11%), dengan akurasi model sebesar 94,89% yang konsisten dengan parameter contamination yang telah ditetapkan. Data anomali umumnya memiliki suhu rata-rata $31,26^\circ\text{C}$ dan pH rata-rata 8,79, lebih tinggi dibandingkan data normal, yang mengindikasikan bahwa model berhasil mengenali pola kondisi cuaca panas yang memicu kenaikan suhu dan pH



secara bersamaan. Sebaran data pada ruang fitur suhu-pH disajikan pada Gambar 3, yang menunjukkan bahwa anomali terkonsentrasi pada area suhu tinggi ($>30^{\circ}\text{C}$) dengan pH tinggi ($>9,0$), serta terdapat satu data pencilan bersuhu rendah ($26,10^{\circ}\text{C}$) dan pH rendah (6,69) sebagai nilai ekstrem terendah pada dataset, yang membuktikan bahwa Isolation Forest mampu mengisolasi data yang secara geometris terpisah dari kelompok data mayoritas.

Analisis distribusi anomali berdasarkan periode waktu disajikan pada Tabel 3, yang dapat menjadi acuan bagi manajemen PT. IVES dalam merencanakan intensitas pemantauan sesuai kondisi musim.

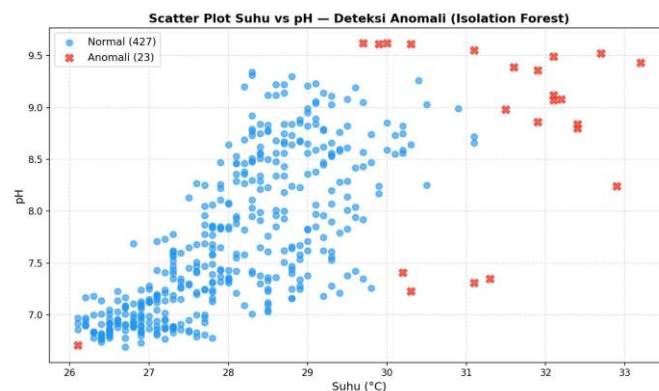
Tabel 3. Distribusi Data Anomali per Bulan

Bulan	Total Data	Normal	Anomali	% Anomali
Desember 2025	39	34	5	12,82%
Januari 2026	239	231	8	3,35%
Februari 2026	133	133	0	0,00%
Maret 2026	39	29	10	25,64%
TOTAL	450	427	23	5,11%

Bulan Maret 2026 mencatat persentase anomali tertinggi (25,64%) yang diduga berkaitan dengan cuaca panas yang lebih intens menjelang pergantian musim, sedangkan bulan Februari 2026 tidak menunjukkan anomali sama sekali (0,00%), yang mengindikasikan kondisi kualitas air sangat stabil pada periode tersebut. Temuan ini dapat menjadi dasar perencanaan jadwal pemantauan yang lebih intensif pada bulan-bulan dengan risiko anomali tinggi.

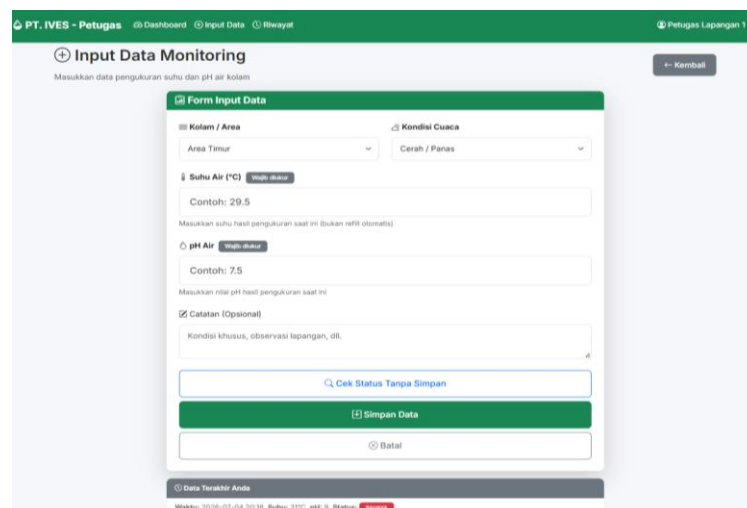
3.3 Implementasi Sistem

Sistem yang dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Python berbasis web dengan basis data MySQL. Halaman login berfungsi sebagai gerbang autentikasi yang mengarahkan pengguna ke dashboard sesuai peran (Admin/Petugas). Dashboard Admin menampilkan kartu statistik berupa jumlah data monitoring, jumlah anomali, rata-rata suhu, rata-rata pH, grafik tren tujuh hari terakhir, dan data terbaru sebagaimana disajikan pada Gambar 4.



