

## **Penerapan Algoritma Knn (*K-Nearest Neighbors*) Dalam Penentuan Lampu Lalu Lintas Di Persimpangan Melalui Data Kendaraan Yang Melintas Di Persimpangan Yang Ada Di Kota Medan Untuk Mengurangi Kemacetan**

**Muhammad Devri Kazza Nasution<sup>1\*</sup>, Zuli Agustina Gultom**

<sup>1</sup>Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, Indonesia

| Article Info                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | ABSTRAK                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Article history:</b></p> <p>Received Oktober 5, 2026<br/>Revised Oktober 5, 2026<br/>Accepted Oktober 5, 2026</p> <hr/> <p><b>Keywords:</b></p> <p>K-Nearest Neighbors,<br/>Lampu Lalu Lintas,<br/>Kemacetan,<br/>Persimpangan,<br/>Machine Learning</p> <hr/> <p><b>Keywords:</b></p> <p><i>K-Nearest Neighbors,<br/>Traffic Light,<br/>Traffic Congestion,<br/>Intersection,<br/>Machine Learning</i></p> | <p>Kemacetan pada persimpangan di Kota Medan dipengaruhi oleh volume kendaraan yang tinggi dan pengaturan lampu lalu lintas dengan waktu tetap. Penelitian ini menerapkan algoritma K-Nearest Neighbors (KNN) untuk mengklasifikasikan kondisi lalu lintas dan mendukung penentuan durasi lampu berdasarkan data kendaraan yang melintas. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan data kendaraan dari Dinas Perhubungan Kota Medan dan pengujian sistem berbasis web. Kinerja model dievaluasi menggunakan confusion matrix, accuracy, precision, recall, dan F1-score. Hasil menunjukkan accuracy 94,00% pada kelas merah, 92,67% pada kelas kuning, dan 94,00% pada kelas hijau. Precision masing-masing kelas sebesar 90,20%, 89,00%, dan 91,84%; recall sebesar 92,00%, 89,00%, dan 90,00%; sedangkan F1-score sebesar 91,09%, 89,00%, dan 90,91%. Pengujian fungsional menunjukkan seluruh fitur utama sistem berhasil dijalankan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa KNN dapat digunakan sebagai dasar sistem pendukung keputusan pengaturan lampu lalu lintas yang lebih adaptif.</p> <hr/> <p><b>ABSTRACT</b></p> <p><i>Traffic congestion at intersections in Medan is influenced by high vehicle volumes and fixed-time traffic signal settings. This study applies the K-Nearest Neighbors (KNN) algorithm to classify traffic conditions and support signal-duration decisions based on vehicle-count data. A quantitative approach was used with vehicle data from the Medan Transportation Agency and functional testing of a web-based system. Model performance was evaluated using a confusion matrix, accuracy, precision, recall, and F1-score. The results show accuracy values of 94.00% for the red class, 92.67% for the yellow class, and 94.00% for the green class. Precision values were 90.20%, 89.00%, and 91.84%; recall values were 92.00%, 89.00%, and 90.00%; and F1-scores were 91.09%, 89.00%, and 90.91%, respectively. Functional testing showed that all main system features operated successfully. The results indicate that KNN can be used as the basis for a more adaptive traffic-light decision-support system.</i></p> <hr/> <p style="text-align: right;"><i>This is an open access article under the <a href="#">CC BY</a> license.</i></p> <div style="text-align: right;">  </div> |

***Corresponding Author:***

Muhammad Devri Kazza Nasution  
Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi,  
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan,  
Email: mdevri07@gmail.com

---

## **1. PENDAHULUAN**

Persimpangan merupakan titik pertemuan arus kendaraan dari berbagai arah sehingga pengaturan lampu lalu lintas menjadi bagian penting dalam menjaga kelancaran pergerakan kendaraan. Di Kota Medan, pertumbuhan jumlah kendaraan yang tidak sebanding dengan kapasitas jalan menyebabkan kepadatan tinggi pada sejumlah persimpangan. Sistem lampu lalu lintas yang menggunakan durasi tetap dapat menimbulkan ketidakseimbangan waktu ketika satu arah mengalami antrean tinggi sementara arah lain relatif lengang. Kondisi tersebut meningkatkan waktu tunggu, konsumsi bahan bakar, dan emisi kendaraan.

