

Simulasi dan Analisis Perbandingan Kinerja Sistem Lalu Lintas untuk Kendaraan Ambulans Darurat

Muhammad Hariz Izzuddin¹, Wahyu Nur Hidayat², Arifah Shafyan³, Ryoza Kiyohara⁴, Dian Septiani Santoso⁵

Politeknik Elektronika Negeri Surabaya¹²³⁵, 4Kanagawa Institute of Technology⁴

Corresponding Author Muhammad Hariz Izzuddin, E-Mail: harizizzuddin12@it.student.pens.ac.id

Published: June, 2025

ABSTRACT

Keterlambatan kendaraan darurat (EV), seperti ambulans, di persimpangan perkotaan yang padat lalu lintas merupakan masalah kritis yang dapat membahayakan nyawa manusia. Sistem lampu lalu lintas waktu tetap konvensional sering kali gagal dalam memprioritaskan kendaraan darurat secara efektif. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan dan menganalisis secara komparatif kinerja tiga skenario sistem lalu lintas untuk mengoptimalkan waktu perjalanan ambulans: (1) skenario tanpa lampu lalu lintas, (2) skenario dengan lampu lalu lintas statis, dan (3) skenario dengan lampu lalu lintas adaptif real-time. Simulasi dilakukan menggunakan platform simulasi lalu lintas mikroskopik SUMO (Simulation of Urban Mobility), dengan studi kasus yang dimodelkan berdasarkan kondisi lalu lintas tinggi di kawasan Keputih, Surabaya untuk menunjukkan aplikasi praktis. Kontrol adaptif diterapkan melalui skrip Python menggunakan Traffic Control Interface (TraCI) dari SUMO, yang secara dinamis mengubah fase sinyal setelah mendeteksi ambulans yang mendekat. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario lampu lalu lintas adaptif secara signifikan mengurangi waktu perjalanan ambulans dan keterlambatan dibandingkan dengan dua skenario lainnya, membuktikan potensinya sebagai solusi efektif untuk meningkatkan efisiensi respon darurat di lingkungan perkotaan.

Keywords: Kendaraan Darurat, Simulasi Lalu Lintas, SUMO, Kontrol Lalu Lintas Adaptif, Ambulans, TraCI.

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

PENDAHULUAN

In Dalam kedokteran darurat, interval antara terjadinya insiden kritis dan pemberian perawatan definitif adalah perlombaan hidup dan mati yang sangat bergantung pada waktu. Konsep "jam emas" menekankan urgensi ini, yang menyatakan bahwa peluang kelangsungan hidup pasien trauma paling tinggi jika mereka menerima intervensi medis dalam enam puluh menit pertama. Untuk kondisi seperti henti jantung, jendela waktu ini bahkan lebih sempit, dengan tingkat kelangsungan hidup yang menurun 7-10% untuk setiap menit yang berlalu tanpa pengobatan (Habibi et al., 2021). Di dalam kerangka waktu yang kritis inilah Kendaraan Darurat (EV) beroperasi, berfungsi sebagai mata rantai pertama yang sangat penting dalam rangkaian keselamatan (Qin & Khan, 2012).

Namun, efisiensi layanan penyelamatan nyawa ini semakin terhambat oleh sebuah penyakit perkotaan modern: kemacetan lalu lintas. Seiring dengan berkembangnya kota-kota, kemacetan yang terjadi di jalan-jalan utama langsung menghalangi misi responden darurat. Sebuah ambulans yang terjebak dalam kemacetan mewakili titik kegagalan yang katastrofik dalam sistem kesehatan, di mana keahlian medis menjadi tidak berdaya karena kelumpuhan logistik. Tantangan ini sangat dirasakan di pusat-pusat

perkotaan padat penduduk seperti Surabaya, Indonesia. Di distrik Keputih, sebuah daerah padat yang memiliki arteri utama yang melayani lebih dari 132.410 sepeda motor dan 55.230 mobil setiap hari, respon darurat sangat terhambat. Data dari Palang Merah Indonesia mengungkapkan bahwa EV menghadapi keterlambatan hingga lima menit di persimpangan yang dilengkapi lampu lalu lintas, sementara Dinas Kesehatan Surabaya melaporkan pada tahun 2024 bahwa sebanyak 60% kasus darurat mengalami keterlambatan transportasi akibat kemacetan (Chowdhury, 2003).

