MODEL HYBRID RULE-BASED DAN KNN UNTUK KECOCOKAN IKAN HIAS TERHADAP KUALITAS AIR

Muhamad Iqbal Nurdin Siregar[1], Aniq Astofa[2]
Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer
Universitas Pamulang[1,2]
Jl. Raya Puspiptek, Buaran, Kec. Pamulang, Kota Tangerang Selatan, Banten 15310
iqbalnurdin.siregar@gmail.com[1], dosen02360@unpam.ac.id[2]

Abstrak

Industri budidaya ikan hias menuntut pengelolaan kualitas air yang konsisten, namun PT Ikan Bangun Indonesia masih mengandalkan penilaian pakar secara manual dalam menentukan kecocokan spesies ikan terhadap kondisi air, sehingga proses ini rawan subjektivitas dan keterlambatan deteksi kondisi kritis. Penelitian ini mengembangkan sistem pendukung keputusan berbasis web yang menggabungkan *Rule-Based System* dengan *Forward Chaining* sebagai penyaring kondisi letal (Layer I) dan algoritma *K-Nearest Neighbor* berbasis jarak *Euclidean* sebagai pemeringkat kecocokan (Layer II), mencakup sepuluh spesies ikan hias dan tujuh parameter kualitas air. Sistem dibangun dengan arsitektur tiga lapis menggunakan React.js, Laravel, PostgreSQL, dan *microservice* Python FastAPI, kemudian diuji menggunakan *Black Box Testing*, *White Box Testing* dengan *basis path testing*, dan *Confusion Matrix*. Hasil pengujian menunjukkan seluruh skenario fungsional berjalan sesuai spesifikasi, seluruh jalur logika internal tereksekusi dengan benar, serta model hybrid mengklasifikasikan kelayakan air dengan akurasi, presisi, dan recall sebesar 100%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pendekatan hybrid *Rule-Based* dan KNN efektif dan andal digunakan sebagai landasan pengambilan keputusan otomatis dalam budidaya ikan hias.

Kata kunci : Sistem Pendukung Keputusan, *Forward Chaining*, *K-Nearest Neighbor*, Kualitas Air, Ikan Hias.

Abstract

The ornamental fish farming industry requires consistent water quality management, yet PT Ikan Bangun Indonesia still relies on manual expert judgment to determine fish-water compatibility, making the process subjective and prone to delayed detection of critical conditions. This research develops a web-based decision support system that combines a Rule-Based System using Forward Chaining as a lethal-condition filter (Layer I) with a K-Nearest Neighbor algorithm based on Euclidean distance as a suitability ranking layer (Layer II), covering ten ornamental fish species and seven water quality parameters. The system was built using a three-tier architecture with React.js, Laravel, PostgreSQL, and a Python FastAPI microservice, and was evaluated through Black Box Testing, White Box Testing using basis path testing, and a Confusion Matrix approach. The results show that all functional scenarios passed testing, all internal logical paths executed correctly, and the hybrid model classified water feasibility with 100% accuracy, precision, and recall. This study concludes that the hybrid Rule-Based and KNN approach is effective and reliable for automated decision-making in ornamental fish aquaculture.

Keywords*: Decision Support System, Forward Chaining, K-Nearest Neighbor, Water Quality, Ornamental Fish.*

PENDAHULUAN

Industri ikan hias menunjukkan pertumbuhan signifikan sebagai sektor ekonomi global dengan nilai transaksi yang terus meningkat, termasuk di Indonesia sebagai salah satu pemain utama pasar internasional (Putra et al., 2025). Keberhasilan budidaya ikan hias sangat bergantung pada manajemen kualitas air, karena parameter seperti pH, suhu, amonia, dan oksigen terlarut harus terjaga dalam rentang ideal untuk setiap spesies (Elza Agustina & Djoko Adi Widodo, 2023). Tanpa pemantauan yang cermat, budidaya berisiko mengalami stres, penyakit, hingga kematian massal ikan yang merugikan secara ekonomi (Satriawan et al., 2023).

Implementasi kecerdasan buatan menjadi solusi menjanjikan untuk memberikan rekomendasi akurat mengenai kesesuaian lingkungan air dengan kebutuhan spesifik tiap spesies ikan (Jesika et al., 2023). Pemanfaatan AI dan *Internet of Things* (IoT) pada akuakultur dapat mengoptimalkan pengelolaan sumber daya sekaligus mengurangi risiko kegagalan budidaya (Patro et al., 2023; Rachman Duta et

al., 2025). Pada skala yang lebih luas, penerapan AI untuk pengelolaan sumber daya air juga telah terbukti bermanfaat pada domain lain, misalnya model kampus pintar berbasis air (Wang et al., 2024) dan aplikasi AI pada ekonomi sirkular sektor air limbah (Hernández-Chover et al., 2024), yang menegaskan bahwa kebutuhan otomatisasi pengelolaan kualitas air bersifat lintas sektor, termasuk pada akuakultur ikan hias.

