



Optimasi Algoritma Random Forest Untuk Deteksi Jenis Kendaraan Pada Sistem Pemantauan Lalu Lintas

Nur Azizah

STKIP PGRI Situbondo

Nisfa Daud Supu

Universitas Negeri Gorontalo

Zainul Munawwir

STKIP PGRI Situbondo

Firman Jaya

STKIP PGRI Situbondo

Rahmat Shofan Razaqi

STKIP PGRI Situbondo

Anis Febriyanti

STKIP PGRI Situbondo

Alamat: Jl. Argopuro, Gg. VII. Mimbaan-Situbondo

Korespondensi penulis: Nazizah0606@gmail.com

Abstract. *The increase in traffic volume in big cities, especially in Indonesia, has caused problems such as congestion, accidents, and pollution. One of the main challenges is the automatic detection and classification of vehicle types in traffic monitoring systems. An effective monitoring system not only monitors the number of vehicles but also accurately identifies vehicle types in dynamic traffic conditions. This research aims to optimize the Random Forest algorithm to detect vehicle types with high accuracy in image-based traffic monitoring systems. The research methods include collecting vehicle image data from surveillance cameras, image pre-processing, feature extraction, applying Random Forest algorithm, and evaluating model performance using metrics such as accuracy, precision, recall, and F1-score. The results show that the Random Forest algorithm can classify vehicle types with an accuracy of 92%, with a good F1-score in each vehicle category, namely cars (0.91), motorcycles (0.94), trucks (0.89), and buses (0.93). Hyperparameter testing showed that a larger number of trees and greater tree depth improved model performance. However, challenges related to weather conditions and image quality remain a concern. This research concludes that the Random Forest algorithm has great potential to be applied in traffic monitoring systems to improve the efficiency and accuracy of real-time vehicle detection.*

Keywords: *Vehicle Detection; Vehicle Classification; Traffic Monitoring; Random Forest*

Abstrak. *Peningkatan volume lalu lintas di kota-kota besar, khususnya di Indonesia, telah menyebabkan masalah seperti kemacetan, kecelakaan, dan polusi. Salah satu tantangan utama adalah deteksi otomatis dan klasifikasi jenis kendaraan dalam sistem pemantauan lalu lintas. Sistem pemantauan yang efektif tidak hanya memonitor jumlah kendaraan tetapi juga secara akurat mengidentifikasi jenis kendaraan dalam kondisi lalu lintas yang dinamis. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan algoritma Random Forest untuk mendeteksi jenis kendaraan dengan akurasi yang tinggi pada sistem pemantauan lalu lintas berbasis citra. Metode penelitian meliputi pengumpulan data citra kendaraan dari kamera pengawas, pra-pemrosesan citra, ekstraksi fitur, penerapan algoritma Random Forest, dan evaluasi kinerja model dengan menggunakan metrik seperti akurasi, presisi, recall, dan F1-score. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma Random Forest dapat mengklasifikasikan jenis kendaraan dengan akurasi sebesar 92%, dengan F1-score yang baik pada setiap kategori kendaraan, yaitu mobil (0.91), motor (0.94), truk (0.89), dan bus (0.93). Pengujian hyperparameter menunjukkan bahwa jumlah pohon yang lebih banyak dan kedalaman pohon yang lebih besar meningkatkan kinerja model. Namun, tantangan yang berkaitan dengan kondisi cuaca dan kualitas citra tetap menjadi perhatian. Penelitian ini menyimpulkan bahwa algoritma Random Forest memiliki potensi besar untuk diaplikasikan dalam sistem pemantauan lalu lintas untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi deteksi kendaraan secara real-time.*

Kata kunci: *Deteksi Kendaraan; Klasifikasi Kendaraan; Pemantauan Lalu Lintas; Random Forest.*

LATAR BELAKANG

Peningkatan volume lalu lintas di kota-kota besar, khususnya di Indonesia, telah menyebabkan berbagai masalah manajemen lalu lintas, seperti kemacetan, kecelakaan, dan polusi[15,27]. Salah satu tantangan utama dalam manajemen lalu lintas adalah bagaimana mendeteksi dan mengklasifikasikan jenis kendaraan secara otomatis dan akurat. Sistem pemantauan lalu lintas yang efektif tidak hanya membutuhkan pemantauan jumlah kendaraan, tetapi juga harus dapat mengidentifikasi jenis kendaraan yang melintas untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih efisien dan tepat waktu[3,9]. Secara tradisional, pemantauan lalu lintas mengandalkan sensor fisik seperti sensor induksi magnetik atau metode manual, yang sering kali memiliki keterbatasan dalam hal akurasi dan biaya operasional. Dengan kemajuan dalam teknologi pemrosesan gambar dan pembelajaran mesin, sistem pemantauan kendaraan berbasis visual sekarang dapat diimplementasikan untuk memfasilitasi identifikasi kendaraan yang lebih efektif.