Berbagai metode machine learning telah digunakan untuk mendukung pengaturan lalu lintas. Decision Tree dapat memanfaatkan jumlah kendaraan pada setiap lajur sebagai dasar pengambilan keputusan status sinyal [1]. Support Vector Machine juga digunakan untuk mempelajari pengaruh panjang siklus lampu lalu lintas terhadap kualitas lalu lintas dan membantu proses penentuan parameter yang sesuai [2]. Pendekatan Extreme Gradient Boosting menunjukkan kemampuan memprediksi perubahan sinyal pada lampu lalu lintas yang bersifat traffic-actuated [3], sedangkan model hibrida LSTM-Random Forest dapat digunakan untuk memprediksi pola kemacetan lalu lintas secara real time [4].

Algoritma K-Nearest Neighbors (KNN) dipilih dalam penelitian ini karena bekerja berdasarkan kemiripan antar data dan dapat digunakan untuk klasifikasi dengan struktur yang relatif sederhana [5]. Pada konteks lalu lintas, KNN dapat mengelompokkan kondisi berdasarkan data historis dan menentukan kelas kondisi lalu lintas dari tetangga terdekat. Penelitian mengenai sistem kontrol lalu lintas juga menunjukkan bahwa KNN dapat dipadukan dengan pendekatan lain untuk merespons kondisi lalu lintas secara cepat [6], sementara kajian tentang KNN menegaskan penggunaan ukuran jarak sebagai dasar penentuan kemiripan data [7].

Pada penelitian ini, data kendaraan yang melintas menjadi dasar pengelompokan kondisi lalu lintas. KNN digunakan untuk mendukung penentuan status atau rekomendasi durasi lampu berdasarkan pola data kendaraan. Pendekatan KNN pada sistem lampu lalu lintas berbasis pengolahan data juga telah digunakan untuk mendukung sistem lalu lintas cerdas [11]. Sistem yang dikembangkan berbasis web agar data kendaraan dapat dimasukkan, diolah, dan ditampilkan kembali dalam bentuk rekomendasi serta tren kondisi lalu lintas.

Tujuan penelitian adalah mengetahui kondisi kepadatan lalu lintas pada persimpangan di Kota Medan berdasarkan data kendaraan yang melintas, menerapkan algoritma KNN dalam penentuan lampu lalu lintas, menilai kinerja klasifikasi, serta menghasilkan rekomendasi pengaturan lampu yang dapat membantu mengurangi kemacetan. Penelitian dibatasi pada beberapa persimpangan di Kota Medan, menggunakan data kendaraan roda dua dan roda empat, serta menghasilkan sistem pendukung keputusan tanpa implementasi langsung pada perangkat keras lampu lalu lintas.

## **2. METODE**

### **2.1. Jenis Penelitian**

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan analisis data numerik berupa jumlah kendaraan, waktu tunggu, panjang antrean, dan volume lalu lintas pada persimpangan. Penelitian juga bersifat terapan karena sistem dirancang untuk memberikan solusi terhadap permasalahan kemacetan

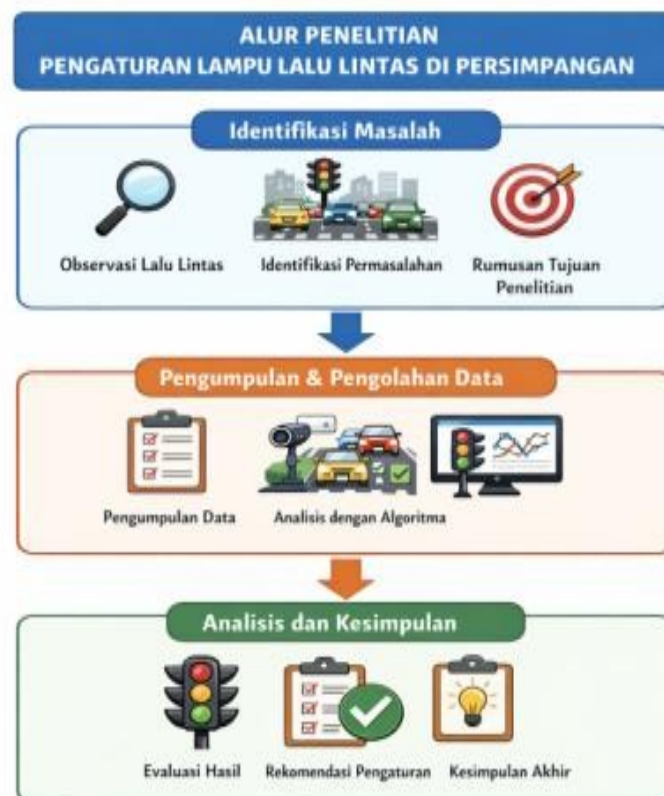
melalui rekomendasi durasi lampu lalu lintas. Data lalu lintas diperoleh dari Dinas Perhubungan Kota Medan dan dilengkapi dengan observasi serta dokumentasi kondisi persimpangan.