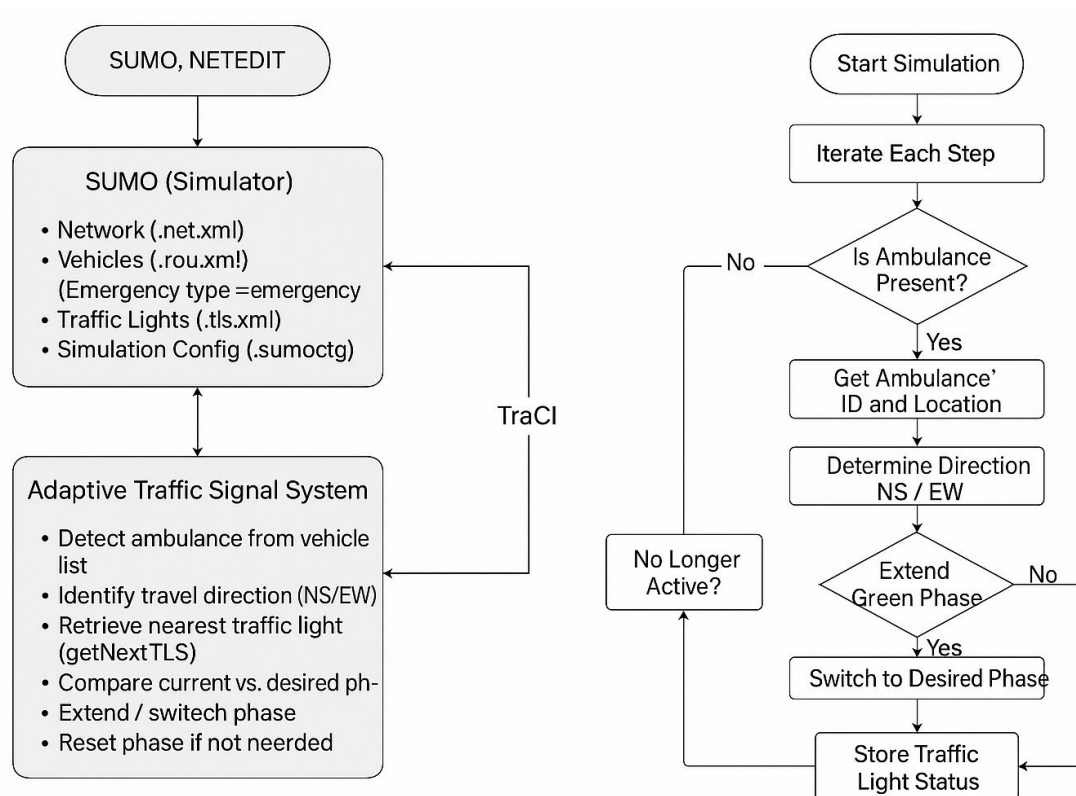
Meskipun EV secara hukum diberikan hak prioritas khusus, seperti mengabaikan lampu merah, kenyataannya persimpangan yang tidak bisa dilalui akibat kemacetan sering kali membatalkan keuntungan ini. Sistem sinyal lalu lintas konvensional yang telah ditetapkan sebelumnya, yang berputar melalui fase-fase dengan jadwal tetap, pada dasarnya tidak dapat menangani sifat dinamis dan tak terduga dari lalu lintas perkotaan, apalagi memprioritaskan EV yang mendekat. Ketidakfleksibelan sistem ini memerlukan perubahan paradigma menuju sistem kontrol cerdas dan adaptif.