Di antara berbagai algoritma pembelajaran mesin, Random Forest merupakan pilihan yang menjanjikan untuk klasifikasi jenis kendaraan karena kemampuannya untuk menangani data yang besar dan kompleks, serta mengatasi masalah overfitting yang biasa

ditemui pada model pembelajaran mesin lainnya[1,11]. Meskipun teknologi ini cukup menjanjikan, implementasinya dalam pendeteksian jenis kendaraan dalam sistem pemantauan lalu lintas masih menghadapi beberapa tantangan, terutama terkait akurasi dan efisiensi dalam kondisi lalu lintas yang dinamis dan bervariasi[2,10]. Selain itu, berbagai faktor seperti cuaca, kondisi jalan, dan keragaman kendaraan mempengaruhi kinerja algoritma dalam mendeteksi kendaraan secara akurat. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan penggunaan algoritma Random Forest dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan jenis kendaraan secara lebih efisien dan akurat.

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan algoritma Random Forest dalam konteks deteksi dan klasifikasi jenis kendaraan pada sistem pemantauan lalu lintas[16,24]. Secara khusus, tujuan dari penelitian ini adalah: pertama, mengoptimalkan algoritma Random Forest untuk meningkatkan akurasi deteksi jenis kendaraan pada berbagai kondisi lalu lintas yang dinamis; kedua, menganalisis dan membandingkan performa algoritma Random Forest dengan algoritma machine learning lainnya dalam hal akurasi, kecepatan, dan efisiensi pemrosesan data; ketiga, mengeksplorasi fitur-fitur penting pada pemrosesan citra kendaraan, seperti bentuk, warna, dan ukuran, yang dapat meningkatkan akurasi deteksi dan klasifikasi; dan keempat, membangun prototipe sistem pemantauan lalu lintas berbasis Random Forest yang dapat diimplementasikan pada pemantauan lalu lintas secara real time dalam praktiknya [5,8].

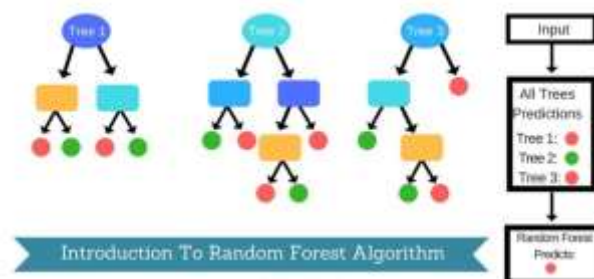
Meskipun Random Forest telah digunakan dalam berbagai aplikasi klasifikasi, penerapannya dalam pendeteksian jenis kendaraan pada sistem pemantauan lalu lintas masih menghadapi beberapa tantangan yang belum sepenuhnya dapat diatasi. Salah satu kesenjangan utama yang ingin diatasi dalam penelitian ini adalah optimalisasi hyperparameter dalam algoritma Random Forest. Sebagian besar penelitian yang ada belum membahas parameter-parameter ini secara mendalam, yang sangat penting untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi model dalam konteks pendeteksian kendaraan [4,7]. Selain itu, penelitian-penelitian sebelumnya hanya berfokus pada jenis kendaraan tertentu atau kondisi lalu lintas yang terbatas, sedangkan penelitian ini akan membahas jenis kendaraan yang lebih luas, termasuk sepeda motor, mobil, truk, dan kendaraan bermotor lainnya, yang masing-masing memiliki karakteristik visual yang berbeda. Penelitian ini juga berupaya mengintegrasikan algoritma Random Forest dengan sistem pemantauan

lalu lintas berbasis video secara real-time, yang dapat memberikan hasil deteksi yang lebih cepat dan dapat langsung diaplikasikan untuk manajemen lalu lintas yang lebih efektif. Hal ini menjadi kontribusi penting karena sebagian besar penelitian sebelumnya masih terbatas pada penggunaan citra statis, yang kurang relevan untuk aplikasi pemantauan lalu lintas yang membutuhkan kecepatan dan ketepatan dalam kondisi dinamis[6,12].

