



Perancangan Aplikasi Prediksi Kerusakan UAV Menggunakan Algoritma Isolation Forest Berbasis Data Sensor Penerbangan

Design of UAV Damage Prediction Application Using Isolation Forest Algorithm Based on Flight Sensor Data

Syahrul Reza¹, Fatiya Qurrotu'Aini², Khairil Atha³, Ninda Cahya Noprianingrum⁴, Arif Rahman⁵, Muhammad Imam Dinata⁶

^{1,2} Sistem dan Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Mataram

syahrulrezaynsyah@gmail.com, fatiyaqurrotuaini47@gmail.com, khairilatha232@gmail.com

cahyanoprianingrumninda@gmail.com, arif.rahman@ummat.ac.id, Imam.dinata@ummat.ac.id

Abstract— *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are widely used in mapping, agriculture, and environmental monitoring. One of the main challenges in UAV operations is detecting component failures early. This study aims to design a UAV damage prediction application based on flight sensor data using the Isolation Forest algorithm. The data include motor temperature, vibration, current, and propeller speed collected from UAV telemetry systems. The research process involves data preprocessing, normalization, algorithm implementation, and evaluation using Principal Component Analysis (PCA). The Isolation Forest algorithm was selected for its efficiency in detecting anomalies without labeled data and handling high-dimensional datasets. The results show that the model can accurately detect potential damage and produce stable outcomes. The application was developed using the Waterfall method and includes an interactive dashboard for early UAV failure alerts. This research contributes to predictive maintenance and improves UAV flight safety.*

Keywords— UAV, Isolation Forest, anomaly detection, sensor data, predictive maintenance

Abstrak— *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) merupakan teknologi yang banyak dimanfaatkan dalam bidang pemetaan, pertanian, dan pemantauan lingkungan. Salah satu permasalahan utama dalam pengoperasian UAV adalah terjadinya kerusakan komponen yang sulit terdeteksi secara dini. Penelitian ini bertujuan untuk merancang aplikasi prediksi kerusakan UAV berbasis data sensor penerbangan menggunakan algoritma Isolation Forest. Data yang digunakan mencakup suhu motor, getaran, arus listrik, dan kecepatan propeller yang dikumpulkan melalui sistem telemetri UAV. Proses penelitian dilakukan melalui tahapan data preprocessing, normalisasi, penerapan algoritma Isolation Forest, dan evaluasi menggunakan Principal Component Analysis (PCA). Algoritma Isolation Forest dipilih karena kemampuannya mendeteksi anomali tanpa memerlukan data berlabel serta efisien dalam mengolah data berdimensi tinggi. Hasil pengujian menunjukkan model mampu mengidentifikasi potensi kerusakan dengan tingkat akurasi yang tinggi dan kestabilan hasil yang baik. Aplikasi dikembangkan dengan metode Waterfall dan menampilkan dashboard interaktif yang memberikan peringatan dini terhadap kerusakan UAV. Penelitian ini diharapkan dapat membantu proses pemeliharaan prediktif dan meningkatkan keselamatan penerbangan UAV.*

Kata Kunci— UAV, Isolation Forest, deteksi anomali, data sensor, pemeliharaan prediktif

1. PENDAHULUAN

Dalam satu dekade terakhir, kemajuan teknologi pertahanan telah mengubah operasi militer modern melalui integrasi sistem otonom seperti Unmanned Aerial Vehicle (UAV) atau drone. UAV kini berperan strategis dalam misi pengintaian, pemantauan, dan serangan presisi tanpa mengorbankan keselamatan personel [1][2][3]. Didukung kecerdasan buatan, sensor presisi tinggi, dan navigasi adaptif, UAV menjadi komponen penting pertahanan udara modern [4][5]. Namun, kinerja UAV sangat bergantung pada kondisi motor, sensor, arus listrik, suhu, dan getaran. Kerusakan kecil yang tidak terdeteksi dapat menyebabkan kegagalan misi hingga kehilangan aset strategis [5][6]. Untuk mencegah hal tersebut, dibutuhkan sistem cerdas berbasis machine learning yang mampu memprediksi kerusakan sejak dini.

