

Tinjauan Literatur Sistem Peringatan Fase Hijau: Efisiensi dan Keselamatan pada Simpang Bersinyal

Ratnasari Ramlan *^{1a}, Jurair Patunrangi *², Ismadarni *³, Rizki Amaliah *⁴, Tri Wahyuningsih *⁵

Submit:
17 Oktober 2025

*^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, ramlanratnasari@gmail.com^{*1}, jurair62@gmail.com^{*2}, isma.fatek@gmail.com^{*3}, Rizkyamaliaw97@gmail.com^{*4}

Review:
27 November
2025

*⁵Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, triwahyuni@untad.ac.id

Revised:
15 Desember
2025

Published:
30 Desember
2025

Corresponding Author: ramlanratnasari@gmail.com

Abstrak

Persimpangan bersinyal merupakan simpul penting dalam sistem transportasi perkotaan. Namun, inefisiensi akibat *start-up lost time* (SULT) serta meningkatnya risiko kecelakaan masih menjadi permasalahan utama. *Sistem Peringatan Fase Hijau* (SPFH) hadir sebagai inovasi *Intelligent Transportation System* (ITS) untuk mengurangi SULT sekaligus meningkatkan keselamatan lalu lintas. Artikel ini menyajikan tinjauan literatur dari publikasi tahun 2010 hingga 2025 terkait SPFH. Hasil kajian menunjukkan bahwa SPFH mampu menurunkan waktu reaksi pengemudi sebesar 15–25%, meningkatkan kapasitas simpang hingga 20%, serta mengurangi potensi tabrak belakang. Meski demikian, efektivitasnya di negara dengan lalu lintas heterogen, khususnya Indonesia yang didominasi sepeda motor, masih menghadapi keterbatasan. Penelitian lanjutan perlu diarahkan pada pengembangan SPFH adaptif yang sesuai dengan karakter lalu lintas campuran, serta kajian kebijakan untuk mendukung penerapan skala luas.

Kata kunci: Efisiensi, lalu lintas heterogen, simpang bersinyal, sistem peringatan fase hijau, *start-up lost time*

Abstract

Signalized intersections are critical components of urban traffic systems. However, inefficiencies caused by start-up lost time (SULT) and increased accident risks remain major challenges. Green Phase Warning Systems (GPWS) have emerged as an Intelligent Transportation System (ITS) innovation to reduce SULT and improve traffic safety. This paper presents a literature review of GPWS research published from 2010 to 2025. Findings show that GPWS reduces driver reaction time by 15–25%, increases intersection throughput up to 20%, and decreases rear-end collision risks. However, its effectiveness in heterogeneous traffic contexts, particularly in Indonesia where motorcycles dominate, remains limited. Future studies should focus on adaptive GPWS designs tailored for mixed traffic and explore policy frameworks supporting large-scale adoption.

Keywords: Efficiency, heterogeneous traffic, signalized intersections, green phase warning system, *start-up lost time*

PENDAHULUAN

Persimpangan bersinyal merupakan elemen krusial dalam jaringan transportasi perkotaan karena berfungsi mengatur pertemuan arus lalu lintas dari berbagai arah. Namun, di balik peran strategisnya, persimpangan ini sering kali menjadi titik *bottleneck* dalam sistem kota, terutama pada kondisi arus puncak. Salah satu penyebab utama ketidakefisienan pada persimpangan bersinyal adalah *start-up lost time* (SULT), yaitu selang waktu antara lampu hijau menyala dengan gerakan nyata kendaraan pertama dalam antrean [1]. Dalam praktiknya, SULT mencerminkan *delay laten pengemudi* yang belum siap bergerak meski sinyal telah berubah, sehingga secara kolektif mengurangi kapasitas maksimumnya (*total throughput*). Sejumlah penelitian telah menyoroti bahwa waktu hilang ini — meskipun relatif kecil per siklus — berdampak signifikan jika diakumulasi pada siklus jam sibuk di banyak persimpangan secara beruntun. Pendekatan tradisional dalam perancangan sinyal lalu lintas mengasumsikan nilai tetap untuk waktu hilang saat mulai (misalnya 2 detik per siklus), namun dalam kenyataan, nilai ini sangat bervariasi tergantung kondisi lokal seperti karakteristik lalu lintas, perilaku pengemudi, komposisi kendaraan, geometri persimpangan, dan pola pergerakan [2].