Pengembangan sistem dilakukan sebagai aplikasi berbasis web. Lingkungan pengembangan yang digunakan mencakup Visual Studio Code untuk penulisan program, XAMPP sebagai server lokal, MySQL sebagai basis data, serta Python dengan pustaka pengolahan data dan machine learning. Data jumlah mobil dan sepeda motor disimpan dan diolah untuk menghasilkan klasifikasi kondisi lalu lintas dan rekomendasi durasi sinyal.

## 2.2. Alur Penelitian

Alur penelitian terdiri atas identifikasi permasalahan, pengumpulan dan pengolahan data, serta analisis hasil. Tahap identifikasi dilakukan dengan mengamati masalah kepadatan, panjang antrian, dan ketidakseimbangan waktu tunggu pada persimpangan. Data kendaraan kemudian dikumpulkan, disusun menjadi dataset, dan diolah menggunakan KNN. Hasil pengolahan dievaluasi untuk menentukan efektivitas klasifikasi dan rekomendasi pengaturan lampu lalu lintas.

Studi literatur dan studi pustaka dilakukan untuk memahami konsep kemacetan, pengaturan lampu lalu lintas, machine learning, dan metode KNN. Kajian terhadap penelitian sejenis digunakan sebagai pembandingan terhadap pendekatan lain seperti Decision Tree, Random Forest, Support Vector Machine, dan metode berbasis deep learning.



Gambar 1. Alur penelitian

## 2.3. Pengumpulan Data Lalu Lintas

Data penelitian memanfaatkan data kendaraan dari Dinas Perhubungan Kota Medan. Pada lokasi persimpangan Jalan Sutomo tercatat 38.597 kendaraan bermotor dan 33.145 mobil, sehingga total kendaraan mencapai 71.742 dengan kecepatan rata-rata 60 km/jam dan panjang antrian sekitar 8,82 m. Waktu lampu merah pada lokasi tersebut sekitar 3 menit 40 detik dan waktu lampu hijau sekitar 2 menit 30 detik. Pada Jalan Raden Saleh tercatat 47.276 kendaraan bermotor dan 27.203 mobil dengan total

74.479 kendaraan, kecepatan rata-rata 44 km/jam, dan panjang antrean sekitar 7,68 m. Waktu lampu merah sekitar 4 menit 30 detik dan lampu hijau sekitar 3 menit 30 detik.

Tabel 1. Data lalu lintas yang digunakan dalam penelitian

| Lokasi          | Motor  | Mobil  | Total  | Kecepatan | Antrean | Lampu Merah | Lampu Hijau |
|-----------------|--------|--------|--------|-----------|---------|-------------|-------------|
| Jl. Sutomo      | 38.597 | 33.145 | 71.742 | 60 km/jam | 8,82 m  | 3 m 40 d    | 2 m 30 d    |
| Jl. Raden Saleh | 47.276 | 27.203 | 74.479 | 44 km/jam | 7,68 m  | 4 m 30 d    | 3 m 30 d    |

## 2.4. Penerapan K-Nearest Neighbors

KNN merupakan metode supervised learning yang menentukan kelas data baru berdasarkan sejumlah tetangga terdekat pada data pelatihan. Kemiripan antar data dapat dihitung menggunakan ukuran jarak seperti Euclidean. Pada penelitian ini, data jumlah kendaraan menjadi fitur utama untuk membandingkan kondisi lalu lintas saat ini dengan pola pada data sebelumnya. Nilai k menentukan jumlah tetangga yang digunakan dalam proses klasifikasi, kemudian kelas mayoritas menjadi dasar penentuan kondisi lalu lintas.