Penelitian terbaru telah membuat kemajuan signifikan di bidang ini. Metodologi seperti pengontrol logika fuzzy telah dikembangkan untuk menyesuaikan waktu sinyal secara dinamis berdasarkan kepadatan lalu lintas dan kehadiran EV secara real-time, menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan sistem tradisional (Agrawal & Paulus, 2021). Secara bersamaan, penggunaan komunikasi Vehicle-to-Infrastructure (V2X) sedang dieksplorasi untuk memungkinkan EV secara proaktif meminta izin hijau dari sinyal lalu lintas (Van Langevelde & Jaarsma, 2005). Untuk mengevaluasi strategi canggih ini secara ketat tanpa uji coba fisik yang mahal dan mengganggu, platform simulasi lalu lintas mikroskopik seperti SUMO (Simulation of Urban Mobility) telah menjadi alat yang sangat penting bagi para peneliti dan perencana lalu lintas (Soni & Weronek, 2023).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan lingkungan simulasi tersebut untuk menganalisis secara komparatif kinerja dari tiga skenario sistem lalu lintas yang berbeda: (1) skenario dasar tanpa pengaturan sinyal, (2) sistem sinyal statis (pre-timed) konvensional, dan (3) sistem sinyal adaptif baru yang didasarkan pada deteksi ambulans secara real-time. Dengan memodelkan skenario kami pada tantangan lalu lintas spesifik yang diamati di Keputih, Surabaya, makalah ini bertujuan untuk memberikan analisis kuantitatif mengenai strategi yang paling efektif untuk mempercepat waktu perjalanan ambulans, sehingga meningkatkan ketahanan dan efisiensi layanan respon darurat perkotaan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi mikroskopik untuk secara kuantitatif mengevaluasi dampak dari berbagai strategi manajemen lalu lintas terhadap kinerja kendaraan darurat. Bagian ini menjelaskan lingkungan simulasi, pengaturan studi kasus, desain skenario, dan metrik kinerja yang digunakan.



Gambar 1. Alur Kerja sistem

Gambar di atas menunjukkan alur kerja dari sistem lampu lalu lintas adaptif yang digunakan dalam penelitian ini. Proses dimulai dengan simulasi menggunakan platform SUMO, diikuti dengan identifikasi ambulans dalam daftar kendaraan yang sedang bergerak di jaringan. Setelah ambulans terdeteksi, sistem menentukan arah perjalanan (utara-selatan atau timur-barat), lalu mengakses lampu lalu lintas terdekat. Berdasarkan fase lampu yang sedang aktif, sistem membandingkan dengan fase yang diinginkan untuk ambulans dan menyesuaikan lampu lalu lintas dengan memperpanjang fase hijau atau mengubah fase secara dinamis. Proses ini terus berlanjut hingga ambulans berhasil melewati persimpangan dan sistem kembali ke pengaturan normal.

Lingkungan Simulasi

Simulasi dalam penelitian ini dilakukan menggunakan SUMO (Simulation of Urban Mobility), sebuah platform simulasi lalu lintas mikroskopik dan multi-modal yang bersifat open-source. SUMO dipilih karena kemampuannya untuk memodelkan kendaraan individu, mereplikasi jaringan jalan yang kompleks, dan memungkinkan implementasi logika kontrol lalu lintas real-time kustom melalui Traffic Control Interface (TraCI). Antarmuka TraCI memungkinkan skrip eksternal, dalam hal ini yang ditulis dalam bahasa Python, untuk memanipulasi dan mengambil data dari objek-objek dalam simulasi yang sedang berjalan.

Kasus dan Pengaturan Jaringan

Untuk memberikan konteks dunia nyata bagi simulasi, sebuah studi kasus dikembangkan berdasarkan kondisi lalu lintas di area Keputih, Surabaya, Indonesia. Area ini dipilih karena mewakili lingkungan perkotaan padat dengan volume lalu lintas yang tinggi, di mana ambulans sering mengalami keterlambatan yang signifikan. Jaringan jalan yang disimulasikan mencakup lima persimpangan utama di sepanjang koridor jalan arteri. Jaringan ini dibangun dengan mengimpor data dari OpenStreetMap (OSM) dan kemudian disempurnakan menggunakan editor jaringan SUMO (NETEDIT) untuk memastikan kesesuaian dengan geometri dan peraturan dunia nyata, yang merupakan praktik standar dalam pemodelan lalu lintas.