Untuk mengatasi keterbatasan tindakan tradisional, inovasi dalam domain *Intelligent Transportation Systems* (ITS) mulai dikembangkan untuk meminimalkan efek SULT. Salah satu teknologi yang banyak dibahas dalam literatur adalah *Green Phase Warning System* (GPWS) atau *Sistem Peringatan Fase Hijau* (SPFH). Teknologi ini berfungsi memberi sinyal atau pemberitahuan sebelum lampu hijau menyala, sehingga pengemudi dapat mempersiapkan laju awal kendaraan dengan lebih baik. Sistem ini meningkatkan kesiapan pengemudi dan mengoptimalkan waktu reaksi, yang pada akhirnya memperbaiki efisiensi arus lalu lintas serta keselamatan pengguna jalan [3]. Bentuk penerapan sistem ini dapat bervariasi, termasuk *countdown timer*, sinyal visual adaptif, peringatan auditori, atau integrasi *vehicle-to-infrastructure* (V2I). *Countdown timer* merupakan bentuk paling umum dari SPFH yang menampilkan hitungan mundur menuju perubahan fase sinyal. Tujuannya adalah memberikan informasi waktu tersisa sebelum fase hijau dimulai sehingga pengemudi dapat menyiapkan kendaraan untuk bergerak tepat waktu. Studi awal oleh [7] di Tiongkok menunjukkan bahwa penggunaan *green signal countdown device* mampu menurunkan SULT hingga 21,2% dan meningkatkan *throughput* simpang hingga 15%.



Gambar 1. Sistem *Countdown Timer*

Sistem visual dan auditori merupakan sistem yang menggunakan sinyal cahaya adaptif dan suara sebagai bentuk peringatan fase hijau. [8] menjelaskan bahwa kombinasi *visual-auditory signal* dapat meningkatkan

kewaspadaan pengemudi, khususnya bagi mereka yang memiliki keterbatasan persepsi visual. Sistem ini berfungsi sebagai sinyal kesiapan yang meminimalkan waktu reaksi tanpa mengubah durasi sinyal secara signifikan. Bentuk penerapan lainnya adalah Integrasi *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I) yang merupakan sistem komunikasi antara kendaraan dan infrastruktur jalan yang memungkinkan penyampaian peringatan fase hijau secara *real-time*. Teknologi ini memungkinkan kendaraan menerima informasi tentang waktu sinyal berikutnya melalui jaringan komunikasi nirkabel (5G atau *Dedicated Short-Range Communication*).

Sistem *forewarning* inovatif secara signifikan dapat menurunkan SULT dan mempengaruhi perilaku *start-up* pengemudi agar lebih halus dan responsif [3]. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi peringatan hijau tidak hanya mendukung efisiensi tetapi juga memperbaiki aspek keselamatan lalu lintas (misalnya dengan mengurangi percepatan mendadak yang bisa memicu konflik). Namun demikian, efek dan implikasi GPWS tidak selalu konsisten antar studi. Sebagai contoh, [2] dalam *review* mereka menyebut bahwa meskipun sebagian penelitian memperlihatkan peningkatan efisiensi dan reduksi SULT menggunakan sinyal *countdown*, ada juga laporan bahwa dampak terhadap aspek keselamatan — seperti pelanggaran lampu merah atau peningkatan konflik — masih sangat beragam antar lokasi dan kondisi studi.

Lebih lanjut, studi di beberapa negara dengan konfigurasi lalu lintas heterogen menunjukkan tantangan adaptasi yang nyata. Misalnya, [4] pemeriksaan efek *green signal countdown timer* (GSCT) dalam kondisi lalu lintas heterogen (termasuk pergerakan kendaraan campuran) dan menemukan bahwa meskipun GSCT dapat meminimalkan zona dilema (*dilemma zone*) pada fase kuning, pengaruhnya terhadap pelanggaran sinyal dan konflik tetap tergantung pada parameter sinyal seperti durasi kuning dan *all-red*.