Dalam penentuan durasi lampu, penelitian juga menggunakan hubungan antara volume kendaraan dan total siklus. Salah satu bentuk perhitungan yang digunakan adalah  $G = (V/(V + V')) \times T$ , dengan V sebagai volume kendaraan pada satu arah, V' sebagai volume kendaraan pada arah berlawanan, dan T sebagai total waktu siklus. Contoh pada dokumen penelitian menggunakan V = 100 kendaraan, V' = 80 kendaraan, dan T = 120 detik sehingga diperoleh durasi lampu hijau sekitar 66,6 detik.

Proses KNN pada sistem dilakukan dengan menerima data kendaraan, melakukan pengolahan data, membandingkan data dengan data pelatihan, menentukan tetangga terdekat, kemudian mengklasifikasikan kondisi lalu lintas. Pendekatan klasifikasi KNN pada sistem lalu lintas cerdas juga telah digunakan untuk mengolah data kendaraan sebagai dasar keputusan sinyal [11].

## 2.5. Evaluasi Kinerja

Evaluasi kinerja model menggunakan confusion matrix yang terdiri atas True Positive (TP), True Negative (TN), False Positive (FP), dan False Negative (FN). Accuracy dihitung dengan  $\text{Accuracy} = (TP + TN)/(TP + TN + FP + FN) \times 100\%$ . Precision dihitung dengan  $\text{Precision} = TP/(TP + FP) \times 100\%$ , recall dihitung dengan  $\text{Recall} = TP/(TP + FN) \times 100\%$ , dan F1-score dihitung sebagai  $2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}/(\text{Precision} + \text{Recall})$ . Precision, recall, dan F1-score digunakan untuk menilai ketepatan serta kemampuan model dalam mendeteksi kelas yang benar [8]–[10]. Metrik sejenis juga digunakan pada sistem manajemen lalu lintas berbasis machine learning untuk menilai hasil klasifikasi [12].

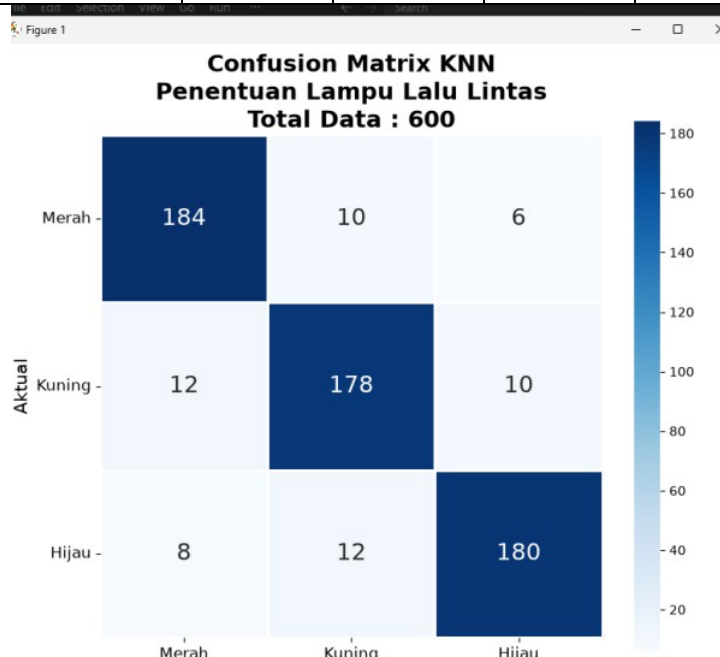
## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Hasil Klasifikasi dan Confusion Matrix

Pengujian KNN menggunakan 600 data yang terbagi merata pada tiga kelas lampu lalu lintas, yaitu merah, kuning, dan hijau, masing-masing sebanyak 200 data aktual. Hasil prediksi menunjukkan bahwa 184 data merah, 178 data kuning, dan 180 data hijau berhasil diklasifikasikan secara benar. Kesalahan klasifikasi terjadi pada perpindahan antarkelas, sebagaimana ditunjukkan oleh confusion matrix.

