



Evaluasi Kinerja Strategi Sinyal Prioritas Bus pada Sistem *Bus Rapid Transit*

*Budi Yulianto

Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Surakarta

*budi.yulianto@ft.uns.ac.id

Received: 30 September 2025 Revised: 6 Januari 2026 Accepted: 20 Februari 2026

Abstract

Population growth and rapid urbanization have increased transportation demand and triggered traffic problems. Capacity-based approaches often exacerbate these conditions, highlighting the need for a sustainable transportation concept. The government has designated the development of public transportation as a national priority program, one of which is through bus rapid transit (BRT). To ensure the efficiency, reliability, and attractiveness of BRT, the implementation of bus signal priority (BSP) is essential. This study aims to evaluate the performance of passive and active BSP strategies at signalized intersections within a BRT system using VISSIM microscopic simulation. The strategies analyzed include cycle time adjustment, phase splitting, red truncation, green extension, and phase insertion. The simulation results indicate that the most effective strategies are cycle time adjustment with the early cut off concept for passive BSP and phase insertion for active BSP. The performance of BSP strategies is influenced by the number of phases, traffic movement patterns, and bus service frequency, which vary according to the applied strategy. This study recommends selecting BSP strategies through comprehensive simulation study to achieve both effective performance and cost efficiency before implementation.

Keywords: Sustainable transportation, bus rapid transit, bus signal priority, VISSIM microscopic

Abstrak

Pertumbuhan penduduk dan urbanisasi yang pesat meningkatkan kebutuhan transportasi dan memicu permasalahan lalu lintas. Pendekatan berbasis kapasitas sering kali memperburuk kondisi tersebut, sehingga diperlukan konsep transportasi berkelanjutan. Pemerintah menempatkan pengembangan transportasi publik sebagai prioritas nasional, salah satunya melalui bus rapid transit (BRT). Untuk menjamin efisiensi, keandalan, dan daya tarik BRT, penerapan sinyal prioritas bus menjadi sangat penting. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja strategi sinyal prioritas bus pasif dan aktif pada simpang bersinyal sistem BRT dengan menggunakan simulasi mikro VISSIM. Strategi yang dianalisis meliputi penyesuaian waktu siklus, pemisahan fase, pemotongan merah, perpanjangan hijau, dan penyisipan fase. Hasil simulasi menunjukkan bahwa strategi paling efektif adalah penyesuaian waktu siklus dengan konsep early cut off untuk sinyal prioritas bus pasif serta penyisipan fase untuk sinyal prioritas bus aktif. Kinerja strategi sinyal prioritas bus dipengaruhi oleh jumlah fase, pola pergerakan lalu lintas, dan frekuensi layanan bus, yang bervariasi sesuai dengan strategi yang diterapkan. Penelitian ini merekomendasikan pemilihan strategi sinyal prioritas bus melalui studi simulasi secara komprehensif untuk memperoleh hasil yang efektif sekaligus efisien dalam mendukung operasional BRT sebelum diimplementasikan.

Kata kunci: Transportasi berkelanjutan, bus rapid transit, sinyal prioritas bus, mikro VISSIM

Pendahuluan

Permasalahan transportasi yang akut disebabkan oleh sejumlah faktor yang saling terkait, termasuk pertumbuhan jumlah penduduk yang pesat, kurangnya infrastruktur transportasi yang memadai,

dan ketergantungan penggunaan kendaraan pribadi. Peningkatan jumlah penduduk dan urbanisasi yang cepat menyebabkan kebutuhan transportasi yang semakin besar, sementara infrastruktur jalan dan transportasi publik seringkali tidak mampu mengimbangnya, sehingga dapat memperburuk

permasalahan transportasi. Transportasi publik yang kurang andal, tepat waktu, nyaman, cakupan layanan dan terintegrasi membuat masyarakat lebih memilih kendaraan pribadi sebagai moda transportasi (Canitez, *et al.*, 2019). Ketergantungan penggunaan kendaraan pribadi, yang sering dianggap lebih nyaman dan fleksibel, menyebabkan lebih banyak kendaraan pribadi beroperasi di jalan raya sehingga meningkatkan kemacetan dan kecelakaan lalu lintas serta kerusakan lingkungan (Hassan, *et al.*, 2021). Penyelesaian permasalahan transportasi dengan konsep kapasitas dengan menambah kapasitas jalan raya sering memperburuk kondisi lalu lintas. Untuk mengatasinya secara efektif, pendekatan holistik diperlukan, yaitu dengan konsep transportasi berkelanjutan seperti pengembangan transportasi publik dan kebijakan pengurangan penggunaan kendaraan pribadi yang menciptakan sistem transportasi yang lebih efisien dan berkelanjutan (Bongardt, *et al.*, 2019).

Dalam rangka mewujudkan pengembangan transportasi publik, maka pemerintah Indonesia menetapkan kebijakan pengembangan sistem angkutan umum massal *bus rapid transit* (BRT) dalam program pembangunan prioritas nasional Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2020-2024 (Anonim, 2020). BRT merupakan salah satu solusi transportasi publik yang efisien, hemat biaya, dan ramah lingkungan karena menggunakan jalur khusus bus yang dapat mengurangi kemacetan serta mendorong masyarakat beralih dari kendaraan pribadi. Selain itu, BRT memiliki kapasitas angkut yang besar, fleksibel dalam pengembangannya, serta dapat diintegrasikan dengan infrastruktur jalan yang sudah ada, sehingga menjadi pilihan ideal untuk meningkatkan mobilitas perkotaan (Pedro dan Macario, 2016; Ni, *et al.*, 2022; Pettersson dan Sorensen, 2020).

