

Pemanfaatan *Machine Learning* Untuk Deteksi Dan Klasifikasi Sinyal Frekuensi Radio Penerbangan

Eka Oktavianto¹, Yohanes Suban Belutowe²

¹STIKOM Uyelindo, Indonesia

²STIKOM Uyelindo, Indonesia

^{*}ekaokta1992@gmail.com¹

^{*}yosube@gmail.com²

Alamat: Jl. Perintis Kemerdekaan I, Kayu Putih, Kecamatan Oebobo, Kota Kupang, NTT

Korespondensi penulis: ekaokta1992@gmail.com, yosube@gmail.com

Abstract. The radio frequency spectrum is a finite resource that plays a crucial role in supporting communication systems, particularly in the aviation sector. Unauthorized use and signal interference within this spectrum can pose serious threats to flight safety. This study aims to develop a classification system for aviation radio signals using machine learning algorithms, namely Random Forest and Support Vector Machine. The dataset consists of tabular monitoring data with two main features: frequency and signal power level. The research process includes data preprocessing, model training, validation through K-Fold Cross Validation, and performance evaluation based on accuracy, precision, recall, and F1-score metrics. Testing was carried out under both simulated and real-world conditions using Software Defined Radio (SDR) equipment. Results indicate that the Random Forest model achieved more consistent performance, with an accuracy of 79.77% and balanced F1-scores across both classes. Additionally, the system was found to be user-friendly and responsive, especially for non-technical operators, thanks to its intuitive visual interface. This research contributes to enhancing the effectiveness of aviation spectrum monitoring and offers potential for future integration with real-time detection systems.

Keywords: Machine Learning, Radio Frequency Spectrum, Random Forest, Signal Classification, Support Vector Machine

Abstrak. Spektrum frekuensi radio merupakan sumber daya terbatas yang sangat penting dalam mendukung sistem komunikasi, khususnya di sektor penerbangan. Gangguan pada frekuensi ini, baik karena penggunaan ilegal maupun interferensi, dapat membahayakan keselamatan penerbangan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem klasifikasi sinyal frekuensi radio penerbangan berbasis algoritma machine learning, yaitu Random Forest dan Support Vector Machine. Data yang digunakan berupa rekaman spektrum dalam bentuk tabular dengan dua fitur utama: frekuensi dan level daya sinyal. Proses penelitian meliputi tahap prapemrosesan, pelatihan model, validasi menggunakan K-Fold Cross Validation, dan evaluasi kinerja berdasarkan metrik akurasi, presisi, recall, dan F1-score. Pengujian dilakukan baik secara simulasi maupun lapangan menggunakan perangkat SDR. Hasil menunjukkan bahwa model Random Forest memberikan performa lebih stabil dengan akurasi 79,77% dan F1-score yang seimbang antar kelas. Sistem ini juga dinilai responsif dan mudah digunakan oleh operator non-teknis, berkat antarmuka visual yang intuitif. Temuan ini memberikan kontribusi nyata terhadap efisiensi pengawasan spektrum radio penerbangan dan membuka peluang integrasi lebih lanjut dengan perangkat monitoring real-time.

Kata kunci: Klasifikasi Sinyal, Machine Learning, Random Forest, Spektrum Frekuensi Radio, Support Vector Machine

1. LATAR BELAKANG

Spektrum frekuensi radio merupakan bagian dari sumber daya nasional yang bersifat terbatas dan strategis, karena menjadi tulang punggung sistem komunikasi nirkabel modern, termasuk dalam layanan penerbangan. Gangguan atau

penyalahgunaan frekuensi radio dapat menyebabkan interferensi serius yang mengganggu komunikasi antara pilot dan menara pengawas, serta menimbulkan potensi risiko terhadap keselamatan penerbangan (ICAO, 2023; Kominfo, 2021). Oleh karena itu, pengelolaan dan pengawasan terhadap penggunaan frekuensi tersebut menjadi sangat krusial.