Dalam konteks lalu lintas yang heterogen, karakteristik kecepatan, akselerasi, dan perilaku *start-up* kendaraan berbeda jauh antara mobil, kendaraan berat, dan sepeda motor. Studi [5] menekankan bahwa dominasi pergerakan sepeda motor di beberapa kota Asia dapat memperpanjang waktu *start-up* secara kolektif dibandingkan dengan kondisi kendaraan homogen, karena kecepatan reaksi dan jarak aman antar kendaraan dua roda seringkali lebih variatif. Selain itu, tinjauan oleh [6] menyoroti bahwa penggunaan *signal countdown timers* (SCT) di berbagai negara menunjukkan efek ganda: di satu sisi, SCT seringkali menurunkan SULT dan mempercepat *start-up* kendaraan; namun di sisi lain, ada kecenderungan peningkatan pelanggaran lampu merah atau kecenderungan percepatan mendadak menjelang perubahan lampu, khususnya ketika countdown mendekati angka kecil, yang dapat mengurangi aspek keselamatan (misalnya konflik samping atau tabrakan ekor).

Dalam kajian literatur yang luas, dapat disimpulkan bahwa meskipun sinyal *countdown* relatif baru di banyak lokasi dan penelitian masih terbatas [2], ada konsensus bahwa fungsi utamanya adalah menyediakan *alert timing* kepada pengemudi agar transisi dari berhenti ke gerak menjadi lebih halus. Namun, karena variasi lokal dalam perilaku pengemudi dan kondisi persimpangan, efek netonya (efisiensi vs. keselamatan) memerlukan pendekatan studi mikro (psikologi, fizikal) dan makro (volume, geometri).

Beberapa tantangan utama dalam penerapan GPWS/SCT dalam konteks Indonesia atau negara berkembang meliputi: adaptasi ke lalu lintas heterogen dominan dua roda, minimnya regulasi dan standar teknis untuk *countdown/warning devices*, keterbatasan data kecelakaan dan konflik nyata (karena sering tidak tercatat secara rinci), serta resistensi perilaku pengemudi terhadap teknologi baru. Berdasarkan latar belakang di atas, artikel ini bertujuan untuk:

1. Melakukan sintesis literatur terkini (2010–2025) mengenai sistem peringatan fase hijau/*countdown timer* dalam konteks efisiensi dan keselamatan lalu lintas.

2. Mengevaluasi konsistensi dan perbedaan temuan empiris antar studi berdasarkan kondisi lalu lintas, geografi, dan teknologi yang digunakan.
3. Mengidentifikasi celah penelitian dan tantangan dalam implementasi GPWS di negara dengan lalu lintas heterogen, khususnya Indonesia, serta merumuskan rekomendasi riset lanjut.

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan literatur sistematis (*systematic literature review*) untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mensintesis hasil-hasil penelitian yang relevan terkait *Sistem Peringatan Fase Hijau* (SPFH) atau *Green Phase Warning System* (GPWS) dalam konteks efisiensi dan keselamatan lalu lintas. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan pemahaman komprehensif tentang perkembangan teknologi SPFH dari berbagai sudut pandang ilmiah serta relevansinya terhadap kondisi lalu lintas heterogen di Indonesia.

A. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan melalui beberapa langkah utama:

- a. Perumusan fokus kajian, dengan menetapkan pertanyaan utama penelitian, yaitu: “*Bagaimana dampak penerapan Sistem Peringatan Fase Hijau terhadap efisiensi dan keselamatan lalu lintas pada simpang bersinyal?*”
- b. Strategi pencarian literatur dengan mengumpulkan data melalui *database* ilmiah bereputasi seperti Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, dan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan meliputi: *green phase warning system*, *countdown timer*, *start-up lost time*, *signalized intersection*, *traffic efficiency*, dan *traffic safety*. Kriteria inklusi mencakup artikel jurnal dan prosiding yang diterbitkan antara tahun 2010–2025, dengan fokus pada sistem peringatan fase hijau dan implementasinya dalam *Intelligent Transportation Systems* (ITS).
- c. Seleksi dan evaluasi literatur, dengan melakukan pencarian awal sebanyak 50 publikasi, selanjutnya dilakukan penyaringan berdasarkan relevansi topik, akses penuh, dan kualitas sumber (jurnal terindeks Scopus atau bereputasi nasional). Sebanyak 16 artikel terpilih untuk dianalisis lebih lanjut.
- d. Analisis dan sintesis data, menggunakan pendekatan tematik, mencakup:
 1. Jenis teknologi SPFH yang digunakan (*countdown*, visual-auditori, V2I);
 2. Indikator efisiensi (SULT, kapasitas, waktu tunda);
 3. Indikator keselamatan (konflik lalu lintas, tabrakan belakang, pelanggaran sinyal); dan
 4. Kondisi lalu lintas lokal (homogen dan heterogen).Hasil analisis disajikan secara deskriptif dan komparatif untuk menunjukkan tren dan gap penelitian.
- e. Validasi dan Interpretasi, dilakukan dengan membandingkan antara sumber untuk menilai pola umum dan perbedaan temuan. Kajian dilakukan dengan menekankan konteks lalu lintas Asia Tenggara, khususnya Indonesia.