PT Ikan Bangun Indonesia, perusahaan budidaya ikan hias yang berdiri sejak 2017 di Ciseeng, Kabupaten Bogor, hingga saat ini masih menentukan kecocokan ikan terhadap kualitas air secara manual berdasarkan pengalaman pakar. Pendekatan ini bersifat subjektif, tidak konsisten, dan rawan terlambat mendeteksi kondisi kritis yang berpotensi menyebabkan kematian massal benih ikan. Permasalahan utama yang diidentifikasi meliputi: (1) kesulitan pembudidaya mendiagnosis kelayakan air pada tujuh parameter (pH, TDS, suhu, amonia, DO, salinitas, kekeruhan); (2) tidak adanya rekomendasi spesies otomatis dari sepuluh spesies yang dibudidayakan (Koki, Cupang, Gupi, Discus, Molly, Manfish, Corydoras, Oscar, Platys, Swordtail); (3) belum tersedia panduan tindakan korektif yang terstruktur; dan (4) proses pengambilan keputusan belum berbasis data.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan model hybrid yang menggabungkan *Rule-Based System* dengan metode *Forward Chaining* sebagai saringan awal kondisi letal, dan algoritma *K-Nearest Neighbor* (KNN) berbasis jarak *Euclidean* sebagai pemeringkat tingkat kecocokan pada spesies yang lolos penyaringan. Pendekatan dua lapis ini bertujuan menghasilkan sistem pendukung keputusan yang lebih akurat dan terperinci dibandingkan pendekatan tunggal, sekaligus memberikan rekomendasi desain wadah dan tindakan korektif secara otomatis.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menerapkan arsitektur hybrid *Forward Chaining* dan KNN dalam mendiagnosis kelayakan kualitas air dan merekomendasikan spesies ikan hias yang sesuai; (2) mengembangkan kalkulator volumetrik untuk rekomendasi batas populasi tebar aman; (3) mengintegrasikan basis pengetahuan pakar ke dalam sistem sebagai panduan remediasi dinamis; dan (4) membangun serta menguji prototipe sistem pendukung keputusan berbasis web yang fungsional dan andal bagi PT Ikan Bangun Indonesia.

PENELITIAN RELEVAN

Penelitian mengenai penerapan AI pada pengelolaan kualitas air dan akuakultur telah banyak dilakukan, namun sebagian besar berfokus pada pemantauan atau klasifikasi tunggal dan belum menggabungkan pendekatan berbasis aturan dengan KNN secara spesifik untuk menilai kecocokan ikan hias. Malisaba et al. (2026) mengembangkan sistem pemantauan kualitas air *real-time* bertenaga surya berbasis IoT, namun penerapan *machine learning* pada analisis datanya masih terbatas dan belum menyentuh rekomendasi kecocokan spesies. Salako et al. (2024) mengembangkan *Fish-NET* menggunakan *Faster R-CNN* untuk deteksi dan pelacakan ikan pada akuakultur lele, namun belum mengintegrasikan penilaian kualitas air terhadap kecocokan spesies. Sejalan dengan itu, Patro et al. (2023) menganalisis perilaku ikan hias berbasis IoT dan *machine learning*, namun juga belum menyentuh aspek pemeringkatan kecocokan spesies terhadap tujuh parameter air sekaligus.

Pada strategi yang berbeda, sejumlah peneliti mengatasi kualitas air melalui intervensi biologis alih-alih model prediktif berbasis data, misalnya penggunaan aditif probiotik dan *yucca* untuk memperbaiki kualitas air budidaya nila (Saleh et al., 2025), serta kajian peran probiotik dan paraprobiotik dalam pencegahan penyakit ikan (Fachri et al., 2024). Pendekatan tersebut efektif pada aspek biologis, tetapi tidak menyediakan mekanisme diagnosis otomatis maupun rekomendasi spesies berbasis data kualitas air seperti yang diusulkan pada penelitian ini.

Pada sisi metode klasifikasi berbasis kedekatan data, Mahendra et al. (2022), Ramadhan & Prasetio (2023), Tangkelayuk & Mailoa (2022), Prihambodo et al. (2023), Hatta & Irwansyah (2025), serta Malik Namus Akbar (2024) menerapkan algoritma KNN untuk klasifikasi kualitas air pada berbagai objek budidaya (guppy, lele, sungai, dan kolam air tawar), namun tanpa penyaring batas letal terlebih dahulu, sehingga rentan bias pada kondisi ekstrem karena KNN murni sensitif terhadap persebaran tetangga terdekat tanpa mempertimbangkan ambang kritis biologis. Di sisi lain, Ho et al. (2026) menerapkan sistem berbasis aturan (*Fuzzy Logic*/*Rule-Based*) untuk otomatisasi pemantauan kolam, namun belum dipadukan dengan algoritma klasifikasi berbasis kedekatan data seperti KNN. Ringkasan penelitian terdahulu yang relevan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Penelitian Terdahulu