Berbagai penelitian telah menerapkan algoritma seperti Random Forest, CNN, Transformer, dan Bayesian Gaussian Mixture Model (BGMM) untuk mendeteksi kerusakan UAV, namun sebagian besar membutuhkan data besar, waktu pelatihan lama, dan komputasi tinggi. Pada penelitian ini akan dilakukan pengembangan sistem prediksi kerusakan UAV berbasis Isolation Forest yang efisien, hemat memori, tidak memerlukan data berlabel, serta mampu mendeteksi anomali pada komponen utama UAV seperti motor, propeller, sistem kelistrikan, dan baterai secara akurat untuk mendukung perawatan preventif dan meningkatkan keandalan misi pertahanan.

II. LANDASAN TEORI

Sistem udara tanpa awak atau *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) merupakan platform yang dapat dikendalikan dari jarak jauh maupun secara otonom melalui integrasi sistem mekanik, elektronik, komunikasi, dan perangkat lunak. UAV modern dilengkapi sistem telemetri dua arah untuk memantau real-time parameter penerbangan seperti ketinggian, kecepatan, suhu motor, dan status baterai [7][8]. Penelitian oleh ALFA dataset menunjukkan bahwa data nyata UAV dengan skenario kerusakan dapat digunakan untuk riset deteksi anomali dan penyediaan data ground-truth untuk membandingkan metode-metode baru.

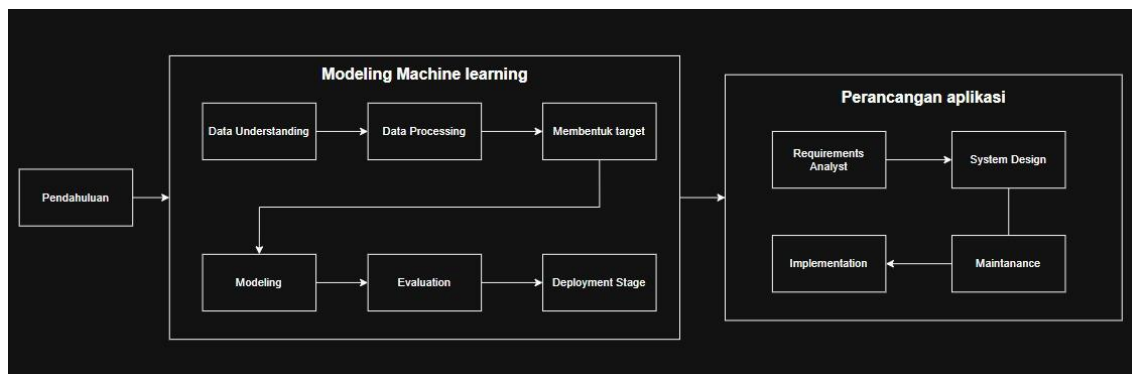
Secara struktural, UAV biasanya terdiri dari komponen utama seperti motor (sering tipe BLDC), propeller yang menghasilkan gaya angkat/thrust, flight controller yang menjalankan algoritma kontrol (misalnya PID), sensor (gyroscope, accelerometer, barometer, GPS) serta baterai sebagai sumber energi utama [8][9]. Data telemetri dan sensor ini kemudian dikumpulkan dan dianalisis untuk pemantauan kondisi sistem UAV. Pada penelitian yang dilakukan oleh [10] dalam mengembangkan sistem deteksi anomali real-time menggunakan machine learning berbasis data UAV yang menunjukan potensi deteksi kerusakan atau kondisi abnormal.

Dalam analisis data sensor UAV, teknologi *Machine Learning* menawarkan solusi untuk mengenali pola kompleks tanpa pemrograman eksplisit. Salah satu metode populer adalah algoritma Isolation Forest yang bersifat unsupervised dan tidak membutuhkan label kerusakan, memungkinkan deteksi anomali pada data penerbangan UAV yang besar dan berisik [10]. Pada penelitian yang dilakukan oleh [11] menggunakan kombinasi dekomposisi wavelet dan stacked denoising autoencoder untuk mendeteksi anomali pada data penerbangan UAV mendapatkan hasil akurasi hingga 97,53%.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan merupakan penelitian terapan (applied research) dengan pendekatan kuantitatif dan eksperimental. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menganalisis data numerik yang diperoleh dari dataset sensor penerbangan UAV secara sistematis dan statistik. Sedangkan pendekatan eksperimental diterapkan untuk merancang, mengimplementasikan, serta menguji kinerja algoritma Isolation Forest dalam mengidentifikasi dan memprediksi potensi

kerusakan UAV berdasarkan data anomali yang terdeteksi. Algoritma ini dipilih karena kemampuannya yang efektif dalam mendeteksi anomali tanpa memerlukan data berlabel, serta efisiensinya dalam pemrosesan data berdimensi tinggi dan besar, yang sangat cocok untuk aplikasi real-time monitoring sistem UAV militer.