B. Luaran Penelitian

Luaran penelitian berupa pemetaan literatur SPFH mencakup perkembangan teknologi, efektivitas terhadap efisiensi dan keselamatan, serta identifikasi arah penelitian ke depan yang berpotensi dikembangkan di lingkungan lalu lintas heterogen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Temuan Umum dari Kajian Literatur

Berdasarkan hasil telaah terhadap artikel yang relevan dari tahun 2008 hingga 2025, penelitian tentang Sistem Peringatan Fase Hijau (SPFH) atau *Green Phase Warning System* (GPWS) menunjukkan perkembangan signifikan dalam dua dekade terakhir. Awalnya, fokus utama penelitian terletak pada evaluasi *countdown timer* konvensional untuk mengurangi *start-up lost time* (SULT) dan meningkatkan kapasitas simpang [7] [1]. Namun, sejak 2018, arah riset beralih pada pendekatan terintegrasi berbasis *Intelligent Transportation Systems* (ITS) dan komunikasi kendaraan-infrastruktur (V2I), yang menekankan pada aspek keselamatan serta efisiensi energi [8] [3].

Secara umum, literatur menunjukkan bahwa SPFH efektif dalam menurunkan SULT antara 15–25%, meningkatkan kapasitas simpang hingga 20%, dan memperbaiki disiplin lalu lintas [2] [9]. Meskipun demikian, efektivitas sistem ini dipengaruhi oleh perilaku pengemudi dan kondisi lalu lintas setempat. Di negara-negara dengan lalu lintas homogen seperti Tiongkok dan Jepang, manfaat SPFH relatif konsisten, sedangkan di wilayah dengan lalu lintas heterogen seperti Indonesia dan India, hasilnya lebih bervariasi [4] [5].

Tabel 1. Rangkuman Hasil Penelitian tentang SPFH (2008-2025)