Peneliti (Tahun)	Fokus Penelitian	Kesenjangan (Gap)
Malisaba et al. (2026)	Pemantauan kualitas air real-time berbasis IoT bertenaga surya	ML terbatas, belum ada rekomendasi kecocokan spesies
Salako et al. (2024)	Deteksi & pelacakan ikan berbasis Faster R-CNN (Fish-NET)	Belum menilai kecocokan ikan dengan kualitas air
Mahendra et al. (2022); Hatta & Irwansyah (2025)	Klasifikasi kualitas air kolam/guppy dengan KNN murni	KNN murni, tanpa filter batas letal
Tangkelayuk & Mailoa (2022); Prihambodo et al. (2023)	Klasifikasi kualitas air dengan KNN, Naive Bayes, Decision Tree	Rentan bias pada kondisi air ekstrem
Ho et al. (2026)	Otomatisasi pemantauan kolam berbasis Fuzzy/Rule-Based	Belum dipadukan dengan algoritma kedekatan data (KNN)
Saleh et al. (2025); Fachri et al. (2024)	Perbaikan kualitas air melalui aditif biologis (probiotik/yucca)	Tidak menyediakan diagnosis otomatis berbasis data

Kesenjangan yang teridentifikasi dari penelitian-penelitian tersebut adalah belum tersedianya model hybrid spesifik yang menggabungkan *Rule-Based Forward Chaining* sebagai penyaring parameter letal dan KNN sebagai penilai tingkat kecocokan ikan hias secara komprehensif. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan menggabungkan kedua metode agar sistem lebih dahulu mengeliminasi kondisi yang membahayakan secara biologis sebelum melakukan pemeringkatan kecocokan, sehingga rekomendasi yang dihasilkan lebih akurat dan aman bagi keberlangsungan hidup ikan.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian terapan (*applied research*) yang menghasilkan produk berupa sistem pendukung keputusan (SPK) berbasis web. Objek penelitian adalah PT Ikan Bangun Indonesia, sebuah usaha budidaya ikan hias di Ciseeng, Kabupaten Bogor, dengan sepuluh spesies ikan hias air tawar (Koki, Cupang, Gupi, Discus, Molly, Manfish, Corydoras, Oscar, Platys, Swordtail) dan tujuh parameter kualitas air (pH, TDS, suhu, amonia, DO, salinitas, kekeruhan) sebagai batasan penelitian.

Karakteristik Sensitivitas Spesies

Kesepuluh spesies objek penelitian memiliki tingkat sensitivitas lingkungan yang kontras, sehingga menuntut ambang batas letal dan ideal yang berbeda pada basis pengetahuan sistem. Ikan Koki (*Carassius auratus*) menuntut kadar oksigen terlarut tinggi namun bertoleransi pada rentang suhu yang relatif luas, sedangkan Cupang (*Betta splendens*) memiliki labirin pernapasan tambahan sehingga mampu bertahan pada kadar DO rendah, tetapi sangat peka terhadap amonia. Discus (*Symphysodon*) menuntut kekeruhan mendekati nol dan salinitas nol persen, sementara Molly (*Poecilia sphenops*) memiliki ketahanan osmoregulasi tinggi terhadap salinitas payau. Variasi karakteristik inilah yang mendasari kebutuhan filter letal per spesies pada Layer I sebelum pemeringkatan kedekatan pada Layer II dilakukan.

Sumber Data

Data penelitian dikumpulkan melalui dua sumber. Pertama, studi pustaka dari literatur ilmiah dan buku referensi untuk menyusun ambang batas ideal dan letal setiap spesies. Kedua, wawancara dengan pakar akuakultur PT IBI untuk memvalidasi dan menyesuaikan batas letal serta parameter bobot KNN dengan kondisi operasional lapangan.

Arsitektur Sistem

Sistem dibangun dengan arsitektur tiga lapis: React.js sebagai *UI engine frontend* yang dijembatani Inertia.js ke Laravel 11 sebagai *backend* pengelola logika bisnis dan basis data PostgreSQL, serta Python FastAPI sebagai *microservice* komputasi model AI hybrid. Pemisahan ini memungkinkan komputasi matematis yang berat diisolasi dari server aplikasi utama sehingga arsitektur menjadi lebih modular dan skalabel.

Rancangan Basis Data

Struktur basis data dirancang dengan empat entitas utama. Entitas *SpesiesIkan* menyimpan ambang batas ideal dan letal tujuh parameter untuk tiap spesies; entitas *KualitasAir* mencatat data masukan pengguna; entitas *Pengguna* mengelola profil pembudidaya maupun pakar; dan entitas *Rekomendasi* menyimpan hasil analisis berupa status letal, jarak KNN, serta tindakan korektif yang disarankan. Relasi antarentitas ini dikelola melalui *Eloquent Object-Relational Mapping* (ORM) pada Laravel, sehingga riwayat diagnosis dapat ditelusuri kembali tanpa duplikasi data.