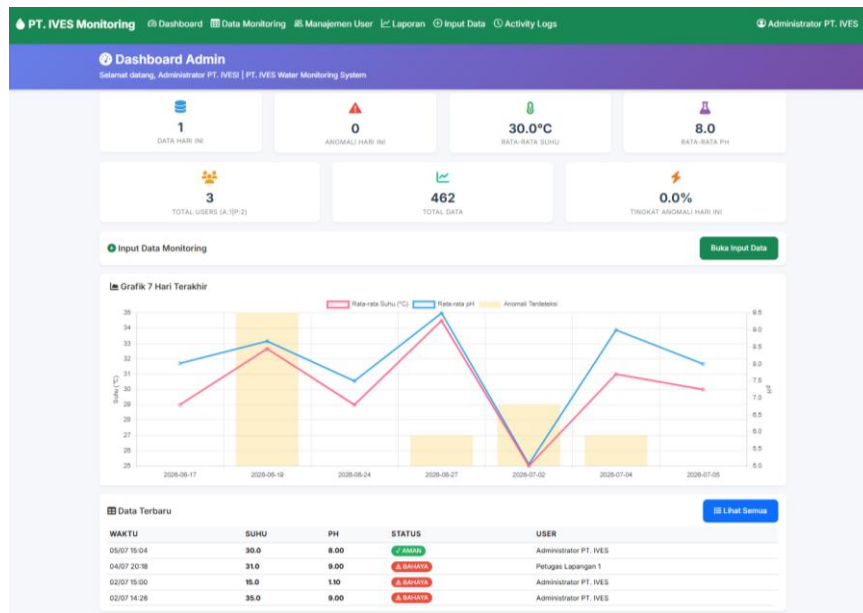
Gambar 3. Scatter Plot Hasil Deteksi Anomali Isolation Forest

Halaman input data pada Gambar 5 memungkinkan Admin maupun Petugas memasukkan nilai suhu dan pH yang secara otomatis diproses oleh model Isolation Forest untuk menghasilkan status AMAN atau BAHAYA beserta confidence score.

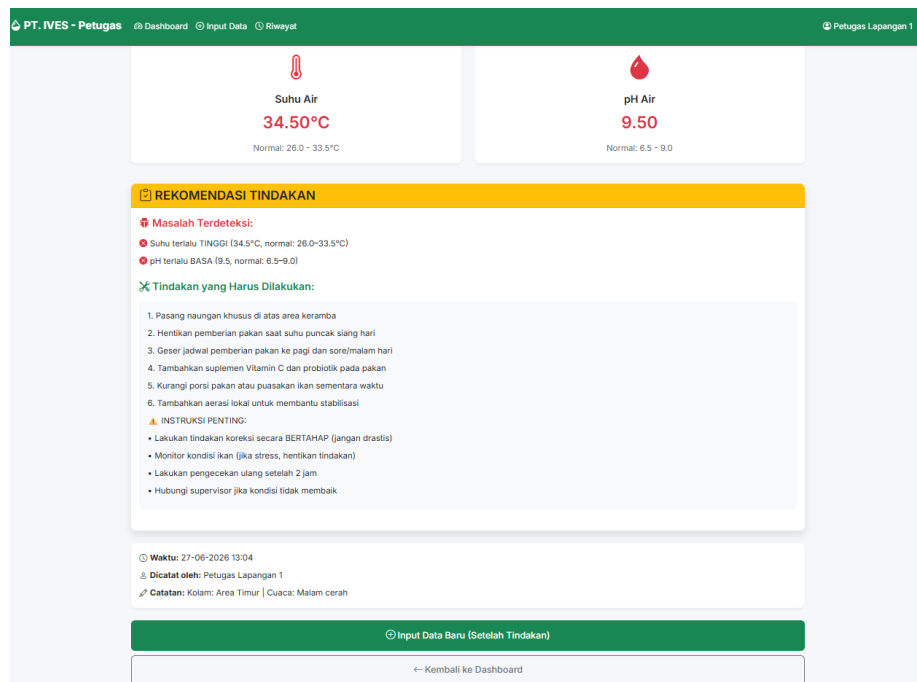


Gambar 5. Halaman Input Data Monitoring Petugas

Apabila terdeteksi anomali, sistem menampilkan halaman peringatan secara otomatis berisi nilai parameter yang menyimpang serta rekomendasi tindakan bagi petugas lapangan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 4. Halaman Dashboard Admin