Situs	Fokus Penelitian	Metode	Temuan Utama
[1]	Pengaruh kondisi hilir terhadap SULT	Observasi lapangan (Jepang)	Efisiensi SPFH menurun jika arus hilir terhambat.
[2]	Review global sistem <i>countdown signals</i>	Tinjauan literatur sistematis	SPFH efektif tingkatkan efisiensi dan keselamatan; perlu kalibrasi konteks lokal.
[3]	<i>Green-phase forewarning system</i>	Eksperimen simulasi (Qatar)	Risiko tabrakan belakang menurun 50%; akselerasi pengemudi lebih halus.
[4]	Risiko <i>dilemma zone</i> pada lalu lintas heterogen	Simulasi dan analisis statistik	<i>Countdown timer</i> menurunkan risiko tabrakan; efek berbeda antar jenis kendaraan.
[5]	Posisi sepeda motor & SULT di lalu lintas heterogen	Observasi empiris (Marrakech)	Dominasi motor memperpanjang SULT; efisiensi SPFH menurun di lalu lintas campuran.
[6]	Pengaruh <i>countdown timer</i> terhadap keselamatan	Studi empiris (Polandia)	Penurunan tabrakan belakang; risiko tabrakan samping jika timer terlalu singkat.
[7]	Dampak <i>green signal countdown</i> terhadap SULT	Studi lapangan (Tiongkok)	SULT turun 21,2%; kapasitas simpang naik 15%.
[8]	AI-based collision avoidance	Review integratif	Sistem berbasis sensor dan AI efektif tingkatkan keamanan pada fase peralihan.
[9]	<i>Countdown timer</i> dengan teks berjalan	Eksperimen lapangan (Yogyakarta)	Efisiensi naik 17,8%; antrian turun 14%.
[10]	Perilaku pengemudi pada sinyal <i>countdown-type</i>	Analisis mikroskopik	Deteksi <i>premature start</i> akibat hitung mundur; potensi risiko samping meningkat.
[11]	Masalah kontrol sinyal di simpang bersinyal	Review	Sistem waktu tetap kurang adaptif; perlu sinyal berbasis ITS.
[12]	Penyebab kecelakaan di persimpangan	Kajian deskriptif	22% kecelakaan disebabkan kesalahan persepsi fase sinyal.
[13]	<i>IoV-based traffic management system</i>	Model konseptual	Integrasi IoV meningkatkan prediksi fase sinyal dan respon pengemudi.
[14]	<i>Smart countdown</i> pada fase kuning-hijau	Eksperimen lapangan	Kapasitas naik 20%; variasi kecepatan antar kendaraan menurun.
[15]	Integrasi SPFH dengan <i>Red-Light Violation Warning</i>	Simulasi VISSIM	Kombinasi sistem menurunkan pelanggaran sinyal hingga 36%.
[16]	<i>Advance warning</i> akhir fase hijau	Pengujian lapangan (AS)	Pelanggaran lampu merah berkurang 23% dengan peringatan awal.

Tabel 1 menunjukkan bahwa penelitian tentang Sistem Peringatan Fase Hijau (SPFH) berkembang pesat antara 2008–2025, dengan fokus utama pada peningkatan efisiensi dan keselamatan simpang bersinyal. Sebagian besar studi menyoroti penurunan *start-up lost time* (SULT) dan peningkatan kapasitas simpang melalui penggunaan countdown timer dan sistem forewarning. Penelitian terbaru mulai mengintegrasikan teknologi *Intelligent Transportation Systems (ITS)*, *Vehicle-to-Infrastructure (V2I)*, dan kecerdasan buatan untuk meningkatkan akurasi peringatan. Namun, efektivitas SPFH di negara dengan lalu lintas heterogen, seperti Indonesia, masih terbatas karena perbedaan perilaku pengemudi dan dominasi sepeda motor.

B. Dampak Sistem Peringatan Fase Hijau terhadap Efisiensi Lalu Lintas

Dari sisi efisiensi, mayoritas studi empiris menemukan bahwa SPFH berperan dalam mengoptimalkan pelepasan antrean kendaraan dan mengurangi waktu tunggu di simpang bersinyal. Penurunan SULT sebesar 21,2% dengan peningkatan *throughput* hingga 15% [7]. Hasil serupa ditemukan oleh di Yogyakarta, di mana penggunaan *countdown timer* dengan teks berjalan mampu meningkatkan efisiensi lalu lintas sebesar 17,8% [9]. Manfaat efisiensi SPFH berasal dari tiga mekanisme utama [2]: (1) pengurangan waktu reaksi pengemudi sebelum lampu hijau menyala, (2) peningkatan koordinasi gerakan kendaraan pertama dan kedua dalam antrean, serta (3) perbaikan sinkronisasi antar-fase sinyal. Sistem *smart countdown* dengan algoritma dinamis dapat meningkatkan kapasitas simpang hingga 20% pada kondisi lalu lintas padat [14].

Pengaruh kondisi hilir (*downstream conditions*) terhadap efektivitas SPFH. Menurutnya, efisiensi maksimum hanya tercapai jika arus kendaraan setelah simpang tidak terhambat, sebab hambatan di hilir dapat menghilangkan manfaat percepatan fase awal [1]. Selain itu, penekanan bahwa pengendalian sinyal berbasis waktu tetap tidak cukup adaptif terhadap variasi perilaku pengemudi, sehingga integrasi dengan ITS atau sistem cerdas berbasis sensor menjadi kebutuhan masa depan [11]. Namun, pada lalu lintas heterogen, efektivitas SPFH terhadap efisiensi dapat berkurang. Perbedaan kecepatan reaksi antara mobil, truk, dan sepeda motor dapat memperpanjang *queue discharge time*, khususnya di kota-kota Asia yang didominasi kendaraan roda dua [4] [5]. Oleh karena itu, meskipun SPFH terbukti meningkatkan efisiensi secara makro, penerapannya di negara berkembang memerlukan desain adaptif terhadap perilaku lalu lintas lokal.