Di Indonesia, pengawasan spektrum radio dilaksanakan oleh Balai Monitor Spektrum Frekuensi Radio sebagai unit pelaksana teknis dari Direktorat Jenderal Sumber Daya dan Perangkat Pos dan Informatika. Namun, proses deteksi pelanggaran frekuensi yang saat ini masih bersifat manual, cenderung tidak efisien dan bergantung pada keahlian teknis individu dalam menginterpretasi data sinyal (Direktorat Jenderal SDPPI, 2020). Terlebih lagi, adanya gangguan lingkungan seperti *noise* dan *fading* menjadikan proses klasifikasi sinyal semakin kompleks dan rentan terhadap kesalahan identifikasi.

Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi kecerdasan buatan, pendekatan berbasis machine learning telah terbukti efektif dalam mengenali pola sinyal dan mengklasifikasikan data numerik yang kompleks. Algoritma seperti Random Forest dan Support Vector Machine dikenal unggul dalam klasifikasi berbasis data tabular dan memiliki toleransi yang baik terhadap fluktuasi data (Breiman, 2001; Cortes & Vapnik, 1995; Azhari & Rachmawati, 2022).

Oleh karena itu, penelitian ini berupaya merancang sistem klasifikasi sinyal frekuensi radio penerbangan berbasis machine learning, dengan memanfaatkan data hasil monitoring dari Balai Monitor Spektrum Frekuensi Radio Kelas I Kupang. Sistem ini diharapkan dapat memberikan solusi praktis dan efisien dalam mendeteksi serta mengidentifikasi sinyal penerbangan secara otomatis, sekaligus mendukung efektivitas pengawasan spektrum secara real-time.

2. KAJIAN TEORITIS

a. Spektrum Frekuensi Radio

Spektrum frekuensi radio adalah bagian dari gelombang elektromagnetik dengan frekuensi di bawah 3.000 GHz yang digunakan untuk mengirimkan dan menerima informasi nirkabel, seperti komunikasi penerbangan, penyiaran, dan layanan navigasi (Kominfo, 2021). Karena sifatnya yang terbatas dan strategis,

spektrum ini memerlukan pengaturan dan pengawasan yang ketat oleh otoritas negara.

Di Indonesia, pengawasan terhadap spektrum frekuensi radio dilakukan oleh Direktorat Jenderal Sumber Daya dan Perangkat Pos dan Informatika (Ditjen SDPPI). Monitoring dilakukan secara periodik melalui stasiun tetap maupun perangkat bergerak, dengan tujuan mengidentifikasi pelanggaran seperti penggunaan tanpa izin, pemanfaatan di luar peruntukan, atau gangguan teknis yang mengancam keselamatan layanan komunikasi (Ditjen SDPPI, 2020). Namun, keterbatasan kapasitas manusia dan tantangan teknis membuat proses klasifikasi sinyal rentan terhadap kesalahan, khususnya dalam kondisi *noise* dan *fading*.

b. Machine Learning dan Klasifikasi Sinyal

Machine learning telah berkembang menjadi metode yang andal dalam mengolah data numerik dan mengenali pola kompleks yang sulit dipetakan secara manual. Pada bidang klasifikasi sinyal, algoritma pembelajaran mesin digunakan untuk mengidentifikasi tipe sinyal berdasarkan fitur-fitur seperti frekuensi, kekuatan sinyal (power level), dan waktu tangkap. Penggunaan model machine learning memungkinkan proses klasifikasi dilakukan secara otomatis dan cepat, bahkan dalam lingkungan sinyal yang dinamis.

Studi oleh Nurhidayat et al. (2020) menunjukkan bahwa data monitoring spektrum dapat diolah secara efektif menggunakan model klasifikasi seperti Naïve Bayes dan Decision Tree untuk mendeteksi sinyal ilegal. Sementara itu, Firmansyah dan Nugroho (2021) mengembangkan pendekatan menggunakan Multi-Layer Perceptron (MLP) untuk klasifikasi kualitas sinyal komunikasi. Hasilnya menunjukkan bahwa model berbasis pembelajaran mesin dapat diterapkan secara praktis pada data monitoring yang bersifat tabular.

c. Random Forest

Random Forest adalah algoritma klasifikasi berbasis ensemble yang menggabungkan sejumlah pohon keputusan (decision trees) yang dilatih secara acak terhadap subset data dan fitur. Hasil klasifikasi akhir ditentukan melalui voting mayoritas dari seluruh pohon dalam model (Breiman, 2001). Kelebihan

utama dari Random Forest terletak pada kemampuannya mengatasi *overfitting* dan sensitivitas terhadap data *noise*.