Gambar 6. Halaman Peringatan Dini (Early Warning) Petugas

3.4 Pengujian Sistem

Pengujian Black Box menggunakan metode Equivalence Partitioning dan Boundary Value Analysis dilakukan terhadap 22 skenario pengujian yang mencakup modul autentikasi, Admin, Petugas, dan hak akses, sebagaimana dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Ringkasan Hasil Pengujian Black Box

No	Modul Pengujian	Jumlah Skenario	Hasil
1	Autentikasi	8	Valid
2	Admin	7	Valid
3	Petugas	5	Valid
4	Hak Akses	2	Valid
Total		22	Valid



Seluruh 22 skenario pengujian Black Box dinyatakan valid, termasuk pengujian login dengan kredensial benar dan salah, registrasi petugas baru, input data pada rentang normal maupun rentang batas (boundary/invalid), serta pengelolaan pengguna oleh Admin. Selain itu, pengujian White Box terhadap jalur logika kritis proses autentikasi dan kontrol akses membuktikan bahwa mekanisme decorator secara konsisten memblokir request yang session-nya tidak valid atau memiliki role yang tidak sesuai, serta query basis data yang digunakan bebas dari celah SQL Injection.

Pengujian penerimaan pengguna melalui kuesioner tujuh pertanyaan berskala 1–5 yang diisi oleh 5 responden (4 karyawan dan 1 supervisor PT. IVES) menunjukkan bahwa seluruh responden hanya memberikan nilai 4 (setuju) dan 5 (sangat setuju), tanpa ada nilai di bawah 4. Mayoritas pertanyaan didominasi jawaban setuju (60%) dan sangat setuju (40%), terutama untuk kemudahan petunjuk penggunaan, tampilan antarmuka, dan proses input data monitoring, sementara fitur login, deteksi anomali, dan laporan grafik memperoleh dominasi nilai 5 sebesar 60%.

3.5 Pembahasan

Dibandingkan dengan penelitian Singh dkk. [10], Ahmed dkk. [11], dan Baena-Navarro dkk. [15] yang menggunakan infrastruktur sensor IoT otomatis dengan biaya investasi dan kompleksitas jaringan yang relatif tinggi, sistem yang dikembangkan pada penelitian ini dirancang lebih ringkas dengan tetap mengedepankan otomatisasi analisis melalui algoritma Isolation Forest terhadap data hasil pengukuran manual, sehingga lebih sesuai dengan kondisi PT. IVES yang memiliki keterbatasan sumber daya manusia dan belum memiliki infrastruktur sensor otomatis. Penelitian-penelitian tersebut, demikian pula Alnemari dkk. [5] yang memanfaatkan dataset sintesis pada budidaya nila dan belum divalidasi pada kolam budidaya nyata, bertumpu pada algoritma terawasi yang memerlukan data berlabel, sedangkan penelitian ini menggunakan data pengukuran nyata dari kolam PT. IVES tanpa memerlukan label. Dibandingkan dengan penelitian Marselina dkk. [12] dan Rasyid dkk. [13] yang berfokus pada visualisasi data dan integrasi chatbot tanpa mekanisme deteksi anomali berbasis machine learning, penelitian ini memberikan nilai tambah berupa kemampuan sistem dalam memberikan peringatan dini secara otomatis tanpa memerlukan data berlabel, sesuai dengan karakteristik Isolation Forest sebagai teknik unsupervised learning [16], [14].