Permintaan lalu lintas dalam simulasi dikalibrasi berdasarkan data volume lalu lintas harian yang diamati dari area tersebut, yaitu sekitar 132.410 sepeda motor dan 55.230 mobil pribadi per hari. Data ini digunakan untuk menghasilkan aliran kendaraan yang realistis di seluruh jaringan selama periode simulasi.

Desain Skenario Simulasi

Tiga skenario yang berbeda dirancang untuk analisis komparatif:

1. Skenario 1: Tanpa Lampu Lalu Lintas (Dasar Tidak Terkontrol): Dalam skenario ini, semua lampu lalu lintas dimatikan. Kendaraan melintasi persimpangan tanpa pengaturan sinyal. Skenario ini berfungsi sebagai dasar untuk menunjukkan kondisi lalu lintas yang kacau dan potensi tinggi terjadinya konflik di absence pengaturan.
2. Skenario 2: Lampu Lalu Lintas Statis (Sistem Konvensional): Skenario ini mewakili sistem manajemen lalu lintas umum di mana lampu lalu lintas beroperasi dengan siklus, durasi, dan urutan fase yang sudah ditentukan sebelumnya. Sistem ini tidak dapat menyesuaikan diri dengan kondisi lalu lintas yang sebenarnya atau memberikan prioritas kepada kendaraan darurat.
3. Skenario 3: Lampu Lalu Lintas Adaptif (Sistem yang Diusulkan): Skenario ini mengimplementasikan sistem kontrol sinyal adaptif yang cerdas dan real-time untuk memprioritaskan ambulans. Sistem ini direalisasikan melalui skrip Python yang berinteraksi dengan SUMO melalui TraCI. Logika kontrolnya adalah sebagai berikut:
 - Pada setiap langkah simulasi, skrip secara aktif mendeteksi keberadaan kendaraan dengan jenis "darurat".
 - Ketika ambulans terdeteksi, skrip mengidentifikasi lampu lalu lintas berikutnya yang akan dilewati dengan menggunakan fungsi `traci.vehicle.getNextTSL`.
 - Berdasarkan arah perjalanan ambulans (misalnya, Utara-Selatan atau Timur-Barat), skrip menentukan fase hijau yang diinginkan dari pemetaan yang sudah ditentukan sebelumnya.

- Jika fase sinyal saat ini tidak sesuai dengan fase hijau yang diinginkan, skrip secara paksa mempersingkat durasi fase saat ini menjadi nilai minimal (0,1 detik), menyebabkan sistem sinyal mempercepat siklusnya hingga fase hijau yang dibutuhkan untuk ambulans diaktifkan.
- Jika lampu sudah berada pada fase hijau yang benar, durasinya diperpanjang untuk memastikan ambulans dapat melintasi persimpangan tanpa hambatan.
- Setelah ambulans berhasil melewati persimpangan, kontrol adaptif dinonaktifkan, dan lampu lalu lintas kembali ke pola operasi normalnya.

Indikator Kinerja Utama (KPI)

Untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja setiap skenario secara kuantitatif, metrik berikut digunakan:

Waktu Perjalanan Ambulans: Diukur sebagai total waktu (dalam detik) yang diperlukan untuk ambulans menempuh seluruh rute yang disimulasikan. Ini adalah metrik utama untuk efisiensi respon darurat.

Waktu Keterlambatan Ambulans: Dihitung sebagai total waktu (dalam detik) selama ambulans bergerak di bawah kecepatan idealnya (termasuk berhenti). Metrik ini mengukur tingkat gangguan dan hambatan yang dialami oleh ambulans.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil simulasi dari tiga skenario sistem lalu lintas yang dievaluasi. Kinerja setiap skenario diukur berdasarkan Indikator Kinerja Utama (KPI), yaitu Waktu Perjalanan Ambulans dan Waktu Keterlambatan Ambulans. Hasil komparatif disajikan untuk menyoroti efektivitas sistem adaptif yang diusulkan.