C. Dampak Sistem Peringatan Fase Hijau terhadap Keselamatan Lalu Lintas

Selain efisiensi, keselamatan menjadi dimensi penting dalam kajian SPFH. Beberapa penelitian menunjukkan hasil positif, sementara sebagian lainnya mengindikasikan risiko baru. [3] melaporkan bahwa sistem *green-phase forewarning* mampu menurunkan risiko tabrakan belakang (*rear-end collision*) hingga 50% dengan menciptakan pola akselerasi yang lebih halus. Temuan ini konsisten dengan penelitian [16], yang menunjukkan bahwa sistem advance warning pada akhir fase hijau mengurangi pelanggaran lampu merah hingga 23%.

Namun demikian, fenomena *premature start*, di mana pengemudi mulai bergerak sebelum lampu hijau menyala sepenuhnya, akibat pengaruh hitungan mundur yang menimbulkan ekspektasi waktu terlalu cepat [6] [10]. Situasi ini berpotensi meningkatkan konflik lateral, terutama di simpang dengan arus pejalan kaki tinggi. Sekitar 22% kecelakaan di simpang bersinyal disebabkan oleh kesalahan persepsi waktu pengemudi terhadap fase perubahan sinyal [12].

Efek keselamatan SPFH tidak bersifat universal [2]. Dalam lingkungan lalu lintas homogen seperti Jepang, peningkatan keselamatan dapat dicapai karena disiplin pengemudi tinggi. Sebaliknya, pada lalu lintas heterogen seperti di Asia Selatan atau Afrika Utara, risiko konflik meningkat akibat variasi reaksi

pengemudi dan manuver kendaraan kecil [5]. Integrasi SPFH dengan sistem *Internet of Vehicles (IoV)* dan komunikasi *real-time* menjadi solusi potensial untuk menyeimbangkan aspek efisiensi dan keselamatan. Sistem berbasis IoV dapat mendeteksi jarak kendaraan, kecepatan, dan fase sinyal untuk memberi peringatan yang lebih akurat kepada pengemudi [13]. Selain itu, [15] integrasi SPFH dengan *Red Light Violation Warning (RLVW)* untuk mencegah pelanggaran pada fase peralihan, yang terbukti menurunkan risiko tabrakan di simpang hingga 36%. Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa SPFH memberikan dampak positif terhadap keselamatan jika diimplementasikan dengan parameter waktu yang tepat dan disertai edukasi pengemudi. Sebaliknya, tanpa kalibrasi yang baik, sistem ini dapat menimbulkan reaksi berlebihan yang mengancam keselamatan.