Algoritma Layer I: Rule-Based Forward Chaining

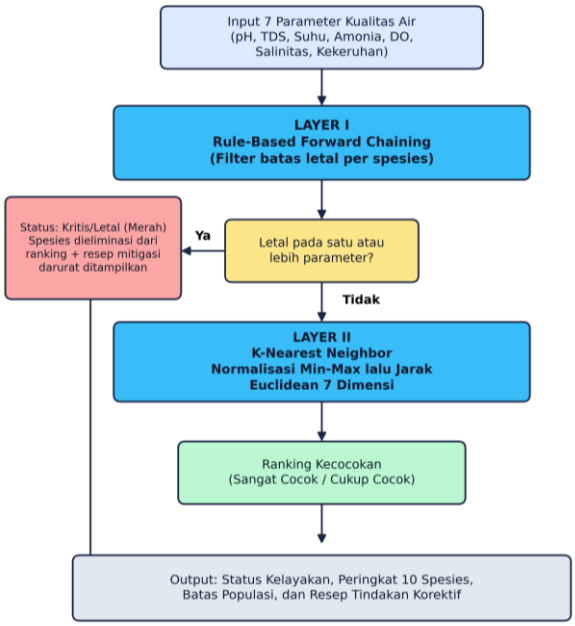
Layer pertama berfungsi sebagai saringan letal yang mengevaluasi setiap parameter kualitas air masukan terhadap batas letal minimum dan maksimum tiap spesies. Teknik inferensi *Forward Chaining* merupakan pendekatan umum pada sistem pakar berbasis aturan yang telah diterapkan pada berbagai domain diagnosis, misalnya diagnosis penyakit telinga berbasis web (Ahmadiham et al., 2024), dan pada penelitian ini diadaptasi sebagai *attrition filter* kondisi biologis. Apabila salah satu dari tujuh parameter melampaui batas letal, spesies tersebut ditandai "Kritis/Letal" dan dieliminasi dari proses pemeringkatan berikutnya, sehingga ruang pencarian menjadi lebih efisien dan hanya spesies yang secara biologis dapat bertahan yang diproses lebih lanjut.

Algoritma Layer II: K-Nearest Neighbor

Spesies yang lolos Layer I diproses pada Layer II menggunakan KNN untuk mengukur kedekatan kondisi air masukan terhadap kondisi ideal tiap spesies. Nilai setiap parameter dinormalisasi dengan metode *Min-Max* ke rentang [0,1] agar tidak ada parameter yang mendominasi perhitungan jarak, kemudian dihitung jarak *Euclidean* pada ruang tujuh dimensi menggunakan Persamaan (1). Semakin kecil nilai jarak, semakin tinggi tingkat kecocokan spesies terhadap kondisi air yang diberikan.

$$d(x,y) = \sqrt{\Sigma_{i=1}^{7}} (xi - yi)^2 \quad (1)$$

Alur kedua lapisan tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Arsitektur Hybrid Rule-Based Forward Chaining dan KNN

Alur Pemrosesan Data Lintas Framework

Proses analisis diawali ketika pengguna memasukkan tujuh parameter kualitas air melalui antarmuka *React.js*. Data tersebut diteruskan sebagai permintaan *POST* melalui *Inertia.js* menuju *Laravel Backend* yang bertindak sebagai orkestrator utama, tanpa perlu membangun *endpoint REST API* terpisah secara manual. *Laravel Backend* selanjutnya meneruskan data parameter beserta seluruh data ambang batas spesies ke *Python FastAPI Microservice* melalui *HTTP Facade*. Pada

microservice inilah komputasi Layer I (*Forward Chaining*) dan Layer II (KNN) dijalankan secara berurutan untuk setiap spesies yang tersimpan pada basis data. Hasil komputasi berupa status kelayakan, peringkat jarak *Euclidean*, dan rekomendasi tindakan korektif dikembalikan dalam format *JSON* ke *Laravel Backend*, yang kemudian meneruskannya kembali ke *React.js Frontend* melalui *Inertia.js* sebagai *props* untuk ditampilkan kepada pengguna. Pemisahan tanggung jawab lintas *framework* ini menjaga agar komputasi matematis yang berat tidak membebani *server* aplikasi utama.