Dari sisi hasil deteksi, proporsi anomali pada penelitian ini sebesar 5,11% (23 dari 450 data) sejalan dengan proporsi 5% (468 dari 9.357 data) yang dilaporkan Amanda dkk. [7] pada penerapan Isolation Forest untuk data kualitas udara Torino, sehingga menunjukkan bahwa algoritma ini berperilaku konsisten terhadap parameter contamination pada domain dan skala data yang berbeda. Perbedaan lainnya, penelitian ini menggunakan data suhu dan pH hasil pengukuran manual pada kolam budidaya dengan jumlah data yang jauh lebih kecil, serta menyertakan sistem web dengan peringatan dini yang tidak dibahas pada penelitian tersebut. Isolation Forest juga telah diterapkan pada deteksi intrusi jaringan industri yang dikombinasikan dengan K-Means [6], identifikasi curah hujan berpotensi banjir bersama LSTM [8], serta log keamanan jaringan dan server [4], [9]. Penelitian ini memperluas penerapan algoritma tersebut ke bidang budidaya perikanan, khususnya pemantauan suhu dan pH air kolam.

Pada penelitian Tabassum dkk. [20], varian berbasis Isolation Forest menghasilkan akurasi tertinggi sebesar 99,21% dibandingkan varian berbasis LOF pada data rekam medis elektronik. Akurasi model sebesar 94,89% pada penelitian ini mengikuti proporsi contamination yang ditetapkan, bukan hasil evaluasi terhadap label anomali yang telah diverifikasi oleh ahli lapangan, sehingga belum dapat dibandingkan secara langsung dengan angka tersebut. Meskipun demikian, hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan Isolation Forest layak diterapkan pada skala data historis terbatas hasil pengukuran manual, serta kompleksitas komputasinya yang relatif rendah tetap dapat menghasilkan deteksi anomali yang efektif dan efisien. Validasi menggunakan label anomali dari petugas serta perbandingan dengan algoritma lain seperti LOF menjadi arah pengembangan selanjutnya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah diuraikan, Sistem Monitoring Kualitas Air Berbasis Web pada PT. IVES dengan penerapan algoritma Isolation Forest berhasil dibangun sesuai dengan rumusan masalah yang ditetapkan. Sistem peringatan dini (early warning system) berhasil dibangun untuk meminimalisasi risiko ketidakstabilan suhu dan pH air kolam budidaya, dengan validasi data saat input serta notifikasi status AMAN atau BAHAYA yang ditampilkan secara otomatis sehingga penanganan dapat dilakukan lebih cepat dibandingkan pencatatan manual. Efektivitas pemantauan kualitas air meningkat karena data suhu dan pH yang diinput petugas langsung dianalisis oleh sistem tanpa rekapitulasi manual, sebagaimana dibuktikan oleh hasil kuesioner 5 responden yang seluruhnya menyatakan setuju atau sangat setuju atas kemudahan input data dan kejelasan hasil deteksi anomali, dan sistem berbasis web yang dirancang berhasil mengumpulkan serta memvisualisasikan data secara terpusat melalui dashboard, riwayat data, laporan, dan manajemen pengguna yang dapat diakses Admin maupun Petugas sesuai peran kapan saja. Algoritma Isolation Forest dengan konfigurasi $n_estimators=100$, $contamination=0,05$, dan $random_state=42$ berhasil diterapkan untuk mendeteksi anomali suhu dan pH dengan akurasi 94,89% dari 450 data historis, yang terdiri atas 427 data normal dan 23 data anomali, dan dilengkapi rule-based fallback sebagai cadangan, serta didukung oleh pengujian Black Box pada 22 skenario yang seluruhnya dinyatakan valid dan pengujian White Box yang membuktikan jalur logika kritis dan keamanan query berfungsi baik dan bebas celah SQL Injection. Penelitian ini masih memiliki keterbatasan, di antaranya cakupan studi kasus yang terbatas pada satu lokasi budidaya, parameter kualitas air yang hanya mencakup suhu dan pH, serta pengambilan data yang masih dilakukan secara manual. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk



menguji generalisasi model pada lokasi budidaya lain, menambah parameter kualitas air seperti oksigen terlarut dan amonia, mengintegrasikan sensor Internet of Things untuk pengambilan data secara real-time, serta membandingkan performa Isolation Forest dengan algoritma unsupervised lainnya seperti Local Outlier Factor, One-Class SVM, atau Autoencoder guna memperkuat bukti keunggulan akurasi dan efisiensinya.