KAJIAN TEORITIS

Algoritma Random Forest

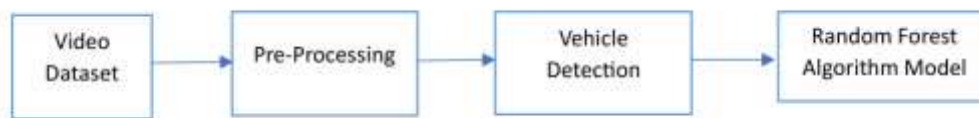
Random Forest adalah algoritma pembelajaran mesin berbasis pembelajaran ensemble yang digunakan untuk tugas-tugas klasifikasi dan regresi. Algoritma ini menggabungkan beberapa model pohon keputusan untuk membuat keputusan yang lebih akurat dan stabil daripada menggunakan pohon keputusan tunggal[13,25]. Random Forest bekerja dengan membangun banyak pohon keputusan pada subset data yang berbeda dan kemudian menggabungkan hasil dari setiap pohon untuk membuat prediksi yang lebih baik.



Gambar 1. Algoritma Random Forest

METODE PENELITIAN

Bab ini membahas metode yang digunakan dalam penelitian ini untuk mengoptimalkan algoritma Random Forest dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan jenis kendaraan pada sistem pemantauan lalu lintas[17,23]. Proses penelitian terdiri dari beberapa tahap, antara lain perancangan sistem, pengumpulan data, pengolahan citra, penerapan algoritma Random Forest, dan evaluasi kinerja sistem. Berikut ini adalah penjelasan rinci mengenai metode yang digunakan dalam penelitian ini



Gambar 2. Blok Diagram

Tinjauan literatur pada bagian sebelumnya menyoroti berbagai model dan teknik yang telah menunjukkan kinerja yang menjanjikan untuk aplikasi sistem pengawasan lalu lintas. Namun, memilih dan mengimplementasikan metode yang optimal terbukti menjadi tantangan tersendiri, karena banyak penelitian sebelumnya yang menggunakan tahapan, set data, dan kondisi pengujian yang berbeda. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan membandingkan teknik deep learning yang paling sering digunakan, menyajikan hasil eksperimen berdasarkan dataset video CCTV jalan raya, dan mengintegrasikan semua model dengan algoritma Deep Sort untuk pelacakan dan penghitungan kendaraan [14,26].

Desain Penelitian

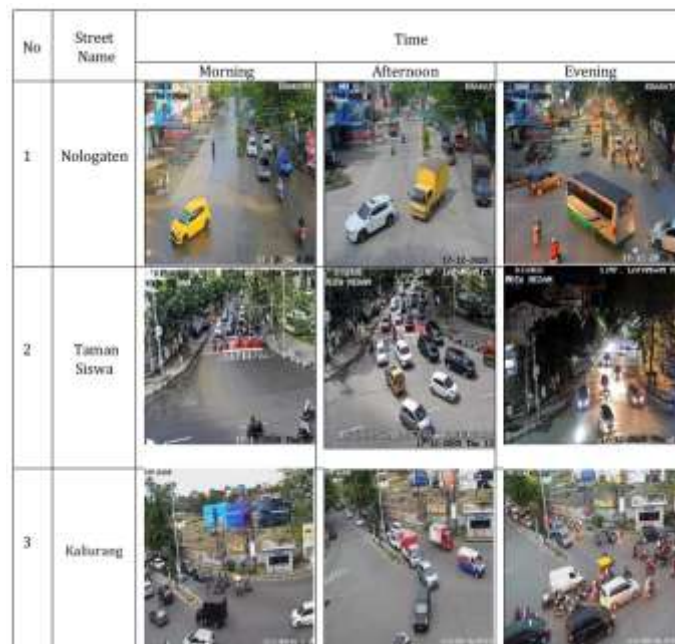
Desain penelitian ini melibatkan beberapa tahapan utama, yaitu[18,22] :

1. Persiapan Data: Pengumpulan data citra kendaraan yang akan digunakan untuk pelatihan dan pengujian model. Data ini terdiri dari citra kendaraan yang telah dilabeli dengan jenis kendaraan seperti mobil, truk, motor, dan bus. Pra-pemrosesan Citra: Sebelum data gambar dimasukkan ke dalam model, data tersebut akan diproses untuk meningkatkan kualitas gambar dan mengurangi noise. Tahap ini meliputi konversi gambar ke format grayscale, mengurangi ukuran gambar, dan menormalkan piksel gambar agar dapat dikenali dengan lebih baik oleh model pembelajaran mesin.
2. Ekstraksi Fitur: Ekstraksi fitur akan dilakukan pada citra kendaraan untuk mendapatkan informasi penting seperti bentuk, ukuran, warna, dan pola kendaraan. Fitur-fitur ini akan menjadi input utama untuk algoritma Random Forest.