Kalkulator Volumetrik dan Populasi Tebar

Selain diagnosis kecocokan, sistem menyediakan modul kalkulator yang mengonversi dimensi fisik empat jenis wadah budidaya (Akuarium, Kolam Terpal Bulat, Kolam Tanah, dan Kolam Beton) menjadi volume air dalam liter, kemudian membaginya dengan koefisien kebutuhan ruang (liter/ekor) tiap spesies untuk menghasilkan rekomendasi batas populasi tebar aman harian. Kolam Tanah memperhitungkan faktor efisiensi volume sebesar 90% untuk mengompensasi kemiringan dasar kolam, sedangkan wadah berbentuk silinder (Kolam Terpal Bulat) menggunakan rumus volume tabung.

Teknik Pengujian

Pengujian sistem dilakukan melalui tiga pendekatan. *Black Box Testing* menggunakan teknik *equivalence partitioning* dan *boundary value analysis* untuk memvalidasi kesesuaian *input-output* pada enam kategori fungsional. *White Box Testing* menggunakan *basis path testing* untuk menghitung kompleksitas siklomatis $V(G) = E - N + 2$ dan menentukan jalur independen minimum pada fungsi inti *forward chaining* dan evaluasi status parameter. Evaluasi kinerja model AI dilakukan dengan pendekatan *Confusion Matrix* pada 100 kombinasi data uji (10 spesies × 10 variasi kondisi air) yang membandingkan hasil klasifikasi sistem dengan label *ground truth* hasil validasi pakar, untuk mengukur akurasi, presisi, *recall*, dan *F1-Score* pada klasifikasi biner Layer I dan multi-kelas Layer II.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Sistem

Antarmuka dasbor utama menampilkan galeri katalog sepuluh spesies ikan hias (*CatalogGrid*) yang menampilkan deskripsi biologis, rentang tujuh parameter ideal, dan wadah rekomendasi tiap spesies ketika kartu diklik. Formulir input parameter kualitas air (*LeftInputPanel*) mendukung dua mode analisis, yaitu Case 1 (“Sudah Punya Wadah”) dengan sub-formulir jenis dan dimensi wadah, dan Case 2 (“Belum Punya Wadah”) yang menampilkan rekomendasi desain wadah. Lima dari tujuh *field* parameter dilengkapi ikon “mata” sebagai saklar (*toggle*) antara input numerik manual dan *dropdown* deskriptif naratif bagi pembudidaya awam yang tidak memiliki alat ukur presisi.

Panel hasil analisis (*DiagnosticMatrix*) menampilkan peringkat kecocokan dengan *badge* status tiga warna (hijau/kuning/merah), tabel evaluasi tujuh parameter, serta resep mitigasi yang ditumpuk (*stacked*) apabila lebih dari satu parameter berstatus *warning* atau letal secara simultan. Simulator *What-If* (*WhatIfSlider*) berupa tujuh *range slider* mereplikasi logika evaluasi Layer I dan Layer II secara langsung di sisi klien (*client-side*), sehingga status kelayakan dan peringkat kecocokan dapat diperbarui secara *real-time* tanpa mengirim ulang permintaan ke server. Halaman manajemen pakar (*Pakar Dashboard*) menyediakan operasi *CRUD* penuh terhadap standar spesies dan resep mitigasi, sehingga basis pengetahuan dapat diperbarui secara mandiri oleh pakar non-programmer tanpa perlu *deployment* ulang kode program.

Verifikasi Perhitungan Manual

Verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil sistem terhadap perhitungan manual pada kasus ikan Mas Koki dengan input pH 7,5, suhu 28°C, amonia 0,1 ppm, DO 6,0 ppm, salinitas 0,5 ppt, dan kekeruhan 15 NTU. Seluruh parameter berada dalam batas aman (Layer I), sehingga dilanjutkan ke perhitungan jarak *Euclidean* pada Layer II terhadap kondisi historis ideal Mas Koki, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Normalisasi Min-Max Parameter Ikan Mas Koki

Parameter	Input Pengguna	Data Historis
pH	0,50	0,35
Suhu	0,65	0,50
Amonia	0,40	0,10
DO	0,70	0,80
Salinitas	0,15	0,05
Kekeruhan	0,20	0,10

Hasil perhitungan jarak *Euclidean* pada data ternormalisasi tersebut menghasilkan nilai 0,406, yang identik dengan hasil komputasi sistem (selisih < 0,01), sehingga membuktikan konsistensi antara logika perhitungan pada *microservice* Python dan logika perhitungan manual.