Tabel 2. Confusion matrix hasil klasifikasi KNN

| Aktual \ Prediksi | Merah | Kuning | Hijau | Total Aktual |
|-------------------|-------|--------|-------|--------------|
| Merah             | 184   | 10     | 6     | 200          |
| Kuning            | 12    | 178    | 10    | 200          |
| Hijau             | 8     | 12     | 180   | 200          |
| Total Prediksi    | 204   | 200    | 196   | 600          |



Gambar 2. Visualisasi confusion matrix KNN

### 3.2. Accuracy, Precision, Recall, dan F1-Score

Berdasarkan confusion matrix, kelas merah memiliki TP 184, TN 380, FP 20, dan FN 16 sehingga menghasilkan accuracy 94,00%. Kelas kuning memiliki TP 178, TN 378, FP 22, dan FN 22 dengan accuracy 92,67%. Kelas hijau memiliki TP 180, TN 384, FP 16, dan FN 20 sehingga accuracy mencapai 94,00%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hasil klasifikasi pada ketiga kelas berada di atas 92%.

Tabel 3. Hasil evaluasi kinerja KNN

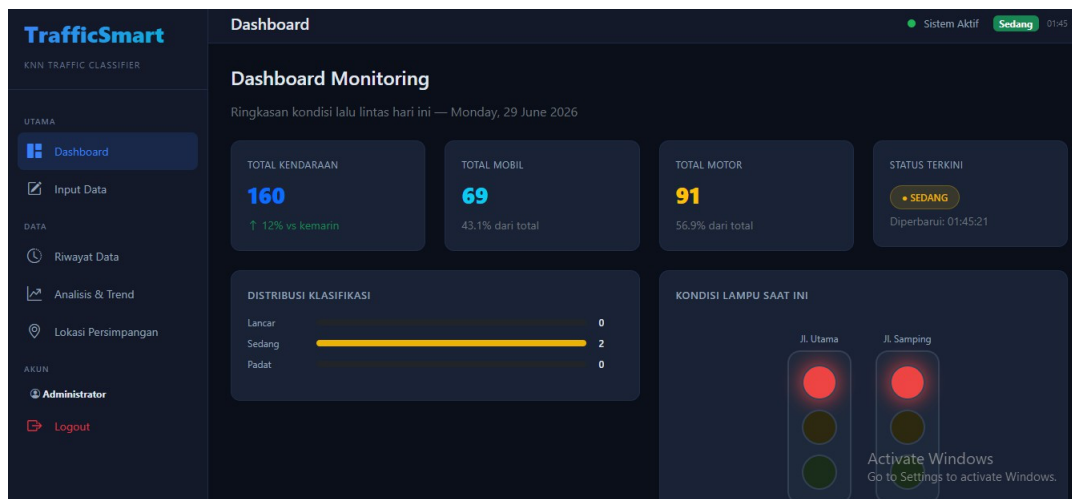
| Kelas  | Accuracy | Precision | Recall | F1-Score |
|--------|----------|-----------|--------|----------|
| Merah  | 94,00%   | 90,20%    | 92,00% | 91,09%   |
| Kuning | 92,67%   | 89,00%    | 89,00% | 89,00%   |
| Hijau  | 94,00%   | 91,84%    | 90,00% | 90,91%   |

Precision tertinggi diperoleh pada kelas hijau sebesar 91,84%, sedangkan recall tertinggi terdapat pada kelas merah sebesar 92,00%. F1-score pada kelas merah mencapai 91,09%, kelas kuning 89,00%, dan kelas hijau 90,91%. Hasil ini memperlihatkan bahwa model mampu menjaga keseimbangan antara ketepatan prediksi dan kemampuan mengenali data yang termasuk dalam masing-masing kelas. Penggunaan confusion matrix dan metrik accuracy, precision, recall, serta F1-score sejalan dengan evaluasi klasifikasi yang digunakan pada penelitian deteksi lampu lalu lintas [8]–[10].