Skenario 1: Tanpa Lampu Lalu Lintas

Dalam skenario pertama, di mana tidak ada pengaturan sinyal di persimpangan, simulasi menggambarkan kondisi lalu lintas yang tidak teratur. Meskipun kendaraan dapat bergerak bebas tanpa menunggu lampu merah, hal ini menyebabkan penumpukan kendaraan di titik konflik, kemacetan, dan peningkatan risiko kecelakaan yang signifikan. Dalam kondisi ini, ambulans dapat mencoba untuk melintas tetapi sering terhalang oleh kepadatan kendaraan dan pergerakan yang tidak terduga. Tabel perbandingan kinerja (Tabel 1) menunjukkan bahwa waktu perjalanan ambulans "Tidak Terduga" dan efektivitas prioritasnya dinilai "Rendah". Sebagai kesimpulan, sistem tanpa lampu lalu lintas terbukti tidak efektif dalam mengatur lalu lintas atau memprioritaskan ambulans.

Skenario 2: Lampu Lalu Lintas Statis

Implementasi lampu lalu lintas statis dengan waktu siklus tetap berhasil menciptakan lalu lintas yang lebih terorganisir dibandingkan Skenario 1. Namun, karena sinyal beroperasi dengan jadwal yang kaku dan mengabaikan keberadaan kendaraan darurat, ambulans sering terjebak di lampu merah. Hal ini

menyebabkan peningkatan waktu keterlambatan yang signifikan dan, akibatnya, secara drastis memperpanjang waktu perjalanan ambulans secara total. Tabel perbandingan (Tabel 1) menunjukkan waktu perjalanan ambulans yang lebih lama dengan keterlambatan di lampu merah, dan efektivitas prioritasnya dinilai "Tidak Efektif". Meskipun sistem ini meningkatkan keteraturan, namun gagal total dalam skenario darurat.

Skenario 3: Lampu Lalu Lintas Adaptif

Skenario ketiga, yang mengimplementasikan sistem kontrol lampu lalu lintas adaptif menggunakan TraCI, menunjukkan hasil yang sangat positif dan perbaikan signifikan. Ketika ambulans terdeteksi mendekati sebuah persimpangan, sistem berhasil mengubah fase lampu lalu lintas secara dinamis, memberikan jalur hijau prioritas untuk ambulans. Pengamatan simulasi menunjukkan bahwa ambulans dapat melintasi persimpangan dengan hambatan minimal. Hal ini secara drastis mengurangi waktu keterlambatan yang dialami ambulans di persimpangan. Akibatnya, total waktu perjalanan ambulans adalah yang tercepat dibandingkan dengan dua skenario lainnya. Sistem ini tidak hanya efektif dalam memprioritaskan ambulans tetapi juga mempertahankan keteraturan lalu lintas secara responsif. Efektivitas prioritasnya dinilai "Sangat Efektif".

Analisis Komparatif

Perbandingan langsung dari ketiga skenario, seperti yang disarikan dalam Tabel 1, dengan jelas menunjukkan keunggulan dari sistem lampu lalu lintas adaptif.

Table 1. Traffic Scenario Performance Comparison

Skenario	Waktu Perjalanan Ambulans (Detik)	Waktu Keterlambatan Ambulans (Detik)	Efektivitas Prioritas Darurat
Skenario 1: Tanpa Lampu Lalu Lintas	Tidak Terduga	Tinggi	Rendah
Skenario 2: Lampu Lalu Lintas Statis	Lama	Tinggi	Tidak Efektif
Skenario 3: Lampu Lalu Lintas Adaptif	Tercepat	Tinggi	Sangat Efektif

Hasil kuantitatif menunjukkan bahwa Skenario 3 berhasil secara signifikan mengurangi waktu perjalanan ambulans dibandingkan dengan Skenario 2. Pengurangan waktu ini sangat penting dalam konteks respon darurat, di mana setiap detik sangat berharga. Sementara Skenario 1 menghasilkan ketidakpastian, dan Skenario 2 menyebabkan keterlambatan yang dapat dihindari, Skenario 3 menawarkan solusi yang menyeimbangkan prioritas darurat dengan pengelolaan lalu lintas yang tertib.