Hasil Kalkulator Volumetrik

Pengujian modul kalkulator menunjukkan konversi dimensi wadah ke volume dan batas populasi berjalan sesuai perhitungan matematis, sebagaimana dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kalkulator Volume dan Populasi

Skenario	Data Uji	Hasil
Volume Akuarium	100×50×40 cm	200 liter
Volume Kolam Terpal Bulat	Diameter 100 cm, tinggi 60 cm	≈ 471,2 liter
Volume Kolam Tanah (efisiensi 90%)	200×150×50 cm	1.350 liter
Batas populasi Koki	Volume 200 L, 25 L/ekor	8 ekor
Batas populasi Oscar	Volume 200 L, 120 L/ekor	1 ekor

Hasil Pengujian *Black Box* dan *White Box*

Pengujian *Black Box* pada enam kategori fungsional menggunakan teknik *equivalence partitioning* dan *boundary value analysis* menunjukkan seluruh 38 skenario berjalan valid (100%), sebagaimana dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Pengujian *Black Box*

Kategori Pengujian	Jumlah Skenario	Valid	Persentase
Formulir Input dan Validasi	12	12	100%
Analisis dan Algoritma Hibrida	6	6	100%
Kalkulator Volume dan Populasi	6	6	100%
Simulator What-If Sandbox	3	3	100%
Riwayat dan Ekspor PDF	3	3	100%
Portal dan Otorisasi Pakar	8	8	100%
Total	38	38	100%

Pengujian *White Box* menggunakan *basis path testing* pada fungsi inti *check_letal_bounds* dan *evaluate_params*. Fungsi *check_letal_bounds* memiliki kompleksitas siklomatis V(G) = 4 sehingga diperlukan empat jalur independen minimum, sedangkan fungsi *evaluate_params* memiliki tiga cabang keputusan bertingkat (letal → *warning* → ok). Seluruh jalur independen pada kedua fungsi tersebut berhasil dieksekusi dengan benar (Tabel 5). Otomasi *unit testing* menggunakan *pytest* pada empat fungsi inti sistem menghasilkan 23 asersi dengan tingkat kelolosan 100%.

Tabel 5. Rekapitulasi Pengujian *White Box*

Fungsi	V(G) / Cabang	Jalur Diuji	Hasil
check_letal_bounds	V(G) = 4	4	Valid
evaluate_params	3 cabang bertingkat	5	Valid
compute_knn_distance	-	5 asersi	Valid
calculate_volume	-	5 asersi	Valid

Hasil Evaluasi Confusion Matrix

Evaluasi performa model dilakukan pada 100 kombinasi data uji (10 spesies × 10 variasi kondisi air). Pada Layer I, klasifikasi biner letal/aman menghasilkan 30 *True Positive*, 70 *True Negative*, dan nol *False Positive/Negative* (Tabel 6). Pada Layer II, klasifikasi multi-kelas tiga status (Sangat Cocok, Cukup Cocok, Kritis/Letal) juga menghasilkan klasifikasi yang seluruhnya tepat (Tabel 7).

Tabel 6. Confusion Matrix Layer I (Forward Chaining)

Aktual \ Prediksi	Letal	Aman	Total
Letal	TP = 30	FN = 0	30
Aman	FP = 0	TN = 70	70
Total	30	70	100

Tabel 7. Confusion Matrix Layer II (Status Akhir Multi-Kelas)

Aktual \ Prediksi	Hijau	Kuning	Merah	Total
Sangat Cocok (Hijau)	20	0	0	20
Cukup Cocok (Kuning)	0	50	0	50
Kritis/Letal (Merah)	0	0	30	30
Total	20	50	30	100

Berdasarkan kedua matriks tersebut, keempat metrik evaluasi standar dihitung dan dirangkum pada Tabel 8. Seluruh nilai mencapai 100% pada kedua layer, menunjukkan tidak ada kesalahan klasifikasi pada 100 data uji yang digunakan.

Tabel 8. Hasil Metrik Evaluasi Layer I dan Layer II

Metrik	Layer I (Biner)	Layer II (Rata-rata Multi-Kelas)
Accuracy	100%	100%
Precision	100%	100%
Recall (Sensitivity)	100%	100%
F1-Score	100%	100%

Pembahasan

Nilai *recall* 100% (*False Negative* = 0) pada Layer I merupakan capaian krusial karena kegagalan mendeteksi kondisi letal berisiko menyebabkan kematian massal ikan tanpa peringatan. Nilai *precision* 100% (*False Positive* = 0) menunjukkan sistem tidak pernah memicu status darurat palsu, sehingga menjaga kepercayaan pembudidaya terhadap peringatan yang dikeluarkan. Pada Layer II, kelas "Cukup Cocok" yang secara teoretis rentan mengalami kesalahan klasifikasi karena posisinya di antara rentang ideal dan letal, tetap terklasifikasi secara konsisten. Hal ini disebabkan oleh penerapan normalisasi *Min-Max* pada tujuh parameter sebelum perhitungan jarak *Euclidean*, sehingga perbedaan skala antarparameter tidak membiaskan keputusan akhir.

Dibandingkan dengan penelitian yang menerapkan KNN murni tanpa penyaringan awal (Mahendra et al., 2022; Tangkelayuk & Mailoa, 2022; Prihambodo et al., 2023; Hatta & Irwansyah, 2025), pendekatan hybrid pada penelitian ini terbukti lebih andal karena kesalahan klasifikasi pada kondisi ekstrem umumnya terjadi ketika KNN murni tidak mempertimbangkan batas kritis biologis. Filter *Forward Chaining* pada Layer I menutupi kelemahan tersebut dengan mengeliminasi kondisi berbahaya sebelum proses pemeringkatan kedekatan dilakukan.