Dalam konteks pengolahan sinyal, algoritma ini mampu melakukan klasifikasi yang presisi meskipun data hanya terdiri dari dua atau tiga fitur numerik. Penelitian Azhari dan Rachmawati (2022) membuktikan bahwa Random Forest menunjukkan akurasi lebih tinggi dibandingkan Decision Tree dan K-Nearest Neighbor dalam klasifikasi data sensor berbasis numerik. Hal ini menjadikan Random Forest ideal untuk mendeteksi pola sinyal sederhana seperti frekuensi dan daya.

d. Support Vector Machine

Support Vector Machine merupakan algoritma yang mencari hyperplane terbaik untuk memisahkan dua atau lebih kelas data dengan margin maksimum. Jika pemisahan linier tidak memungkinkan, SVM memanfaatkan teknik kernel, seperti Radial Basis Function (RBF), untuk memetakan data ke ruang berdimensi lebih tinggi (Cortes & Vapnik, 1995).

Pamungkas dan Prihandoko (2023) menggunakan SVM untuk mengklasifikasikan sinyal radar dan menemukan bahwa model ini mampu memisahkan data secara presisi, bahkan dalam kondisi distribusi data yang tidak linier. Keunggulan SVM terletak pada kemampuannya dalam bekerja dengan dataset berukuran kecil dan fitur terbatas, yang sesuai dengan kebutuhan klasifikasi sinyal monitoring spektrum.

e. Fading dan Noise

Fading adalah fluktuasi kekuatan sinyal akibat multipath propagation atau perubahan lingkungan fisik. Fenomena ini sering terjadi dalam komunikasi radio dan menyebabkan sinyal yang diterima menjadi lemah atau tidak stabil (Prasetyo, 2024). Salah satu bentuk paling umum adalah Rayleigh Fading, yang terjadi dalam kondisi tanpa jalur langsung (*non-line-of-sight*).

Di sisi lain, *noise* adalah gangguan sinyal yang berasal dari sumber eksternal, seperti interferensi antar kanal atau perangkat elektronik. Noise dapat menyebabkan distorsi sinyal dan menurunkan akurasi deteksi sinyal (Parenreng et al., 2022). Oleh karena itu, model klasifikasi sinyal harus memiliki ketahanan

terhadap kondisi sinyal yang terdegradasi agar tetap dapat berfungsi secara optimal dalam dunia nyata.

3. METODE PENELITIAN

a. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan supervised learning untuk membandingkan performa dua algoritma klasifikasi, yaitu *Random Forest* (RF) dan *Support Vector Machine* (SVM) dalam mengidentifikasi sinyal penerbangan dari data monitoring spektrum frekuensi radio. Fokus utama penelitian adalah mengembangkan sistem deteksi sinyal berbasis machine learning yang dapat mendeteksi sinyal penerbangan sah dan membedakannya dari gangguan atau noise.

b. Sumber dan Bentuk Data

Data diperoleh dari hasil monitoring spektrum frekuensi radio menggunakan perangkat *Software Defined Radio* (RTL-SDR). Sinyal yang ditangkap disimpan dalam format file CSV dengan struktur tabular. Total data yang digunakan sebanyak 1.700 baris, yang terdiri atas dua kolom utama:

- Frequency (MHz)
- Power (dBm)

Setiap entri kemudian diberi label secara manual sebagai *signal* atau *noise* berdasarkan frekuensi legal penerbangan yang mengacu pada regulasi ICAO dan Kementerian Komunikasi dan Informatika (Kominfo, 2021).

c. Aristektur Sistem

Sistem klasifikasi sinyal frekuensi radio yang dikembangkan dalam penelitian ini dirancang untuk mendeteksi dan mengelompokkan sinyal yang berasal dari pemantauan spektrum, khususnya sinyal-sinyal yang digunakan dalam komunikasi penerbangan. Arsitektur sistem ini terdiri atas beberapa tahap yang saling terintegrasi, dimulai dari akuisisi data spektrum menggunakan perangkat lunak dan perangkat keras monitoring, hingga proses klasifikasi berbasis algoritma machine learning serta visualisasi hasil klasifikasi dalam antarmuka pengguna grafis.