### 3.3. Implementasi dan Pengujian Sistem

Sistem TrafficSmart diimplementasikan dalam bentuk aplikasi berbasis web. Antarmuka dirancang agar pengguna, khususnya petugas Dinas Perhubungan, dapat memasukkan data kendaraan dan memperoleh hasil pengolahan secara sederhana. Sistem menyediakan halaman login, dashboard, input data kendaraan, analisis dan tren lalu lintas, riwayat data, serta lokasi persimpangan.

Pada halaman input data kendaraan, pengguna memasukkan lokasi persimpangan, jumlah mobil, jumlah sepeda motor, dan waktu pengamatan. Data tersebut disimpan dan diproses untuk menghasilkan informasi kondisi lalu lintas. Halaman analisis menampilkan tren kondisi jalan, sedangkan halaman lokasi persimpangan digunakan untuk melihat data lokasi yang dapat dianalisis oleh sistem.



Gambar 3. Implementasi dashboard sistem TrafficSmart

Pengujian fungsional dilakukan dengan memeriksa fitur utama dari proses login, input data kendaraan, dashboard, riwayat data, analisis tren, hingga lokasi persimpangan. Hasil pengujian pada dokumen penelitian menunjukkan seluruh skenario yang diuji berstatus berhasil. Sistem juga mampu menangani kondisi input tidak lengkap atau tidak valid dengan menampilkan pesan kesalahan sesuai proses yang dirancang.

Tabel 4. Hasil pengujian fungsional sistem

| No | Fitur yang Diuji     | Skenario Pengujian                                | Hasil    |
|----|----------------------|---------------------------------------------------|----------|
| 1  | Username             | Username terdaftar/valid                          | Berhasil |
| 2  | Password             | Password terdaftar/valid                          | Berhasil |
| 3  | Dashboard            | Menampilkan total kendaraan yang diinput          | Berhasil |
| 4  | Input data kendaraan | Memasukkan lokasi, jumlah mobil, dan jumlah motor | Berhasil |
| 5  | Riwayat data         | Menampilkan data yang telah dimasukkan            | Berhasil |
| 6  | Analisis & tren      | Menganalisis data yang telah masuk                | Berhasil |
| 7  | Lokasi persimpangan  | Menampilkan data lokasi persimpangan              | Berhasil |

Sistem memiliki beberapa kelebihan, yaitu dapat memberikan rekomendasi durasi lampu berdasarkan jumlah kendaraan, menyediakan antarmuka yang sederhana, menyimpan data berdasarkan lokasi dan waktu pengamatan, serta menampilkan analisis kondisi lalu lintas. KNN digunakan karena

proses klasifikasinya sederhana dan dapat membandingkan data baru dengan data historis. Namun, data kendaraan masih dimasukkan secara manual, parameter yang digunakan terutama jumlah mobil dan motor, dan sistem belum terintegrasi langsung dengan perangkat lampu lalu lintas. Pengembangan berikutnya memerlukan integrasi sensor atau CCTV serta penambahan parameter seperti kecepatan, panjang antrian, cuaca, dan kendaraan prioritas.

#### **4. KESIMPULAN**

Penelitian berhasil merancang dan membangun sistem berbasis web untuk membantu menentukan durasi lampu lalu lintas berdasarkan jumlah kendaraan yang melintas dengan menggunakan algoritma K-Nearest Neighbors. Sistem mampu mengolah data jumlah mobil dan sepeda motor sebagai dasar klasifikasi kondisi lalu lintas dan penyusunan rekomendasi pengaturan lampu.

Hasil evaluasi menunjukkan accuracy sebesar 94,00% untuk kelas merah, 92,67% untuk kelas kuning, dan 94,00% untuk kelas hijau. Nilai precision berada pada rentang 89,00%–91,84%, recall 89,00%–92,00%, dan F1-score 89,00%–91,09%. Seluruh fitur utama aplikasi yang diuji juga berstatus berhasil. Dengan hasil tersebut, sistem dapat digunakan sebagai pendukung analisis kondisi lalu lintas dan rekomendasi pengaturan lampu yang lebih adaptif pada persimpangan.