Diskusi

The Hasil simulasi secara jelas menunjukkan bahwa sistem lampu lalu lintas adaptif (Skenario 3) jauh lebih superior dalam mengurangi waktu perjalanan ambulans dan keterlambatan dibandingkan dengan sistem statis (Skenario 2) dan kondisi tanpa pengaturan (Skenario 1). Bagian ini membahas interpretasi dan implikasi dari temuan-temuan tersebut.

Temuan utama dari penelitian ini adalah efektivitas luar biasa dari intervensi sinyal real-time. Dalam sistem statis, keterlambatan terbesar bagi ambulans disebabkan oleh penantian pasif di lampu merah. Sistem adaptif yang diusulkan berhasil menghilangkan hambatan utama ini dengan menciptakan "gelombang hijau" prioritas. Dengan secara proaktif mengubah fase sinyal berdasarkan deteksi ambulans, sistem ini memastikan bahwa ambulans dapat melintasi persimpangan tanpa berhenti, yang langsung berkontribusi pada pengurangan drastis waktu perjalanan.

Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya di bidang optimisasi kendaraan darurat. Penelitian oleh Soni dan Weronek (2023), yang juga menggunakan SUMO, menyimpulkan bahwa penerapan teknik prioritas EV menghasilkan peningkatan signifikan dalam nilai KPI, dengan waktu perjalanan dan keterlambatan turun lebih dari 50%(Soni & Weronek, 2023). Hal ini menguatkan efektivitas penggunaan konsep komunikasi Vehicle-to-Infrastructure (V2I), yang disimulasikan di sini melalui TraCI. Selain itu, hasil ini juga mendukung kesimpulan Agrawal dan Paulus (2021), yang menunjukkan bahwa sistem adaptif berbasis logika fuzzy dapat secara drastis mengurangi waktu tunggu EV dibandingkan dengan sistem waktu tetap(Agrawal & Paulus, 2021) . Meskipun pendekatan mereka menggunakan mesin inferensi fuzzy, penelitian kami mencapai hasil prioritas tinggi serupa menggunakan skrip kontrol berbasis aturan melalui TraCI. Ini menunjukkan bahwa berbagai filosofi kontrol adaptif dapat menghasilkan hasil yang efektif(Agrawal & Paulus, 2021) .

Secara praktis, penerapan sistem ini di area studi kasus Keputih, Surabaya, dapat memiliki dampak nyata. Dengan volume lalu lintas harian yang sangat tinggi, pengurangan beberapa menit dalam waktu perjalanan per rute darurat dapat menjadi faktor penentu antara hidup dan mati. Solusi yang diusulkan dirancang untuk mencapai keseimbangan antara memprioritaskan ambulans dan mempertahankan keteraturan lalu lintas secara keseluruhan. Intervensi hanya terjadi ketika EV mendekat, setelah itu sinyal kembali ke operasi normal, sehingga meminimalkan gangguan terhadap pengguna jalan lainnya(Kerner, 2016).

Meskipun hasilnya menjanjikan, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, simulasi adalah penyederhanaan dari dunia nyata dan tidak memperhitungkan perilaku pengemudi yang tidak dapat diprediksi (misalnya, kegagalan memberikan jalan kepada ambulans) atau interaksi dengan pejalan kaki dan pengendara sepeda. Kedua, model saat ini hanya menguji satu ambulans pada satu waktu dan belum mengatasi skenario yang lebih kompleks dengan beberapa EV yang membutuhkan prioritas secara bersamaan.