Data monitoring sinyal diperoleh melalui perangkat RTL-SDR (*Software Defined Radio*) yang dihubungkan dengan perangkat lunak SDR# (*SDRSharp*).

Sinyal yang tertangkap kemudian disimpan dalam bentuk file *Comma Separated Values* (.csv) yang berisi dua parameter penting, yaitu frekuensi (dalam satuan MHz) dan kekuatan sinyal atau power (dalam dBm). Seluruh proses pengumpulan data dilakukan secara offline di area sekitar Bandara El Tari Kupang. Data yang diperoleh memiliki struktur tabular dan kemudian diolah lebih lanjut dalam sistem.

d. Pra-pemrosesan dan Pelabelan Data

Tahap pra-pemrosesan dilakukan untuk menyiapkan data agar dapat dibaca oleh model machine learning. Dalam tahap ini, sistem melakukan:

- Pembersihan data dari nilai kosong atau tidak logis
- Transformasi nilai ke skala yang sesuai
- Penyesuaian format numerik

Setelah pra-pemrosesan, dilakukan pelabelan manual berdasarkan referensi spektrum frekuensi penerbangan sah, yang merujuk pada ketentuan dari Kementerian Komunikasi dan Informatika dan ICAO. Label diklasifikasikan ke dalam dua kategori:

- Signal: sinyal sah dari sistem komunikasi penerbangan
- Noise: sinyal liar atau interferensi yang bukan bagian dari komunikasi resmi

Pelabelan dilakukan secara teliti dengan membandingkan setiap data frekuensi terhadap standar kanal komunikasi udara VHF dan kanal pemantauan otomatis (ACARS).

e. Pemodelan Machine Learning

Data yang telah diberi label selanjutnya diproses menggunakan dua algoritma klasifikasi, yaitu *Random Forest* dan *Support Vector Machine* (SVM). Pemodelan dilakukan dalam lingkungan pengembangan Python dengan bantuan pustaka seperti *scikit-learn*, *NumPy*, dan *Pandas*. Dataset dibagi secara acak menjadi dua bagian:

- 80% untuk pelatihan (training)
- 20% untuk pengujian (testing)

f. Evaluasi Model

Evaluasi performa model dilakukan menggunakan empat metrik utama:

- Akurasi: proporsi klasifikasi benar dari seluruh data

- Presisi: rasio klasifikasi positif yang benar terhadap total prediksi positif
- Recall: kemampuan model untuk menangkap seluruh kelas positif yang sebenarnya
- F1-Score: rata-rata harmonis antara presisi dan recall

Penggunaan metrik ini bertujuan untuk memberikan gambaran yang menyeluruh terhadap performa klasifikasi masing-masing algoritma, terutama dalam situasi distribusi data yang tidak seimbang.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Hasil Pelatihan dan Evaluasi Model

Setelah data hasil monitoring spektrum selesai melalui proses pra-pemrosesan dan pelabelan, proses pelatihan dilakukan menggunakan dua algoritma klasifikasi, yaitu *Random Forest* (RF) dan *Support Vector Machine* (SVM). Kedua model diuji dengan pembagian data 80% untuk pelatihan dan 20% untuk pengujian, serta validasi silang menggunakan teknik *5-Fold Cross Validation*.