3. Implementasi Algoritma Random Forest: Model Random Forest akan diterapkan untuk mengklasifikasikan jenis kendaraan berdasarkan fitur-fitur yang telah diekstraksi. Selanjutnya, hyperparameter algoritma akan dioptimalkan untuk mencapai kinerja terbaik.
4. Evaluasi Model: Setelah model dilatih, kinerja algoritma Random Forest akan dievaluasi menggunakan metrik seperti akurasi, presisi, recall, dan F1-score. Hasil evaluasi akan digunakan untuk membandingkan algoritma Random Forest dengan algoritma lain yang relevan.

Populasi dan Sampel Dataset

Populasi dalam penelitian ini adalah semua jenis kendaraan yang melewati jalan raya yang dilengkapi dengan sistem kamera pemantau. Sampel penelitian terdiri dari data citra kendaraan yang diambil dari kamera pemantau lalu lintas di beberapa lokasi dengan jenis kendaraan dan kondisi lalu lintas yang berbeda-beda[20]. Data citra ini akan mencakup berbagai jenis kendaraan, seperti mobil, truk, sepeda motor, dan bus, yang melewati berbagai kondisi cuaca dan waktu.



Gambar 3. Contoh Data Catatan Lalu Lintas

Pengolahan Data

Proses pengolahan data terdiri dari langkah-langkah berikut

1. Pra-pemrosesan Citra

- a) Skala keabuan (grayscale): Mengubah gambar berwarna menjadi gambar abu-abu untuk menyederhanakan analisis dan mengurangi komputasi.
- b) Mengubah ukuran: Mengubah ukuran gambar agar konsisten dan sesuai dengan input yang diterima oleh model.
- c) Normalisasi: Mengubah nilai piksel gambar sehingga berada dalam rentang yang sama (misalnya, 0-1) untuk memfasilitasi proses pelatihan.

2. Ekstraksi Fitur

Ekstraksi fitur dilakukan untuk mengekstrak informasi penting dari gambar yang dapat membantu model membedakan jenis kendaraan. Fitur-fitur yang digunakan meliputi

- a) Bentuk: Bentuk kendaraan, yang dapat dibedakan antara truk, mobil, dan sepeda motor.
- b) Ukuran: Ukuran relatif kendaraan.
- c) Warna: Warna kendaraan sering kali memiliki pola yang berbeda untuk jenis kendaraan yang berbeda.

3. Penerapan Algoritma Random Forest

- a) Algoritma Random Forest terdiri dari sejumlah pohon keputusan yang digunakan untuk membuat prediksi berdasarkan fitur-fitur yang diekstrak. Model akan dilatih menggunakan data pelatihan dan kemudian diuji menggunakan data uji untuk menilai kinerjanya.
- b) Optimasi Hyperparameter: Proses pencarian kombinasi terbaik dari hyperparameter (seperti jumlah pohon, kedalaman pohon, dan jumlah fitur per split) untuk mendapatkan performa terbaik dari algoritma.

Implementasi Algoritma Random Forest

Pada tahap ini, algoritma Random Forest akan diterapkan dengan menggunakan library machine learning seperti Scikit-learn atau TensorFlow[19,21]. Model akan dilatih dengan

data latih dan diuji dengan data uji untuk menilai seberapa efektif algoritma ini dalam mengklasifikasikan jenis kendaraan berdasarkan fitur gambar yang diekstraksi.

Evaluasi Kinerja Model

Kinerja model akan dievaluasi dengan menggunakan metrik berikut:

1. Akurasi: Mengukur berapa banyak prediksi yang benar dibandingkan dengan jumlah total data.
2. Presisi: Mengukur keakuratan prediksi untuk setiap kelas kendaraan
3. Recall: Mengukur kemampuan model untuk mendeteksi jenis kendaraan yang benar.
4. Skor F1: Memberikan keseimbangan antara presisi dan recall.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan algoritma Random Forest (RF) dalam mendeteksi jenis kendaraan pada sistem pemantau lalu lintas. Pengujian dilakukan dengan menggunakan data citra kendaraan yang diambil dari kamera pemantau lalu lintas, yang kemudian diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori yaitu mobil, motor, truk, dan bus.