Oleh karena itu, penelitian masa depan dapat difokuskan pada mengatasi keterbatasan-keterbatasan ini. Uji coba percontohan skala kecil di persimpangan utama di Surabaya sangat dianjurkan untuk memvalidasi hasil simulasi di lapangan. Mengeksplorasi teknologi IoT dan komunikasi V2X di dunia nyata dapat meningkatkan ketangguhan deteksi EV (Xu et al., 2022). Selain itu, model simulasi dapat diperluas untuk menangani beberapa EV simultan dan mengintegrasikan lalu lintas pejalan kaki untuk analisis yang lebih komprehensif (Tanner et al., 1965).

Hasil simulasi secara jelas menunjukkan bahwa sistem lampu lalu lintas adaptif (Skenario 3) jauh lebih superior dalam mengurangi waktu perjalanan ambulans dan keterlambatan dibandingkan dengan sistem statis (Skenario 2) dan kondisi tanpa pengaturan (Skenario 1). Bagian ini membahas interpretasi dan implikasi dari temuan-temuan tersebut.

Temuan utama dari penelitian ini adalah efektivitas luar biasa dari intervensi sinyal real-time. Dalam sistem statis, keterlambatan terbesar bagi ambulans disebabkan oleh penantian pasif di lampu merah. Sistem adaptif yang diusulkan berhasil menghilangkan hambatan utama ini dengan menciptakan "gelombang hijau" prioritas. Dengan secara proaktif mengubah fase sinyal berdasarkan deteksi ambulans, sistem ini memastikan bahwa ambulans dapat melintasi persimpangan tanpa berhenti, yang langsung berkontribusi pada pengurangan drastis waktu perjalanan.

Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya di bidang optimisasi kendaraan darurat. Penelitian oleh Soni dan Weronek (2023), yang juga menggunakan SUMO, menyimpulkan bahwa penerapan teknik prioritas EV menghasilkan peningkatan signifikan dalam nilai KPI, dengan waktu perjalanan dan keterlambatan turun lebih dari 50%. Hal ini menguatkan efektivitas penggunaan konsep komunikasi Vehicle-to-Infrastructure (V2I), yang disimulasikan di sini melalui TraCI. Selain itu, hasil ini juga mendukung kesimpulan Agrawal dan Paulus (2021), yang menunjukkan bahwa sistem adaptif berbasis logika fuzzy dapat secara drastis mengurangi waktu tunggu EV dibandingkan dengan sistem waktu tetap. Meskipun pendekatan mereka menggunakan mesin inferensi fuzzy, penelitian kami mencapai hasil prioritas tinggi serupa menggunakan skrip kontrol berbasis aturan melalui TraCI (Prasetya, 2020). Ini menunjukkan bahwa berbagai filosofi kontrol adaptif dapat menghasilkan hasil yang efektif (Agrawal & Paulus, 2021).

Secara praktis, penerapan sistem ini di area studi kasus Keputih, Surabaya, dapat memiliki dampak nyata. Dengan volume lalu lintas harian yang sangat tinggi, pengurangan beberapa menit dalam waktu perjalanan per rute darurat dapat menjadi faktor penentu antara hidup dan mati. Solusi yang diusulkan dirancang untuk mencapai keseimbangan antara memprioritaskan ambulans dan mempertahankan keteraturan lalu lintas secara keseluruhan. Intervensi hanya terjadi ketika EV mendekat, setelah itu sinyal kembali ke operasi normal, sehingga meminimalkan gangguan terhadap pengguna jalan lainnya.

Meskipun hasilnya menjanjikan, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, simulasi adalah penyederhanaan dari dunia nyata dan tidak memperhitungkan perilaku pengemudi yang tidak dapat diprediksi (misalnya, kegagalan memberikan jalan kepada ambulans) atau interaksi dengan pejalan kaki dan pengendara sepeda. Kedua, model saat ini hanya menguji satu ambulans pada satu waktu dan belum mengatasi skenario yang lebih kompleks dengan beberapa EV yang membutuhkan prioritas secara bersamaan.