Evaluasi dilakukan menggunakan empat metrik umum klasifikasi: akurasi, presisi, *recall*, dan *F1-score*. Hasil pengujian disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Performa *Random Forest* dan SVM

Metrik	Random Forest	Support Vector Machine
Akurasi	79,77%	73,92%
Presisi	81,22%	70,88%
Recal	77,41%	75,11%
F1-Score	78,98%	72,93%

Sumber: Hasil pelatihan dan pengujian model, 2025

Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa algoritma *Random Forest* memiliki performa lebih tinggi secara keseluruhan dibandingkan dengan SVM, terutama pada nilai presisi dan akurasi. Nilai F1-score yang seimbang menunjukkan kestabilan model dalam mengklasifikasikan sinyal sah maupun noise. Hal ini sesuai dengan karakteristik *Random Forest* yang memiliki toleransi lebih baik terhadap *noise* dan ketidakseimbangan data (Breiman, 2001).

b. Hasil Visualisasi dan Antarmuka Pengguna

Antarmuka pengguna (GUI) merupakan komponen penting dalam sistem klasifikasi sinyal frekuensi radio ini. GUI dirancang untuk menyederhanakan interaksi pengguna, khususnya operator teknis dari Balai Monitor Spektrum Frekuensi Radio, dalam memvisualisasikan hasil klasifikasi sinyal tanpa perlu berinteraksi langsung dengan kode atau proses komputasi di belakangnya.

Tampilan utama GUI menyajikan beberapa elemen kunci, di antaranya:

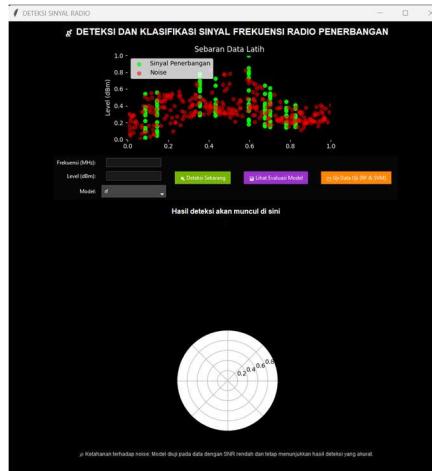
- Sebaran data latih (scatter plot), yang menunjukkan distribusi sinyal berdasarkan frekuensi dan power, dengan label “Sinyal Penerbangan” (warna hijau) dan “Noise” (warna merah) (Gambar 2).
- Form input untuk frekuensi dan power (dalam satuan MHz dan dBm) yang digunakan dalam simulasi deteksi sinyal.
- Tombol interaktif, seperti “Deteksi Sekarang”, “Lihat Evaluasi Model”, dan “Isi Data Uji”.

Saat pengguna memasukkan nilai input frekuensi dan power, sistem secara otomatis akan memproses data menggunakan model klasifikasi yang telah dilatih. Hasil klasifikasi akan ditampilkan secara visual dalam bentuk:

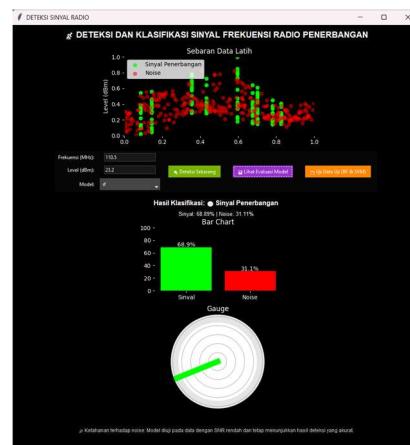
- Bar chart yang memperlihatkan proporsi probabilitas sinyal sah dan noise berdasarkan model.
- Gauge meter yang menandakan keyakinan klasifikasi dengan indikator arah (jarum hijau untuk sinyal, merah untuk noise).
- Teks status klasifikasi yang menyatakan hasil akhir, seperti “Sinyal Penerbangan” atau “Noise/Gangguan”.

Tampilan antarmuka ini ditunjukkan pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5, yang masing-masing menggambarkan hasil klasifikasi dengan berbagai skenario input berbeda.