Sistem masih memiliki keterbatasan karena data dimasukkan secara manual dan belum terhubung langsung dengan perangkat traffic light. Pengembangan selanjutnya dapat mengintegrasikan CCTV atau sensor, menambahkan parameter panjang antrian, kecepatan, cuaca, dan kendaraan prioritas, serta menghubungkan sistem dengan perangkat lampu lalu lintas untuk mendukung penerapan Intelligent Transportation System.

#### **REFERENSI**

- [1] R. R. N. Rithesh, R. Vignesh, and M. R. Anala, "Autonomous Traffic Signal Control using Decision Tree," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 1522–1529, Jun. 2018, doi: 10.11591/ijece.v8i3.pp1522-1529.
- [2] A. Całuch, A. Cieřlikowski, and M. Plechawska-Wójcik, "Application of support vector machine in a traffic lights control," *Journal of Computer Sciences Institute*, vol. 14, pp. 37–42, 2020, doi: 10.35784/jcsi.1573.
- [3] K. Heckmann, J. Budde, L. E. Schneegans, and R. Hoyer, "Predicting the Future Signalization of Traffic-Actuated Signals Using Extreme Gradient Boosting," *Transportation Research Record*, vol. 2679, no. 2, pp. 2063–2083, Feb. 2025, doi: 10.1177/03611981241277750.
- [4] O. Khatlab, B. Saravana Balaji, F. Alghadhoori, F. AlMazyad, M. AlDousari, A. Al-Ameeri, and M. O. Al-Kadri, "Real time urban traffic prediction using RFID and a hybrid LSTM random forest model," *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 43722, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-27485-w.
- [5] R. S. A. Daulay, "Analisis Kritis dan Pengembangan Algoritma K-Nearest Neighbor (KNN): Sebuah Tinjauan Literatur," *Jurnal Pendidikan Sains dan Komputer*, vol. 4, no. 2, pp. 131–141, 2024, doi: 10.47709/jpsk.v4i02.5055.
- [6] E. J. Dhulkefl, A. W. Abdulsattar, Z. M. Khudhur, and T. A. Mahmood, "Design of a Hybrid Intelligent Traffic Signal Control System Using Nearest Neighbor Algorithm and Deep Reinforcement Learning with SUMO Simulator," *Journal of Research in Engineering and Computer Sciences*, vol. 3, no. 3, pp. 31–40, 2025, doi: 10.63002/jrecs.303.983.
- [7] G. Vijaya Lakshmi, "A Review on K nearest Neighbour Classification Technique in Machine Learning," *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 257–260, Feb. 2025, doi: 10.32628/IJSRSET25121168.
- [8] R. Ayachi, M. Afif, Y. Said, M. Atri, and A. Ben Abdelali, "Integrating Recurrent Neural Networks with Convolutional Neural Networks for Enhanced Traffic Light Detection and Tracking," *Traitement du Signal*, vol. 40, no. 6, pp. 2577–2586, Dec. 2023, doi: 10.18280/ts.400620.

- [9] C.-H. Chuang, C.-C. Lee, J.-H. Lo, and K.-C. Fan, "Traffic Light Detection by Integrating Feature Fusion and Attention Mechanism," *Electronics*, vol. 12, no. 17, Art. no. 3727, Sep. 2023, doi: 10.3390/electronics12173727.
- [10] F. Yagob and J. Z. Sasiadek, "Enhanced Real-Time Method Traffic Light Signal Color Recognition Using Advanced Convolutional Neural Network Techniques," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 16, no. 8, Art. no. 441, Aug. 2025, doi: 10.3390/wevj16080441.
- [11] A. Yusefi, A. A. Altun, and C. Sungur, "Data Mining in A Smart Traffic Light Control System Based on Image Processing and KNN Classification Algorithm," *European Journal of Science and Technology*, Special Issue, pp. 461–465, 2020, doi: 10.31590/ejosat.819762.
- [12] M. K. Pasha, A. R. Atmadja, and M. D. Firdaus, "Intelligent Traffic Management System Using Mask Regions-Convolutional Neural Network," *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*, vol. 10, no. 3, pp. 329–338, Aug. 2025, doi: 10.22219/kinetik.v10i3.2233.