Gambar 1. Tahap Penelitian

PERANCANGAN MODEL MACHINE LEARNING

1. Studi Literatur

Penggunaan UAV semakin meluas terutama dalam misi militer dan pengawasan. Keandalan UAV sangat bergantung pada kondisi sensor dan komponen utama seperti motor dan propeller. Berbagai algoritma machine learning seperti Transformer, CNN, dan Random Forest telah digunakan untuk memprediksi kerusakan UAV dengan berbagai keunggulan dan keterbatasan. Namun, algoritma Isolation Forest banyak diaplikasikan karena efisiensinya dalam mendeteksi anomali tanpa perlu data berlabel serta mampu menangani data berdimensi tinggi. Pendekatan ini memungkinkan prediksi dini kerusakan UAV dari data sensor penerbangan secara real-time, mendukung strategi pemeliharaan preventif yang kritis dalam konteks pertahanan udara.

2. Data Preprocessing

Proses preprocessing pada kode ini mencakup beberapa tahap penting, yaitu: (1) Konversi data ke numerik, di mana seluruh kolom diubah menjadi tipe data angka agar dapat diproses oleh algoritma machine learning serta membantu mendeteksi data non-angka yang tidak sesuai format; (2) Penanganan missing value dengan mengganti nilai kosong menggunakan median dari masing-masing kolom untuk menjaga kestabilan distribusi data tanpa menghapus baris secara berlebihan; (3) Normalisasi (StandardScaler), yaitu menstandarkan data agar setiap fitur memiliki rata-rata nol dan standar deviasi satu sehingga skala antarfitur menjadi seragam; (4) Membuat DataFrame baru hasil transformasi agar hasil normalisasi tetap terstruktur rapi dan mudah digunakan dalam pelatihan model maupun visualisasi; serta (5) Visualisasi distribusi fitur terstandarisasi menggunakan grafik histogram untuk memastikan data telah tersebar merata tanpa perbedaan skala signifikan antarfitur.

3. Pemodelan dan Evaluasi

Tahap pemodelan dan evaluasi sistem deteksi anomali UAV dilakukan menggunakan algoritma Isolation Forest yang mendeteksi perilaku sensor tidak normal secara unsupervised. Model dikonfigurasi dengan $n_estimators=100$, $contamination=0.05$, dan $random_state=42$, lalu dilatih pada data yang telah dinormalisasi dan dibersihkan. Hasilnya berupa label anomaly (1 = normal, -1 = anomali) dan $anomaly_score$ sebagai tingkat keanehan tiap data. Evaluasi dilakukan melalui metrik detection accuracy, score consistency, separation score, dan stability score untuk menilai keakuratan, kestabilan, dan pemisahan antara data normal dan anomali, serta analisis DBSCAN untuk melihat pola distribusi anomali. Semua metrik dirata-rata menjadi overall quality score, di mana nilai di atas 0.8 menunjukkan performa sangat baik. Hasil evaluasi diperkuat

Perancangan Aplikasi Prediksi Kerusakan UAV Menggunakan Algoritma Isolation Forest Berbasis Data Sensor Penerbangan (Syahrul Reza)