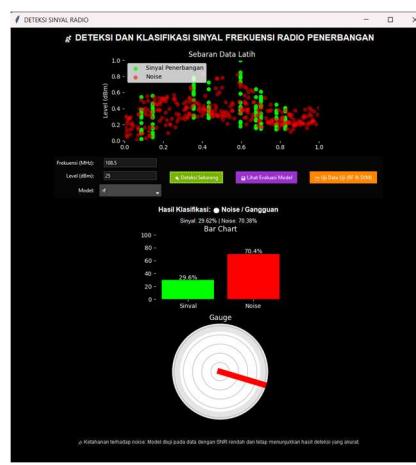
Gambar 2. Tampilan Awal Sistem – Sebaran Data Latih



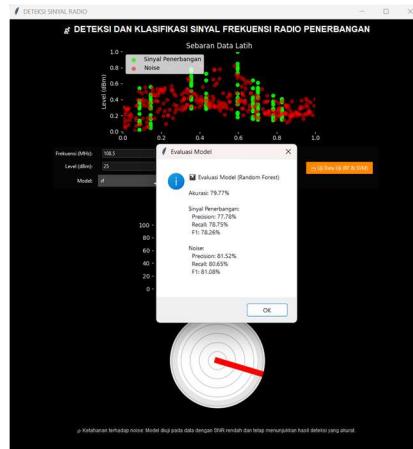
Gambar 3. Hasil Klasifikasi: Sinyal Penerbangan



Gambar 4. Hasil Klasifikasi: Noise / Gangguan



Gambar 5. Evaluasi Model Random Forest



Antarmuka ini mampu memberikan umpan balik secara langsung dan menyeluruh kepada pengguna. Selain itu, dalam pengujian pengguna oleh teknisi Balai Monitor, seluruh responden menyatakan sistem mudah digunakan, informatif, dan sangat membantu dalam proses identifikasi sinyal. Keberadaan visualisasi ini juga menjadikan sistem dapat dioperasikan oleh pengguna non-teknis secara mandiri.

c. Pembahasan dan Keterkaitan dengan Teori

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa algoritma *Random Forest* (RF) memberikan kinerja klasifikasi sinyal spektrum yang lebih stabil dibandingkan *Support Vector Machine* (SVM). Hal ini diperlihatkan melalui skor akurasi sebesar 79,77% dan F1-score sebesar 78,98%, yang menandakan keseimbangan antara presisi dan recall. Performa ini konsisten dengan hasil dari Azhari & Rachmawati (2022) serta Breiman (2001), yang menyatakan bahwa RF unggul dalam menangani data yang mengandung noise serta bekerja baik pada dataset dengan fitur numerik terbatas.

Secara teoritis, keunggulan RF terletak pada pendekatan ensemble-nya yang menggunakan banyak pohon keputusan acak untuk mengurangi risiko overfitting serta meningkatkan generalisasi model. Setiap pohon belajar dari subset data yang berbeda, sehingga hasil klasifikasi menjadi lebih tahan terhadap variasi sinyal dan gangguan frekuensi yang umum ditemukan dalam spektrum komunikasi udara.

Kinerja SVM dalam penelitian ini cenderung lebih lemah pada metrik presisi, meskipun recall cukup kompetitif. Hal ini disebabkan oleh sensitivitas SVM terhadap

distribusi data serta titik batas kelas yang tidak linier. Menurut Cortes & Vapnik (1995), SVM ideal digunakan ketika jumlah fitur tinggi dan data memiliki margin pemisah yang jelas. Namun, pada kasus sinyal komunikasi penerbangan, margin antar kelas cenderung tidak tajam karena adanya gangguan dan fluktuasi daya sinyal akibat fading.

Temuan ini diperkuat oleh hasil studi mutakhir dari Taspinar et al. (2025), yang menunjukkan bahwa *Random Forest* mencapai akurasi klasifikasi tertinggi 96% dibanding SVM dan *Decision Tree* dalam klasifikasi sinyal pada spektrum frekuensi rendah. Penelitian lain oleh Bhaskar et al. (2025) juga menemukan bahwa pada kondisi lingkungan dengan *harmonic noise* dan distorsi sinyal, RF lebih tangguh dibanding SVM, khususnya dalam konteks klasifikasi berbasis dua hingga tiga fitur.