5. PERNYATAAN PENULIS

5.1 Kontribusi Penulis

Konseptualisasi: A. R. S., dan R. E.;

Metodologi: A. R. S., dan R. E.;

Perangkat Lunak: A. R. S.;

Validasi: A. R. S., dan R. E.;

Analisis Formal: A. R. S.;

Investigasi: A. R. S.;

Sumber Daya: A. R. S.;

Kurasi Data: A. R. S.;

Penulisan Draf Awal: A. R. S.;

Penulisan, Peninjauan, dan Penyuntingan: A. R. S., dan R. E.;

Visualisasi: A. R. S.;

Supervisi: R. E.;

Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi manuskrip yang telah diterbitkan.

5.2 Ketersediaan Data

Data suhu dan pH air yang dianalisis dalam penelitian ini (450 data historis hasil pengukuran manual pada kolam budi daya di Cisauk) tersedia berdasarkan permintaan yang wajar kepada penulis pertama.

5.3 Pendanaan

Penelitian ini dibiayai secara mandiri oleh penulis dan tidak menerima pendanaan eksternal.

5.4 Pernyataan Dewan Peninjau Institusional

Tidak Berlaku (Not applicable). Penelitian ini tidak melibatkan eksperimen pada subjek manusia atau hewan uji; data utama berupa hasil pengukuran suhu dan pH air kolam.

5.5 Pernyataan Persetujuan Berdasarkan Informasi

Tidak Berlaku (Not applicable). Evaluasi pengguna dilakukan melalui kuesioner yang diisi oleh 5 responden (4 karyawan dan 1 supervisor), dan hasilnya disajikan secara agregat tanpa mencantumkan identitas pribadi responden.

5.6 Pernyataan Konflik Kepentingan

Para penulis menyatakan bahwa mereka tidak memiliki kepentingan keuangan yang bersaing atau hubungan pribadi yang diketahui yang dapat dianggap memengaruhi pekerjaan yang dilaporkan dalam artikel ini.

5.7 Penggunaan AI Generatif dan Teknologi Berbantuan AI dalam Proses Penulisan

AI generatif dipakai penulis sebatas alat bantu penyuntingan bahasa dan pengecekan referensi saat revisi. Penulis tetap memeriksa hasilnya sendiri dan bertanggung jawab atas seluruh isi naskah..

REFERENCES

- [1] E. Toro, D. Hartono, and M. A. F. Utami, "Kajian Kualitas Air terhadap Pertumbuhan Ikan Sidat pada Kolam Air Mengalir," *Aquacoastmarine: Journal of Aquatic and Fisheries Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 50–55, 2024, doi: 10.32734/jafs.v3i1.13303.
- [2] M. I. Maulana, F. Nugraha, and A. Setiawan, "Model Prediksi Kualitas Air untuk Budidaya Ikan Lele dengan Algoritma Extreme Gradient Boosting," *Building of Informatics, Technology and Science (BITS)*, vol. 6, no. 3, pp. 1373–1382, 2024, doi: 10.47065/bits.v6i3.5998.
- [3] A. Salim and E. Edidas, "Sistem Monitoring Kualitas Air pada Budidaya Bibit Ikan Nila Menggunakan Algoritma Decision Tree," *Voteteknika (Jurnal Vokasional Teknik Elektronika dan Informatika)*, vol. 11, no. 2, pp. 187–195, 2023, doi: 10.24036/voteteknika.v11i2.122313.
- [4] A. R. Saputro, Nurchim, and V. Atina, "Identifikasi Anomali Keamanan Server Nginx Menggunakan Algoritma Isolation Forest," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 9, no. 2, pp. 2465–2471, 2025, doi: 10.36040/jati.v9i2.13110.
- [5] A. M. Alnemari et al., "Developing Highly Accurate Machine Learning Models for Optimizing Water Quality Management Decisions in Tilapia Aquaculture," *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 35600, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-16939-w.
- [6] J. X. Huang et al., "Extending Isolation Forest for Anomaly Detection in Big Data via K-Means," *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, vol. 5, no. 4, 2021, doi: 10.1145/3460976.