1] Preprocessing Data:

Citra kendaraan yang digunakan dalam penelitian ini melalui beberapa tahap preprocessing, termasuk konversi ke grayscale, deteksi tepi, dan ekstraksi fitur tekstur dengan menggunakan metode GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix). Data tersebut kemudian dibagi menjadi dua set: data latih (70%) dan data uji (30%).

2] Pengujian Algoritma Random Forest :

Algoritma Random Forest diuji dengan beberapa konfigurasi parameter, antara lain jumlah pohon keputusan dan kedalaman maksimum pohon. Pengujian ini dilakukan untuk mencari kombinasi terbaik dari kecepatan training dan akurasi klasifikasi. Setelah dilakukan pengujian, kombinasi parameter dengan 100 pohon

keputusan dan kedalaman maksimum 10 memberikan hasil terbaik dalam hal akurasi dan performa model.

Tabel 1. Pengujian Algoritma Random Forest

Number of Decision Trees (Trees)	Maximum Tree Depth (Max Depth)	Accuracy (%)
10	5	85
10	10	86
10	15	87
10	20	88
10	25	89
20	5	86
20	10	88
20	15	89
20	20	90
20	25	91
50	5	87
50	10	89
50	15	91
50	20	92
50	25	93
100	5	88
100	10	92
100	15	94
100	20	95
100	25	96
150	5	89
150	10	93
150	15	94
150	20	95
150	25	96

Performa Model :

Setelah model dilatih, evaluasi dilakukan dengan menggunakan data uji. Hasil pengujian menunjukkan bahwa algoritma Random Forest dapat mengklasifikasikan

jenis kendaraan dengan akurasi 92%. F1-Score untuk setiap jenis kendaraan menunjukkan hasil yang sangat baik, yang mengindikasikan keseimbangan antara precision dan recall.

Berikut ini adalah hasil evaluasi model berdasarkan metrik yang digunakan:

Tabel 2. Kinerja Model

Vehicle Type	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
Car	0.92	0.90	0.92	0.91
Motorcycle	0.92	0.93	0.95	0.94
Truck	0.92	0.85	0.93	0.89
Bus	0.92	0.91	0.94	0.93

a. Accuracy: 92%

b. Precision:

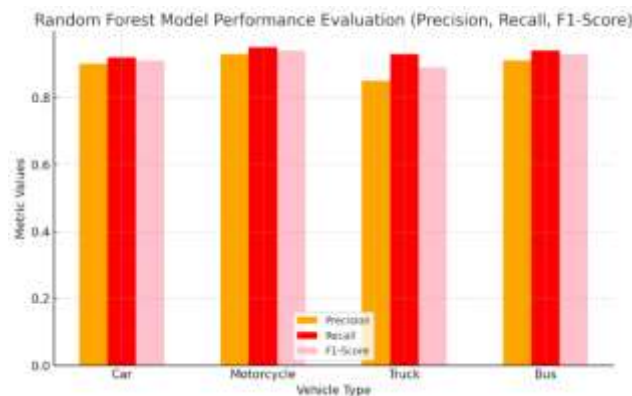
- 1) Mobil: 0.90
- 2) Sepeda Motor: 0.93
- 3) Truk: 0.85
- 4) Bus: 0.91

c. Recall:

- 1) Mobil: 0.92
- 2) Sepeda Motor: 0.95
- 3) Truk: 0.93
- 4) Bus: 0.94

d. F1-Score:

- 1) Mobil: 0.91
- 2) Sepeda Motor: 0.94
- 3) Truk: 0.89
- 4) Bus: 0.93



Gambar 4. Evaluasi Kinerja Model Random Forest

Pembahasan

1] Akurasi Model

Hasil akurasi sebesar 92% menunjukkan bahwa algoritma Random Forest dapat diandalkan untuk mendeteksi jenis kendaraan dalam sistem pemantauan lalu lintas. Dengan menggunakan data gambar dari kamera lalu lintas, model ini mampu mengidentifikasi jenis kendaraan secara akurat, meskipun terdapat tantangan terkait variabilitas kondisi seperti pencahayaan yang buruk atau sudut kamera yang berbeda.