Lebih lanjut, GUI yang dikembangkan dalam penelitian ini mendukung pendekatan *explainable AI*, di mana hasil klasifikasi disajikan dalam bentuk grafik visual dan gauge meter. Ini mendekatkan teknologi machine learning kepada pengguna lapangan, sesuai dengan pendekatan *usable AI* dalam bidang komunikasi dan pengawasan spektrum (Visuña et al., 2025).

d. Implikasi Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil yang diperoleh, sistem klasifikasi berbasis RF memiliki potensi yang tinggi untuk diimplementasikan secara nyata dalam operasional pengawasan spektrum oleh instansi seperti Balai Monitor Spektrum Frekuensi Radio. Sistem ini memungkinkan proses deteksi sinyal dilakukan secara otomatis, cepat, dan tanpa ketergantungan terhadap analisis manual yang sebelumnya memerlukan waktu dan tenaga teknis.

Dengan integrasi GUI, sistem menjadi dapat diakses oleh personel non-programmer, sehingga memperluas potensi penerapan di berbagai daerah kerja yang memiliki keterbatasan sumber daya manusia dalam bidang teknis. Hal ini sejalan dengan hasil uji pengguna di Kupang, di mana antarmuka sistem dinilai responsif dan intuitif.

Implikasi penting lainnya adalah bahwa pendekatan klasifikasi sinyal seperti ini dapat diadaptasi untuk sistem:

- Deteksi sinyal liar atau ilegal di luar pita komunikasi resmi
- Pemantauan spektrum berbasis per wilayah dalam kebijakan regionalisasi frekuensi
- Otomatisasi alarm sinyal berbahaya, seperti sinyal spoofing atau interferensi gelombang

Secara akademik, penelitian ini juga membuka arah baru dalam eksplorasi model *machine learning* ringan untuk data numerik sinyal, tanpa perlu transformasi ke bentuk citra spektrum atau spektrum waktu-frekuensi seperti STFT. Hal ini menurunkan kebutuhan komputasi serta memungkinkan sistem bekerja pada perangkat berspesifikasi menengah ke bawah.

Ke depan, sistem ini dapat ditingkatkan dengan:

- Integrasi modulasi real-time dari SDR
- Penambahan fitur klasifikasi berdasarkan jenis modulasi (AM, FM, PSK)
- Penggunaan metode *hybrid ensemble* seperti Random Forest + XGBoost
- Implementasi pada sistem *edge computing*

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem klasifikasi sinyal frekuensi radio penerbangan berbasis algoritma Random Forest dan Support Vector Machine dapat digunakan untuk mendeteksi sinyal sah dan noise secara otomatis dengan tingkat akurasi yang cukup baik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa Random Forest memberikan performa yang lebih unggul dibandingkan SVM, dengan akurasi 79,77% dan F1-score 78,98%, serta menunjukkan stabilitas klasifikasi yang lebih baik terhadap data yang mengandung noise. Sistem ini telah berhasil menampilkan hasil klasifikasi secara visual melalui antarmuka pengguna grafis yang mudah dipahami dan mendapat tanggapan positif dari teknisi pengguna karena kecepatan dan kemudahan operasionalnya. Meskipun demikian, sistem masih memiliki keterbatasan pada jumlah fitur yang digunakan, yaitu hanya frekuensi dan level daya, serta belum mendukung pemrosesan sinyal secara langsung (real-time), karena masih bergantung pada input data statis dari file CSV.

Berdasarkan hasil yang telah dicapai, sistem ini memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut agar dapat mendukung pembacaan sinyal secara streaming langsung dari perangkat SDR, serta memperluas cakupan fitur klasifikasi seperti jenis

modulasi dan durasi sinyal untuk meningkatkan kemampuan analisis pola-pola sinyal kompleks. Pengujian model juga sebaiknya diperluas ke wilayah geografis berbeda dengan karakteristik spektrum yang bervariasi agar model yang dihasilkan dapat digunakan secara lebih umum dan adaptif. Selain itu, peningkatan performa dapat dicapai dengan menambah jumlah data latih, menerapkan teknik optimasi parameter secara sistematis, dan mempertimbangkan penggunaan algoritma alternatif seperti XGBoost atau deep learning untuk mendeteksi pola sinyal yang tidak linier. Uji pengguna di lapangan dengan beragam latar belakang teknis juga sangat disarankan guna mengevaluasi sejauh mana sistem dapat diandalkan dan digunakan secara praktis dalam pengawasan spektrum frekuensi radio di dunia nyata.