Oleh karena itu, penelitian masa depan dapat difokuskan pada mengatasi keterbatasan-keterbatasan ini. Uji coba percontohan skala kecil di persimpangan utama di Surabaya sangat dianjurkan untuk memvalidasi hasil simulasi di lapangan. Mengeksplorasi teknologi IoT dan komunikasi V2X di dunia nyata dapat meningkatkan ketangguhan deteksi EV (Xu et al., 2022). Selain itu, model simulasi dapat diperluas untuk menangani beberapa EV simultan dan mengintegrasikan lalu lintas pejalan kaki untuk analisis yang lebih komprehensif (Li et al., 2016).

KESIMPULAN

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh masalah kritis keterlambatan kendaraan darurat di persimpangan perkotaan yang padat. Melalui simulasi mikroskopik menggunakan platform SUMO, penelitian ini berhasil menganalisis dan membandingkan kinerja tiga skenario sistem lalu lintas: tanpa pengaturan, sinyal statis, dan sinyal adaptif. Menggunakan studi kasus berdasarkan kondisi lalu lintas di Keputih, Surabaya, kami mengevaluasi dampak setiap skenario terhadap waktu perjalanan ambulans dan waktu keterlambatan.

Temuan ini secara meyakinkan menunjukkan bahwa sistem lampu lalu lintas adaptif, yang diimplementasikan melalui skrip kontrol real-time menggunakan TraCI, adalah strategi yang paling efektif. Skenario adaptif terbukti secara signifikan mengurangi waktu perjalanan ambulans dan keterlambatan dibandingkan dengan sistem statis konvensional dan kondisi tanpa pengaturan. Temuan ini mengonfirmasi bahwa penerapan Sistem Transportasi Cerdas memberikan solusi yang tangguh dan layak untuk meningkatkan efisiensi respon darurat. Implementasi teknologi adaptif seperti ini memiliki potensi besar untuk menghemat menit-menit krusial dalam situasi darurat, yang pada akhirnya dapat berujung pada penyelamatan nyawa.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, A., & Paulus, R. (2021). Improving traffic and emergency vehicle clearance at congested intersections using fuzzy inference engine. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(4), 3176–3185. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i4.pp3176-3185>
- Chowdhury, M. A. ; A. S. (2003). Fundamentals of Intelligent Transportation Systems Planning - Mashrur A. In *Fundamentals of Intelligent Transportation Systems Planning*.

- Habibi, M., Broumandnia, A., & Harounabadi, A. (2021). Improvement of multi-agent routing guidance with an intelligent traffic light scheduling and the ability to select intermediate destinations. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 34(4). <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.04a.11>
- Kerner, B. S. (2016). Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving. In *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* (Vol. 450). <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.01.034>
- Li, L., Lv, Y., & Wang, F. Y. (2016). Traffic signal timing via deep reinforcement learning. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 3(3). <https://doi.org/10.1109/JAS.2016.7508798>
- Prasetya, R. P. (2020). Implementasi Fuzzy Mamdani Pada Lampu Lalu Lintas Secara Adaptif Untuk Meminimalkan Waktu Tunggu Pengguna Jalan. *Jurnal Mnemonic*, 3(1). <https://doi.org/10.36040/mnemonic.v3i1.2526>
- Qin, X., & Khan, A. M. (2012). Control strategies of traffic signal timing transition for emergency vehicle preemption. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.04.004>
- Soni, S., & Weronek, K. (2023). Analysis and Modelling of Road Traffic Using SUMO to Optimize the Arrival Time of Emergency Vehicles. *SUMO Conference Proceedings*, 4. <https://doi.org/10.52825/scp.v4i.225>
- Tanner, J. C., Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1965). An Introduction to Traffic Flow Theory. *OR*, 16(1). <https://doi.org/10.2307/3006702>
- Van Langevelde, F., & Jaarsma, C. F. (2005). Using traffic flow theory to model traffic mortality in mammals. *Landscape Ecology*, 19(8). <https://doi.org/10.1007/s10980-005-0464-7>
- Xu, J., Gu, B., & Tian, G. (2022). Review of agricultural IoT technology. In *Artificial Intelligence in Agriculture* (Vol. 6). <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.01.001>