Meski hasil pengujian menunjukkan performa sempurna, penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan. Pertama, ambang batas ideal dan letal tujuh parameter bersumber dari studi pustaka dan validasi satu pakar akuakultur, sehingga generalisasi ke kondisi *farm* lain dengan karakteristik air berbeda perlu diuji lebih lanjut. Kedua, dataset evaluasi *Confusion Matrix* berjumlah 100 kombinasi data uji yang disusun secara terstruktur, bukan data historis sensor lapangan secara langsung, sehingga performa pada data dunia nyata yang lebih bervariasi dan bersifat *noisy* masih perlu divalidasi. Ketiga, bobot ketujuh parameter pada perhitungan jarak *Euclidean* diasumsikan setara setelah normalisasi *Min-Max*, padahal secara biologis tingkat sensitivitas tiap spesies terhadap

parameter tertentu dapat berbeda, sehingga pembobotan adaptif per spesies menjadi peluang pengembangan lanjutan.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem pendukung keputusan hybrid yang menggabungkan *Rule-Based Forward Chaining* sebagai saringan letal cepat pada Layer I dan *K-Nearest Neighbor* berbasis jarak *Euclidean* sebagai pemeringkat kecocokan pada Layer II, untuk menentukan kecocokan sepuluh spesies ikan hias terhadap tujuh parameter kualitas air pada PT Ikan Bangun Indonesia. Sistem yang dibangun dengan arsitektur React.js, Laravel, PostgreSQL, dan *microservice* Python FastAPI ini telah diuji melalui *Black Box Testing* (38 skenario, 100% valid), *White Box Testing* (seluruh jalur independen tereksekusi benar, 23 asersi *unit test* 100% lolos), dan evaluasi *Confusion Matrix* yang menunjukkan akurasi, presisi, *recall*, dan *F1-Score* sebesar 100% pada klasifikasi biner Layer I maupun multi-kelas Layer II. Sistem ini juga dilengkapi kalkulator volumetrik untuk rekomendasi batas populasi tebar aman dan basis pengetahuan pakar yang dapat diperbarui secara mandiri melalui portal manajemen tanpa *deployment* ulang kode program.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan sensor IoT (pH meter, *probe* TDS, termokopel digital) guna menggantikan input manual dengan pemantauan waktu nyata, mengeksplorasi penggabungan metode *Certainty Factor* atau *Fuzzy Logic* untuk menangani ketidakpastian pada nilai parameter di ambang batas kritis, serta memperluas validasi dataset dengan data historis lapangan dari lebih banyak pakar akuakultur guna memperkuat generalisasi model.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmadiham, A. A., Rueh, E., Leluni, D., Priskila, R., & Handrianus Pranatawijaya, V. (2024). Sistem Pakar Diagnosa Penyakit Telinga Berbasis Web Menggunakan Forward Chaining. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, *8*(3), 3448–3453. https://doi.org/10.36040/JATI.V8I3.9692

Elza Agustina, & Djoko Adi Widodo. (2023). Aplikasi Kontrol Kualitas Air dan Pakan Untuk Peningkatan Produktivitas Budidaya Betta Fish. *Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro Universitas Negeri Semarang*, *17*(1). https://doi.org/10.23960/ELC.V17N1.2395

Fachri, M., Amoah, K., Huang, Y., Cai, J., Alfatat, A., Ndandala, C. B., Shija, V. M., Jin, X., Bissih, F., & Chen, H. (2024). Probiotics and paraprobiotics in aquaculture: a sustainable strategy for enhancing fish growth, health and disease prevention-a review. *Frontiers in Marine Science*, *11*, 1499228. https://doi.org/10.3389/FMARS.2024.1499228/FULL

Hatta, M., & Irwansyah, D. (2025). Analisis Klasifikasi Kualitas Air dalam mengoptimalkan Pertumbuhan Ikan Berdasarkan Model K-Nearest Neighbor. *Sisfo: Jurnal Ilmiah Sistem Informasi*, *9*(1), 63–76. https://doi.org/10.29103/SISFO.V9I1.22133

Hernández-Chover, V., Bellver-Domingo, Á., Castellet-Viciano, L., & Hernández-Sancho, F. (2024). AI Applied to the Circular Economy: An Approach in the Wastewater Sector. *Sustainability 16*(4), 1365. https://doi.org/10.3390/SU16041365

Ho, C.-T., Yang, C.-F., Guansing, A. S., Nallatan, A., & Magwili, G. (2026). Automated IoT-Based Water Quality Monitoring and Control with Fuzzy Logic for Intensive Aquaculture of Oreochromis niloticus. *Engineering Proceedings 134*(1), 60. https://doi.org/10.3390/ENGPROC2026134060