DAFTAR REFERENSI

- Azhari, A., & Rachmawati, A. (2022). Perbandingan Kinerja Algoritma Random Forest dan KNN dalam Klasifikasi Data Sensor. *JINTEK: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 8(2), 130–136. <https://jurnal.ustjogja.ac.id/index.php/jintek/article/view/367>
- Bhaskar, K. B., & Nandagopal, V. (2025). Comparative Analysis of SVM, RF and RL for Harmonic Mitigation. *IEEE Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11042016>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Chen, Z., Cui, H., Xiang, J., Qiu, K., Huang, L., Zheng, S., Chen, S., Xuan, Q., & Yang, X. (2021). SigNet: A Novel Deep Learning Framework for Radio Signal Classification. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2011.03525>
- Cheng, D., Fan, Y., Fang, S., Wang, M., & Liu, H. (2022). ResNet-AE for Radar Signal Anomaly Detection. *Sensors*, 22(6249). <https://doi.org/10.3390/s22166249>
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273–297. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>
- Direktorat Jenderal Infrastruktur Digital. (2024). Penegakan Sanksi untuk Penggunaan Spektrum Frekuensi Radio. *Seputar SDPPI*. <https://sdppi.kominfo.go.id/berita-penegakan-sanksi-untuk-penggunaan-spektrum-frekuensi-radio-27-6167>
- International Civil Aviation Organization. (2023). *ICAO Position for WRC-23*. <https://www.icao.int/Meetings/WRC-23/Pages/default.aspx>
- Kementerian Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Menteri Kominfo No. 7 Tahun 2021 tentang Penggunaan Spektrum Frekuensi Radio*. <https://jdih.kominfo.go.id>
- Nurhayati, W., Sudarmaji, & Siregar, G. Y. K. S. (2023). Implementasi Metode Waterfall pada Sistem Informasi Perpustakaan Online SMK Negeri 1 Seputih Agung. *JIKI (Jurnal Ilmu Komputer dan Informatika)*, 4(2), 196–207. <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/jiki/article/view/3118>

- Pamungkas, B., & Prihandoko, A. (2023). Klasifikasi Sinyal Radar Menggunakan SVM. *Jurnal Teknologi dan Sistem Informasi*, 6(1), 22–30. <https://ejurnal.itenas.ac.id/index.php/JTSI/article/view/2467>
- Parenreng, J. M., Wahid, A., Sanatang, Y., & Yusmalasari, A. (2022). *Pengantar Jaringan Komunikasi Nirkabel*. Purwokerto: Zahira Media Publisher.
- Prasetyo, Y. P. W. (2024). Simulasi Sistem Menggunakan Modulasi Digital 4-QAM, 8-QAM Melalui Kanal Fading. *Rang Teknik Journal*, 7(1), 44–51. <http://jurnal.umsb.ac.id/index.php/RANGTEKNIKJOURNAL>
- Taha, B., & Shoufan, A. (2019). Machine Learning-Based Drone Detection and Classification: State-of-the-Art in Research. *IEEE Access*, 7, 138669–138682. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942944>
- Taspinar, Y. S., & Sen, H. F. (2025). Obesity Prediction Using Machine Learning: RF Outperforms SVM. *IEEE 7th International Conference on Innovation in AI (ICIAI)*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11016848>
- Visuña, L., & Garcia-Blas, J. (2025). Detection of Latent Signals with Explainable RF Ensembles. *IEEE 38th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11058705>
- Wahyuningtyas, V. (2021). Implementasi Ekstraksi Fitur untuk Klasifikasi Suara Urban Menggunakan Deep Learning. *SAKTI – Sains, Aplikasi, Komputasi dan Teknologi Informasi*, 3(1), 10–17. <http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/jsakti/>
- Zalukhu, A., Purba, S., & Darma, D. (2023). Perangkat Lunak Aplikasi Pembelajaran Flowchart. *Jurnal Teknologi Informasi dan Industri*, 4(1), 61–70. <https://ejurnal.istp.ac.id/index.php/jtii/article/view/351>