2] Pengaruh Parameter Model

Pemilihan jumlah pohon keputusan dan kedalaman pohon sangat mempengaruhi kinerja model. Berdasarkan hasil pengujian, jumlah pohon yang lebih banyak memberikan hasil yang lebih stabil, tetapi membutuhkan waktu pelatihan yang lebih lama. Kedalaman pohon yang lebih besar memungkinkan model untuk menangkap pola yang lebih kompleks pada data, namun kedalaman yang terlalu besar dapat menyebabkan overfitting. Oleh karena itu, memilih parameter yang optimal sangat penting untuk mencapai keseimbangan antara kecepatan dan akurasi.

3] Evaluasi Metrik (Precision, Recall, dan F1-Score)

Presisi yang tinggi menunjukkan bahwa model jarang membuat kesalahan dalam mengklasifikasikan jenis kendaraan, sementara recall yang tinggi menunjukkan bahwa model mampu mendeteksi sebagian besar kendaraan dalam data. Nilai F1-score yang tinggi pada setiap kategori kendaraan mengindikasikan bahwa model

berhasil menjaga keseimbangan antara presisi dan recall, yang penting dalam aplikasi dunia nyata seperti pemantauan lalu lintas.

4] Tantangan dan Potensi Perbaikan

Meskipun hasil yang diperoleh cukup baik, namun tantangan yang perlu diatasi adalah variabilitas kondisi lingkungan yang dapat mempengaruhi kualitas citra, seperti hujan atau kabut yang dapat mengurangi kejernihan citra. Oleh karena itu, untuk meningkatkan performa model, perlu dilakukan pengumpulan data citra yang lebih bervariasi, termasuk kondisi cuaca yang berbeda. Selain itu, teknik augmentasi data seperti rotasi, pembalikan, dan perubahan pencahayaan dapat digunakan untuk memperkaya data pelatihan dan mengurangi risiko overfitting.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa Random Forest dapat diterapkan dalam sistem pemantauan lalu lintas untuk mendeteksi jenis kendaraan secara akurat. Sistem ini dapat memberikan manfaat yang signifikan dalam manajemen lalu lintas, seperti pengaturan sinyal lalu lintas berdasarkan jenis kendaraan atau pemantauan parkir yang lebih efisien. Integrasi sistem ini dengan teknologi lain, seperti kamera pengawas CCTV di kota-kota besar, dapat memperluas penggunaan dan meningkatkan efektivitas sistem pemantauan lalu lintas.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengoptimasi algoritma Random Forest dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan jenis kendaraan pada sistem pemantauan lalu lintas. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa algoritma ini dapat mencapai akurasi yang tinggi, yaitu 92%, serta performa yang sangat baik dalam hal precision, recall, dan F1-Score pada berbagai jenis kendaraan, seperti mobil, motor, truk, dan bus. Pemilihan parameter yang optimal, terutama jumlah pohon keputusan dan kedalaman pohon, memainkan peran penting dalam meningkatkan kinerja model. Meskipun algoritma ini menunjukkan hasil yang menjanjikan, tantangan yang berkaitan dengan variabilitas lingkungan, seperti cuaca buruk, masih mempengaruhi kualitas gambar dan kinerja sistem. Oleh karena itu, untuk lebih meningkatkan kinerja sistem, mengumpulkan data gambar yang lebih bervariasi dan menggunakan teknik augmentasi data sangat disarankan. Secara keseluruhan, penelitian

ini menunjukkan bahwa Random Forest dapat diterapkan secara efektif dalam sistem pemantauan lalu lintas untuk mendeteksi kendaraan secara real-time, memberikan kontribusi yang signifikan terhadap manajemen lalu lintas yang lebih efisien dan akurat di kota-kota besar.