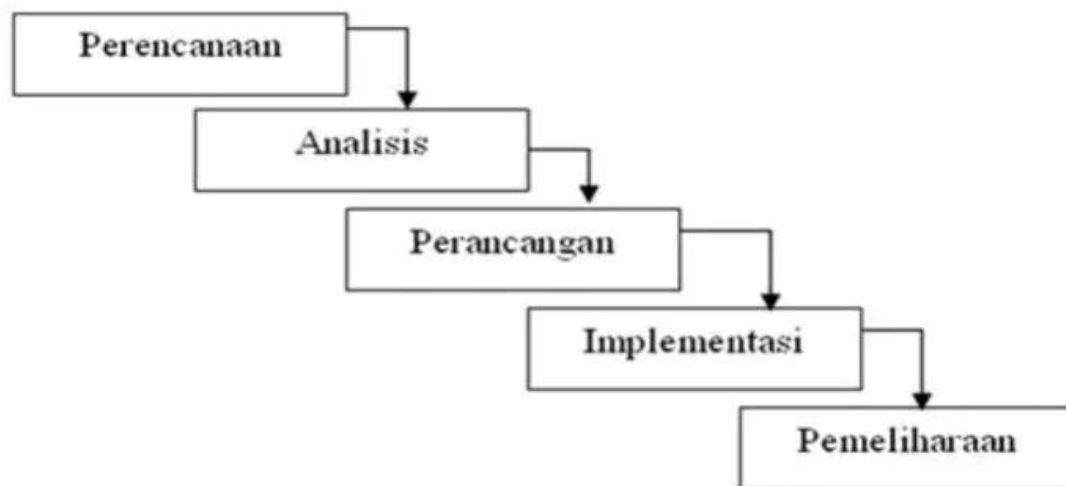
dengan visualisasi grafik distribusi, peta GPS, serta pemetaan PCA dan t-SNE untuk memastikan anomali terdeteksi jelas dan konsisten.

Model Pengembangan Sistem

Model Waterfall merupakan salah satu metode pengembangan sistem yang paling klasik dan terstruktur dalam bidang rekayasa perangkat lunak (Software Engineering). Pendekatan ini menekankan pada proses pengembangan yang bersifat linear dan berurutan, di mana setiap tahap harus diselesaikan sepenuhnya sebelum melanjutkan ke tahap berikutnya. Setiap tahap menghasilkan keluaran (output) yang menjadi masukan (input) bagi tahap berikutnya, sehingga memastikan keterlacakan, konsistensi, dan kontrol kualitas selama proses pengembangan sistem berlangsung.

Tahapan Metode Waterfall

Metode Waterfall terdiri atas beberapa tahapan utama yang berjalan secara berurutan dan saling bergantung, di mana hasil dari satu tahap akan menjadi dasar bagi tahap berikutnya. Adapun tahapan-tahapan tersebut dijabarkan sebagai berikut:



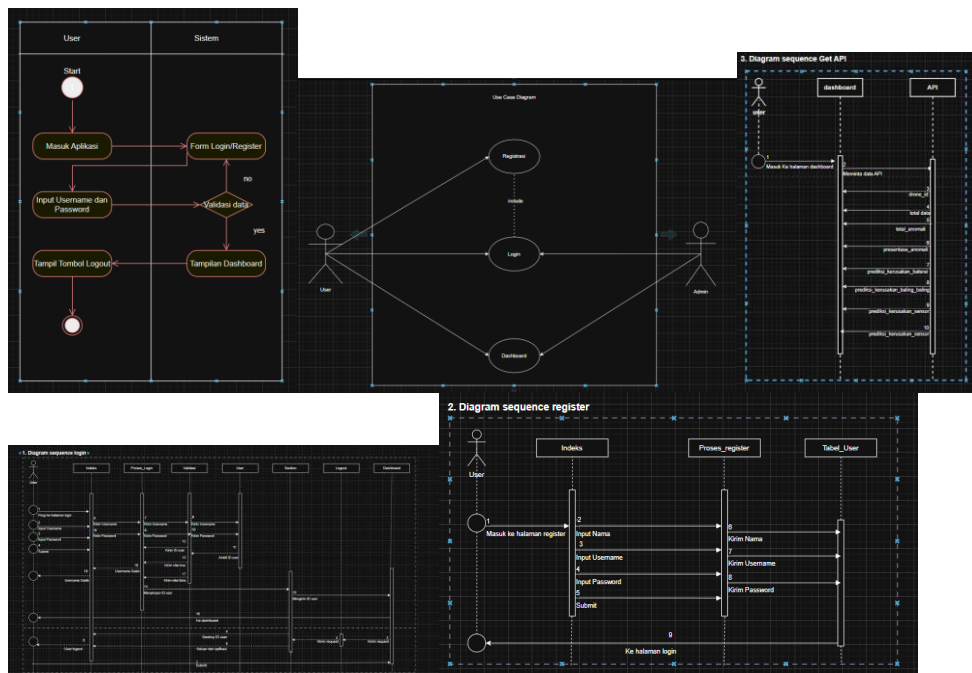
Model Waterfall

Gambar 2. Tahapan Waterfall

1. Analisis Kebutuhan (Requirement Analysis)

Tahap awal dalam metode Waterfall adalah melakukan analisis kebutuhan sistem. Pada tahap ini dilakukan proses pengumpulan, identifikasi, dan pendefinisian kebutuhan sistem secara menyeluruh, baik kebutuhan fungsional maupun non-fungsional. Tujuannya adalah untuk memahami secara mendalam apa saja yang dibutuhkan oleh pengguna atau *stakeholder* terhadap sistem yang akan dikembangkan. Hasil dari tahap ini berupa dokumen spesifikasi kebutuhan sistem (Software Requirement Specification/SRS), yang menjadi acuan utama dalam proses perancangan dan pengembangan pada tahap selanjutnya.

2. Perancangan Sistem (System Design)

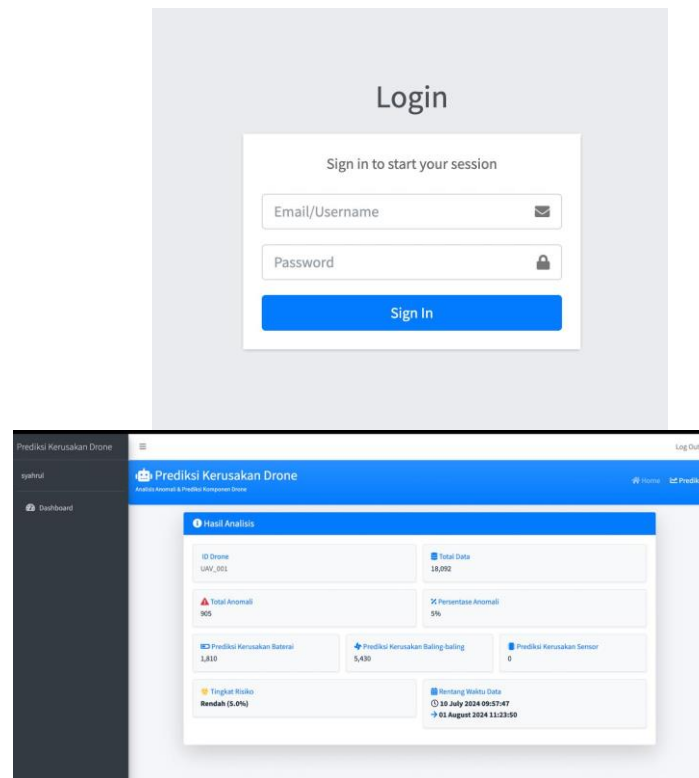


Gambar 3. Perancangan

Tahap ini berfokus pada pembuatan rancangan sistem (system blueprint) berdasarkan kebutuhan yang telah dianalisis sebelumnya. Desain sistem mencakup perancangan arsitektur perangkat lunak, alur data, struktur basis data, antarmuka pengguna, serta hubungan antar komponen sistem. Tujuan utama dari tahap ini adalah menghasilkan rancangan teknis yang detail agar proses implementasi dapat dilakukan secara efektif dan terarah. Hasil dari tahap ini biasanya berupa diagram rancangan, seperti *Use Case Diagram*, *Sequence Diagram*, *Activity Diagram*, *Entity Relationship Diagram (ERD)*, serta rancangan antarmuka (*User Interface/UI*).

3. User Interface dan Visualisasi Data Sensor

Desain antarmuka pengguna berperan penting dalam memastikan sistem prediksi kerusakan UAV mudah digunakan, informatif, dan mendukung pengambilan keputusan cepat. Antarmuka menampilkan visualisasi data sensor melalui grafik dinamis, heatmap, serta indikator warna untuk membedakan kondisi normal dan anomali, misalnya suhu tinggi ditandai warna merah dan getaran stabil dengan warna hijau. Dashboard real-time memungkinkan pemantauan tren parameter penerbangan secara kontinu. Antarmuka berbasis web atau desktop dapat dikembangkan dengan framework seperti Flutter, React, atau PyQt yang mendukung integrasi API dan tampilan responsif. Selain menampilkan hasil analisis, UI juga memungkinkan pelatihan ulang model saat pola data berubah, menjadikannya komponen interaktif dalam sistem prediktif UAV yang adaptif.