- [7] R. Amanda, E. Helmud, and C. Kirana, "Deteksi Anomali Polusi Udara Menggunakan Algoritma Isolation Forest tanpa Label pada Dataset Kualitas Udara Torino," *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, vol. 5, no. 9, pp. 2719–2729, 2025, doi: 10.52436/1.jpti.950.
- [8] A. Wijayanto, A. Sugiharto, and R. Santoso, "Identifikasi Dini Curah Hujan Berpotensi Banjir Menggunakan Algoritma Long Short-Term Memory (LSTM) dan Isolation Forest," *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 11, no. 3, pp. 637–646, 2024, doi: 10.25126/jtiik.938718.
- [9] R. P. Dewa and W. Windarto, "Deteksi Anomali Jaringan Menggunakan Isolation Forest pada Log Wazuh dengan Pemberitahuan WhatsApp di PT XYZ," *KRESNA: Jurnal Riset dan Pengabdian Masyarakat*, vol. 4, no. 2, pp. 208–216, 2024, doi: 10.36080/kresna.v4i2.170.
- [10] M. Singh, K. S. Sahoo, and A. H. Gandomi, "An Intelligent-IoT-Based Data Analytics for Freshwater Recirculating Aquaculture System," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 4206–4217, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3298844.
- [11] F. Ahmed, M. H. I. Bijoy, H. R. Hemal, and S. R. H. Noori, "Smart Aquaculture Analytics: Enhancing Shrimp Farming in Bangladesh through Real-Time IoT Monitoring and Predictive Machine Learning Analysis," *Heliyon*, vol. 10, no. 17, Art. no. e37330, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e37330.
- [12] S. Marselina, H. Fakhurroja, and B. Sari, "– (ICS EDTI 2022), Tanjungpinang, Indonesia, 2022, doi: 10.4108/eai.11-10-2022.2326420.
- [13] M. U. H. Al Rasyid, S. Sukaridhoto, M. I. Dzulkornain, and A. Rifa'i, "Integration of IoT and Chatbot for Aquaculture with Natural Language Processing," *TELKOMNIKA (Telecommunication, Computing, Electronics and Control)*, vol. 18, no. 2, p. 640, 2020, doi: 10.12928/telkomnika.v18i2.14788.
- [14] S. A. Alaka, "Integrating Machine Learning and IoT Technologies for Smart Water Quality Monitoring: Methods, Challenges, and Future Directions," *International Journal of Data Science and Big Data Analytics*, vol. 5, no. 2, pp. 46–68, 2025, doi: 10.51483/IJDSBDA.5.2.2025.46-68.
- [15] R. Baena-Navarro, Y. Carriazo-Regino, F. Torres-Hoyos, and J. Pinedo-Lopez, "Intelligent Prediction and Continuous Monitoring of Water Quality in Aquaculture: Integration of Machine Learning and Internet of Things for Sustainable Management," *Water*, vol. 17, no. 1, Art. no. 82, 2025, doi: 10.3390/w17010082.
- [16] F. T. Liu, K. M. Ting, and Z.-H. Zhou, "Isolation Forest," in *Proc. 2008 Eighth IEEE Int. Conf. Data Mining (ICDM)*, pp. 413–422, 2008, doi: 10.1109/ICDM.2008.17.
- [17] D. Kreuzberger, N. Kühn, and S. Hirschl, "Machine Learning Operations (MLOps): Overview, Definition, and Architecture," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 31866–31879, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3262138.
- [18] S. V. Salunke and A. Ouda, "A Performance Benchmark for the PostgreSQL and MySQL Databases," *Future Internet*, vol. 16, no. 10, Art. no. 382, 2024, doi: 10.3390/fi16100382.
- [19] S. Narulita, A. Nugroho, and M. Z. Abdillah, "Diagram Unified Modelling Language (UML) untuk Perancangan Sistem Informasi Manajemen Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (SIMLITABMAS)," *Bridge: Jurnal Publikasi Sistem Informasi dan Telekomunikasi*, vol. 2, no. 3, pp. 244–256, 2024, doi: 10.62951/bridge.v2i3.174.
- [20] M. Tabassum, S. Mahmood, A. Bukhari, B. Alshemaimri, A. Daud, and F. Khaliq, "Anomaly-Based Threat Detection in Smart Health Using Machine Learning," *BMC Medical Informatics and Decision Making*, vol. 24, no. 1, pp. 1–19, 2024, doi: 10.1186/s12911-024-02760-4.