Jesika, S., Ramadhani, S., Putri, Y. P., Iskandar, J. W., Medan, P. V, Tuan, S., & Serdang, D. (2023). Implementasi Model Machine Learning dalam Mengklasifikasi Kualitas Air. *Jurnal Ilmiah Dan Karya Mahasiswa*, *1*(6), 382–396. https://doi.org/10.54066/JIKMA.V1I6.1162

Mahendra, R. W., Setiawan, E., & Maulana, R. (2022). Sistem Pengendali Kualitas Air untuk Budidaya Ikan Guppy berdasarkan Suhu dan Derajat Keasaman Air menggunakan Metode KNN (K-Nearest Neighbor). *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, *6*(1), 473–481. https://j-ptiik.ub.ac.id/index.php/j-ptiik/article/view/10540

Malik Namus Akbar, F. (2024). Metode KNN (K-Nearest Neighbor) untuk Menentukan Kualitas Air. *Jurnal TEKNO KOMPAK*, *18*(1).

Malisaba, J., Barah, O. O., Onep, S. G., Mushabe, D., & Ninsiima, E. (2026). Solar-powered multi-contaminant detection for real-time water quality monitoring. *Npj Clean Water 2026*. https://doi.org/10.1038/s41545-026-00576-5

Patro, K. S. K., Yadav, V. K., Bharti, V. S., Sharma, A., Sharma, A., & Senthilkumar, T. (2023). IoT and ML approach for ornamental fish behaviour analysis. *Scientific Reports 13*(1), 21415.https://doi.org/10.1038/s41598-023-48057-w

Prihambodo, B., Y, A. W. F., Prayoga, E., & Jaffar, A. (2023). Klasifikasi Kualitas Air Sungai Berbasis Teknik Data Mining Dengan Metode K-Nearest Neighbor (K-NN). *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, *1*(1), 31–36. https://doi.org/10.23917/EMITOR.V1I1.20833

Putra, W. D., Pahrizal, P., Khairullah, K., & Darnita, Y. (2025). Perancangan Sistem Diagnosa Penyakit Ikan Hias Menggunakan Metode Forward Chaining. *JURNAL MEDIA INFOTAMA*, *21*(1), 329–335. https://doi.org/10.37676/JMI.V21I1.8130

Rachman Duta, A., Nasrullah, E., Ratna Sulistiyanti, S., & Hias Mas Koki, I. (2025). Rancang Bangun Sistem Pemantauan dan Pengendalian Kualitas Air Pada Akuarium Ikan Hias Mas Koki Menggunakan Metode Fuzzy Logic Berbasis

IoT(Internet of Things). *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, *13*(1), 2830–7062. https://doi.org/10.23960/JITET.V13I1.5667

Ramadhan, D., & Prasetio, B. H. (2023). Sistem Klasifikasi Kualitas Air Kolam Ikan Lele dengan Metode K-Nearest Neighbor (KNN). Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer, 7(7), 3441–3447. https://j-ptiik.ub.ac.id/index.php/j-ptiik/article/view/12891

Salako, J., Ojo, F., & Awe, O. O. (2024). Fish-NET: Advancing Aquaculture Management through AI-Enhanced Fish Monitoring and Tracking. *Agris On-Line Papers in Economics and Informatics*, *16*(2), 121–131. https://doi.org/10.7160/AOL.2024.160209

Saleh, H. H. E., Attia, E. S. I., Abdel-Aziz, M. F. A., Abdelwarith, A. A., Younis, E. M., Helal, A. M., Davies, S. J., & Soaudy, M. R. (2025). Evaluation of some commercial water additives of probiotics and yucca on water quality, blood biochemistry, sex hormones, reproductive and fry performance of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) that were reared under unchanged water. *Italian Journal of Animal Science*, *24*(1), 1224–1238. https://doi.org/10.1080/1828051X.2025.2506735

Satriawan, M. R., Priyandoko, G., & Setiawidayat, S. (2023). Monitoring pH Dan Suhu Air Pada Budidaya Ikan Mas Koki Berbasis IoT. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, *5*(1), 12–17. https://doi.org/10.37905/JJEEE.V5I1.16083

Tangkelayuk, A., & Mailoa, E. (2022). Klasifikasi Kualitas Air Menggunakan Metode KNN, Naïve Bayes, dan Decision Tree. *JATISI*, *9*(2), 1109–1119. https://doi.org/10.35957/JATISI.V9I2.2048

Wang, X., Cai, Q., Li, D., Hong, L., Ma, Z., Zhu, W., Qian, L., Sun, J., Fan, Z., & Xie, C. (2024). From Concept to Reality: The Practical Implementation of a Laboratory-Based Smart Water Campus Model. *Sustainability 17*(1), 221. https://doi.org/10.3390/SU17010221