Gambar 4. User Interface

4. Pengujian (Testing)

Tahap pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sistem telah berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Pengujian bertujuan untuk menemukan kesalahan (*bugs*) serta mengevaluasi kesesuaian sistem terhadap kebutuhan pengguna. Metode pengujian yang umum digunakan meliputi Black Box Testing (pengujian fungsi tanpa melihat kode) dan White Box Testing (pengujian logika internal sistem). Hasil dari tahap ini berupa laporan pengujian sistem, yang menunjukkan tingkat keandalan, keamanan, serta kinerja sistem yang telah dikembangkan.

5. Pemeliharaan (Maintenance)

Tahap terakhir dalam metode Waterfall adalah pemeliharaan sistem. Setelah sistem selesai dikembangkan dan diimplementasikan, tahap ini berfokus pada kegiatan perbaikan, peningkatan, serta penyesuaian terhadap perubahan kebutuhan atau lingkungan operasional. Pemeliharaan bertujuan agar sistem tetap berfungsi dengan optimal, stabil, dan relevan digunakan dalam jangka panjang. Kegiatan pemeliharaan meliputi perbaikan bug, pembaruan fitur, serta optimasi performa sistem untuk menjamin keberlanjutan penggunaan aplikasi.

IV. HASIL/IMPLEMENTASI MODEL DAN PEMBAHASAN

4.1. DATA UNDERSTANDING

Berdasarkan hasil heatmap korelasi antar fitur sensor, diketahui bahwa sebagian besar variabel memiliki hubungan yang sangat lemah, menandakan independensi antar parameter.

Hanya variabel kecepatan angin dan ketinggian yang menunjukkan korelasi positif moderat sebesar 0.30, sehingga dapat disimpulkan keduanya berpengaruh dalam proses pemodelan data.

2. Data Preprocessing

Modeling data preprocessing bertujuan membersihkan dan menyiapkan data agar siap digunakan dalam proses analisis. Tahap ini mencakup penghapusan data tidak relevan, normalisasi, serta pembentukan target untuk mempermudah sistem dalam mengenali pola dan menghasilkan prediksi yang akurat berdasarkan data yang telah terstruktur dengan baik.

3. Modeling Evaluasi

Berdasarkan hasil evaluasi “Pola Anomali pada Sensor IMU”, distribusi data normal terpusat di sekitar nilai 0 setelah standarisasi, menunjukkan kestabilan sistem. Sementara itu, data anomali muncul di nilai ekstrem yang menyimpang, menandakan keberhasilan model dalam membedakan kondisi normal dan mendeteksi anomali secara efektif.

4. Deployment Stage

Hasil prediksi sistem deteksi anomali pada UAV dengan ID “UAV_001” menunjukkan bahwa dari total 18.092 data sensor penerbangan, terdeteksi 905 anomali atau sebesar 5,0% dari keseluruhan data. Persentase anomali ini mengindikasikan tingkat risiko rendah berdasarkan ambang batas klasifikasi, sehingga UAV masih berada dalam kondisi operasional yang aman. Berdasarkan rincian hasil, terdapat 1.810 anomali yang terindikasi pada sistem baterai dan 5.430 pada baling-baling, sedangkan sensor tidak menunjukkan adanya penyimpangan. Nilai anomali tertinggi pada baling-baling mengisyaratkan adanya potensi ketidakseimbangan mekanis atau getaran abnormal yang perlu dipantau secara preventif untuk menghindari kerusakan lebih lanjut. Secara keseluruhan, hasil ini merepresentasikan kemampuan model deteksi berbasis *unsupervised learning* (seperti algoritma Isolation Forest) dalam mengidentifikasi perilaku data yang menyimpang dari pola normal sebagai indikasi dini potensi kerusakan komponen UAV.

```
1  {  
2    "drone_id": "UAV_001",  
3    "total_data": 18092,  
4    "total_anomali": 905,  
5    "persentase_anomali": 5.0,  
6    "prediksi_kerusakan_baterai": 1810,  
7    "prediksi_kerusakan_baling_baling": 5430,  
8    "prediksi_kerusakan_sensor": 0,  
9    "tingkat_risiko": "Rendah (5.0%)"  
10 }
```