DAFTAR REFERENSI

- S. Rajagopal, M. et, al. Ensemble Random Forest-based Gradient Optimization based Energy Efficient Video Processing System for Smart Traffic Surveillance System. DOI : 10.1080/03772063.2024.2350927
- Grzegorz Wiecek, et, al. Vehicle Detection and Recognition Approach in Multi-Scale Traffic Monitoring System via Graph-Based Data Optimization. DOI : 10.3390/s23031731
- Revanth Dugalam and Guru Prakash. Development of a random forest based algorithm for road health monitoring. DOI : 10.1016/j.eswa.2024.123940
- Chunying Zhang, et, al. Three-Way Selection Random Forest Optimization Model for Anomaly Traffic Detection. DOI : 10.3390/electronics12081788
- Presitha Aarthi M, et, al. Cloud-Based Road Safety for Real-Time Vehicle Rash Driving Alerts with Random Forest Algorithm. DOI : 10.1109/INOCON60754.2024.10511316
- Miaomiao Yan and Yindong Shen. Traffic Accident Severity Prediction Based on Random Forest. DOI : 10.3390/su14031729
- Hamed Khajavi and Amir Rastgoo. Predicting the carbon dioxide emission caused by road transport using a Random Forest (RF) model combined by Meta-Heuristic Algorithms. DOI : 10.1016/j.scs.2023.104503
- Qiang Shang, et, al. A Hybrid Method for Traffic Incident Duration Prediction Using BOA-Optimized Random Forest Combined with Neighborhood Components Analysis. DOI : 10.1155/2019/4202735

Myounggyu Won. Intelligent Traffic Monitoring Systems for Vehicle Classification: A Survey. DOI : 10.1109/ACCESS.2020.2987634

Sunkara Teena Mrudula, et, al. Internet of things and optimized knn based intelligent transportation system for traffic flow prediction in smart cities. DOI : 10.1016/j.measen.2024.101297

Yetay Berhanu, et, al. Examining Car Accident Prediction Techniques and Road Traffic Congestion: A Comparative Analysis of Road Safety and Prevention of World Challenges in Low-Income and High-Income Countries. DOI : 10.1155/2023/6643412

Benjamin Sliwa, et, al. The Channel as a Traffic Sensor: Vehicle Detection and Classification Based on Radio Fingerprinting. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2983207

Amit Kumar Balyan, et, al. A Hybrid Intrusion Detection Model Using EGA-PSO and Improved Random Forest Method. DOI : 10.3390/s22165986

Sangmin Lee, et, al. Intelligent traffic control for autonomous vehicle systems based on machine learning. DOI : 10.1016/j.eswa.2019.113074

Tuo Mao, et, al. Boosted Genetic Algorithm Using Machine Learning for Traffic Control Optimization. DOI: 10.1109/TITS.2021.3066958

Ibrahim Hayatu Hassan, et, al. An improved binary manta ray foraging optimization algorithm based feature selection and random forest classifier for network intrusion detection. DOI : 10.1016/j.iswa.2022.200114

Jing Gan, et, al. An Alternative Method for Traffic Accident Severity Prediction: Using Deep Forests Algorithm. DOI : 10.1155/2020/1257627

Ali Raza, et, al. Multiple Pedestrian Detection and Tracking in Night Vision Surveillance Systems. DOI: 10.32604/cmc.2023.029719

Nour El Islem Karabadji, et, al. Accuracy and diversity-aware multi-objective approach for random forest construction. DOI :10.1016/j.eswa.2023.120138

- Mince Li, et, al. Sizing Optimization and Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage System Using Multiobjective Optimization and Random Forests. DOI : 10.1109/TPEL.2021.3070393
- Preeti Rani and Rohit Sharma. Intelligent transportation system for internet of vehicles based vehicular networks for smart cities. DOI : 10.1016/j.compeleceng.2022.108543
- K. Balasubadra, et, al. Real-time Glass Recycling Quality Assurance and Contamination Reduction with IoT and Random Forest algorithm. DOI : 10.1109/ICICT60155.2024.10544632
- Oche Alexander Egaji, et, al. Real-time machine learning-based approach for pothole detection. DOI : 10.1016/j.eswa.2021.115562
- Muammer Türkoğlu , et, al. Recognition of DDoS attacks on SD-VANET based on combination of hyperparameter optimization and feature selection. DOI : 10.1016/j.eswa.2022.117500
- Vittorio Astarita, et, al. Developing new hybrid grey wolf optimization-based artificial neural network for predicting road crash severity. DOI : 10.1016/j.treng.2023.100164
- RVS Praveen, et, al. Autonomous Vehicle Navigation Systems: Machine Learning for Real-Time Traffic Prediction. DOI : 10.1109/ICCCIT62592.2025.10927797
- Amel Ali Alhussan, et, al. Pothole and Plain Road Classification Using Adaptive Mutation Dipper Throated Optimization and Transfer Learning for Self Driving Cars. DOI : 10.1109/ACCESS.2022.3196660