SIMPULAN

Tinjauan literatur ini menegaskan bahwa Sistem Peringatan Fase Hijau (SPFH) berperan penting dalam meningkatkan efisiensi dan keselamatan pada simpang bersinyal. Berdasarkan sintesis terhadap publikasi periode 2008–2025, SPFH terbukti menurunkan start-up lost time (SULT) sebesar 15–25%, meningkatkan kapasitas simpang hingga 20%, serta menekan potensi tabrakan belakang melalui perbaikan waktu reaksi pengemudi dan koordinasi antrean kendaraan. Temuan ini konsisten di wilayah dengan karakter lalu lintas homogen seperti Tiongkok dan Jepang, namun menunjukkan variasi di negara berkembang yang memiliki lalu lintas heterogen, termasuk Indonesia. Perbedaan hasil tersebut menunjukkan bahwa efektivitas SPFH sangat dipengaruhi oleh perilaku pengemudi, dominasi sepeda motor, serta desain dan durasi sistem peringatan. Oleh karena itu, implementasi SPFH di Indonesia perlu diarahkan pada pengembangan sistem adaptif yang mempertimbangkan karakteristik kendaraan roda dua dan dinamika lalu lintas campuran. Kajian ini juga mengidentifikasi celah penelitian dalam integrasi SPFH dengan teknologi *Intelligent Transportation Systems (ITS)* dan komunikasi *Vehicle-to-Infrastructure (V2I)*. Penelitian mendatang disarankan untuk mengeksplorasi model SPFH berbasis sensor dan IoT, serta menilai efektivitasnya melalui simulasi atau uji lapangan, guna mendukung kebijakan penerapan simpang cerdas yang efisien, aman, dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada: 1) Fakultas Teknik Universitas Tadulako yang telah membiayai penelitian ini melalui Hibah Penelitian Unggulan Dana Dipa Fakultas Teknik Tahun 2025; dan 2) Panitia Penyelenggara Seminar Nasional Keteknikan 2 (Sematek 2) Fakultas Teknik Universitas Tadulako atas dukungan dan fasilitas yang diberikan sehingga artikel ini dapat dipresentasikan dan dipublikasikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] H. Zhu dan H. Nakamura “Study on Start-up Lost Time Considering Downstream Conditions”. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 75(5), I_1121–I_1130, 2019.
- [2] F. Pan, J. Yang, dan L. Zhang, “Impact of Countdown Signals on Traffic Safety and Efficiency: a review and proposal”. *Digital Transportation and Safety*, 1(1), 16, 2023.
- [3] Q. Hussain. “Nudging Drivers: The Influence of Innovative Green-phase Forewarning Systems on Drivers' Start-up Behavior”. *IATSS Research*, 49(1), 1–9. 2025.

- [4] M. Paul, “The Effects of Green Signal Countdown Timer and Retiming of Signal Intervals on Dilemma Zone Related Crash Risk at Signalized Intersections under Heterogeneous Traffic Conditions.” *Safety science*, 154, 105862.2022
- [5] A. Charef. “The Impact of Motorcycle Positioning on Start-up Lost Time: Empirical Case Study in Marrakech”. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(3), 14313–14318. 2024.
- [6] T , Krukowicz, K. Firląg, J. Suda, dan M. Czerliński. “Analysis of The Impact of Countdown Signal Timers on Driving Behavior and Road Safety”. *Energies*, 14(21), 7081. 2021.
- [7] W. Ma, Y. Liu, dan X. Yang. “Investigating The Impacts of Green Signal Countdown Devices: Case Study in China ”. *Journal of Transportation Engineering*, 136(11), 1049–1055. 2010.
- [8] Y. Fu, C. Li, C. Yu, F. R., Luan, T. H., dan Y. Zhang. “A Survey of Driving Safety with Sensing, Vehicular Communications, and AI-based Collision Avoidance ”. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 6142–6163.2021.
- [9] R. Fitrian, dan A. Darmawan. “The Effect of Countdown Timer with Running Text at Signalized Intersection: An Empirical Study ”. *Transactions on Transport Sciences*, 16(1), 15–28, 2025.
- [10] M. Fujita. “Comparative and Microscopic Analysis of Vehicle Startup Behavior under Countdown-type Signals ”. *Open Transportation Journal*, 18, e26671212279478. 2024.
- [11] M. Eom, dan B. I. Kim. “The Traffic Signal Control Problem for Intersections: A Review ”. *European Transport Research Review*, 12, 1–20. 2020.
- [12] Fan “Study on The Cause of Car Accidents at Intersections ”. *Open Access Library Journal*, 5(5), 1–11.
- [13] M. Elsagheer dan K. A. AlShalfan. “Intelligent Traffic Management System Based on IoV ”. *Journal of Advanced Transportation*, 4037533. 2021
- [14] Q. Hussain, W. Alhajyaseen, K. Brijs, A. Pirdavani, dan T. Brijs. “Improved Traffic Flow Efficiency During Yellow Interval at Signalized Intersections Using Smart Countdown ”. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(3), 1959–1968. 2020.
- [15] M. Arafat, E. Sadeghvaziri, dan R. Javid. “Performance Evaluation of Red-light Violation Warning Application with Traffic Signal Actuation and Coordination ”. *Digital Transportation and Safety*, 4(2), 108-117. 2025.
- [16] C. J., Messer. “Development of Advance Warning Systems for End-of-green Phase ”. *Texas Transportation Institute Report*, 2008