5. Requirements Analyst

Sistem memiliki fungsi login untuk memverifikasi pengguna melalui email dan password, menampilkan dashboard berisi hasil analisis data drone seperti total data, jumlah anomali, tingkat risiko, dan prediksi kerusakan komponen, serta menyediakan menu navigasi untuk akses fitur prediksi, analisis, dan logout secara aman dan terstruktur.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan aplikasi prediksi kerusakan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) menggunakan algoritma *Isolation Forest* berbasis data sensor penerbangan. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa model mampu mendeteksi anomali dengan akurasi tinggi dan kestabilan hasil yang baik. Aplikasi yang dikembangkan dengan metode *Waterfall* ini mendukung pemantauan kondisi UAV secara interaktif dan prediktif, sehingga meningkatkan efisiensi perawatan dan keselamatan penerbangan. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan pengembangan sistem dengan integrasi data sensor real-time, optimasi model menggunakan pendekatan hibrida berbasis *deep learning*, serta perluasan implementasi pada berbagai jenis UAV untuk meningkatkan generalisasi dan kinerja sistem prediksi kerusakan.

REFERENSI

- [1] Y. Lu, Z. Li, J. Xiong, and K. Lv, "Adaptive UAV Navigation Method Based on AHRS," *Sensors*, vol. 24, no. 8, 2024, doi: 10.3390/s24082518.
- [2] P. Balladares *et al.*, "Avances en tecnologías de drones militares," *Rev. Athenea*, vol. 5, no. 18, pp. 7–18, 2024, [Online]. Available: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2737-64192024000400007&lng=es&nrm=iso&tlng=eshttp://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2737-64192024000400007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [3] S. Javaid *et al.*, "Communication and Control in Collaborative UAVs: Recent Advances and Future Trends," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 24, no. 6, pp. 5719–5739, 2023, doi: 10.1109/TITS.2023.3248841.
- [4] M. B. Chapman, "JCSP 50 Service Paper PCEMI n ° 50 Étude militaire," 2024, [Online]. Available: <https://www.cfc.forces.gc.ca/259/290/950/192/Chapman.pdf>
- [5] A. Ferreira, V. Brotas, C. Palma, C. Borges, and A. C. Brito, "Assessing phytoplankton bloom phenology in upwelling-influenced regions using ocean color remote sensing," *Remote Sens.*, vol. 13, no. 4, pp. 1–27, 2021, doi: 10.3390/rs13040675.
- [6] R. Tatoli *et al.*, "Dietary Patterns Associated with Diabetes in an Older Population from Southern Italy Using an Unsupervised Learning Approach," *Sensors*, vol. 22, no. 6, pp. 1–12, 2022, doi: 10.3390/s22062193.
- [7] N. A. University, "System Overview UAV-RT (Unmanned Aerial Vehicle-Radio Telemetry)," Northern Arizona University. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: https://uavrt.nau.edu/index.php/system_overview/
- [8] Meegle, "Drone Flight Data Telemetry," Meegle. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.meegle.com/en_us/topics/autonomous-drones/drone-flight-data-telemetry
- [9] S. Keipour, Azarakhsh; Mousaei, Mohammadreza; Scherer, "ALFA: A Dataset for UAV Fault and Anomaly Detection," 2020. doi: 10.1177/0278364920966642.
- [10] F. Hu, Q. Wang, H. Shao, S. Gao, and H. Yu, "Anomaly Detection of UAV State Data Based on Single-Class Triangular Global Alignment Kernel Extreme Learning Machine," *C. - Comput. Model. Eng. Sci.*, vol. 136, no. 3, pp. 2405–2424, 2023, doi: 10.32604/cmesci.2023.026732.
- [11] S. Zhou, Z. He, X. Chen, and W. Chang, "An Anomaly Detection Method for UAV Based on Wavelet Decomposition and Stacked Denoising Autoencoder," *Aerospace*, vol. 11, no. 5, 2024, doi: 10.3390/aerospace11050393.