Salah satu elemen dasar BRT adalah perlakuan di simpang, yaitu pengaturan waktu pergerakan bus menggunakan alat pemberi isyarat lalu lintas yang merupakan bagian dari fitur *area traffic control system* dengan fungsi mengendalikan pergerakan transportasi publik melalui penerapan sinyal prioritas bus (ITDP, 2016). Pemberian sinyal prioritas pada bus BRT sangat penting untuk memastikan efisiensi, keandalan, dan daya tariknya sebagai moda transportasi publik. Sinyal prioritas bus di simpang memungkinkan bus BRT bergerak melalui sinyal lalu lintas dengan lebih efisien, mengurangi keterlambatan, dan meningkatkan waktu tempuh secara keseluruhan.

Sinyal prioritas bus dikategorikan menjadi dua sistem, yaitu pasif dan aktif (TRRL, 1976). Sistem

sinyal prioritas bus pasif memiliki pengaturan waktu sinyal yang bersifat tetap, di mana bus diberi prioritas berdasarkan pola waktu yang telah ditentukan sebelumnya. Pengaturan waktu sinyal diprogram sebelumnya untuk mengalokasikan lebih banyak waktu hijau untuk rute bus pada waktu tertentu dalam sehari, terlepas dari apakah bus berada di simpang atau tidak. Sedangkan sistem sinyal prioritas bus aktif secara dinamis menyesuaikan pengaturan waktu sinyal lalu lintas untuk memprioritaskan bus di simpang secara *real-time* dengan menggunakan teknologi sensor untuk mendeteksi bus yang mendekati simpang dan memberi prioritas sesuai kebutuhan.

Strategi sinyal prioritas bus pasif meliputi penyesuaian waktu siklus (*adjustment of cycle time*) dan pemisahan fase (*phase splitting*), sedangkan untuk sinyal prioritas bus aktif meliputi pemotongan merah (*red truncation*), perpanjangan hijau (*green extension*), dan penyisipan fase (*phase insertion*) (TRRL, 1976; Imran, *et al.*, 2022). Berbagai penelitian sinyal prioritas bus telah dilakukan dalam rangka meningkatkan kinerja jaringan jalan dan operasional transportasi publik.

Zhou *et al.*, (2017) mengembangkan metode pengendalian sinyal prioritas bus aktif untuk sistem BRT jalur khusus median di simpang tunggal berdasarkan waktu kedatangan bus dalam siklus sinyal, dengan menerapkan strategi perpanjangan hijau, pemotongan merah, dan penyisipan fase. Metode tersebut mampu menurunkan tundaan penumpang bus sebesar 13,43–25,27% serta meningkatkan kecepatan perjalanan bus sebesar 7,10–7,55% dibandingkan skenario tanpa sinyal prioritas bus. Yulianto dan Setiono (2020) merancang lampu lalu lintas yang responsif terhadap permintaan bus di simpang bersinyal dengan strategi sinyal prioritas bus penyisipan fase di sepanjang Jalan Brigjend Slamet Riyadi Surakarta, yang mengadopsi sistem satu arah dengan arus berlawanan untuk jalur khusus bus. Kinerja simpang dengan sinyal prioritas bus dibandingkan dengan *fixed time control* (FTC) dengan menggunakan simulasi mikro VISSIM. Model sinyal prioritas bus menghasilkan penurunan 57,4%; 50,0%; dan 24,8% rata-rata tundaan kendaraan pada kondisi *headway* bus sebesar 10,0 menit, 7,5 menit, dan 5,0 menit, secara berurutan. Sedangkan waktu tempuh bus di jalur khusus bus menurun rata-rata sebesar 60,2%. Namun demikian, pada kondisi *headway* bus sebesar 2,5 menit atau kurang, rata-rata tundaan kendaraan meningkat.

Wu, *et al.*, (2020) mengembangkan kerangka kerja pemrograman dinamis untuk memodelkan dan mengevaluasi sinyal prioritas bus pemotongan merah dan perpanjangan hijau di jalan arteri. Hasil

analisis menunjukkan manfaat sinyal prioritas bus sangat bergantung pada pengaturan sinyal dan lokasi halte bus, dan dengan seiring berkurangnya *headway* bus, manfaat marjinal dari penggunaan sinyal prioritas bus juga berkurang. Thodi *et al.*, (2021) mendesain sistem sinyal prioritas bus aktif berbasis pendekatan analitis untuk meningkatkan efisiensi komputasi dan optimalitas solusi pada pengendalian simpang bersinyal eksisting. Strategi prioritas diterapkan melalui pemotongan merah dan perpanjangan hijau pada simpang dua fase, dan menunjukkan pengurangan tundaan bus hingga 22% dengan dampak minimal terhadap kendaraan lain pada kondisi lalu lintas rendah hingga menengah. Pada kondisi frekuensi bus yang tinggi, efektivitas sinyal prioritas bus aktif cenderung menurun akibat meningkatnya kompleksitas skenario prioritas pada fase-fase konflik.

Ali, *et al.*, (2023) mengevaluasi kinerja sinyal prioritas bus di koridor bus sepanjang SR-7 (US-441) di Miami, Florida dengan menggunakan simulasi mikro VISSIM. Strategi sinyal prioritas bus pemotongan merah dan perpanjangan hijau diterapkan di simpang bersinyal yang saling terkoordinasi antar simpangnya. Kinerja operasional model integrasi sinyal prioritas bus dibandingkan dengan model tanpa integrasi sinyal prioritas bus. Dengan integrasi sinyal prioritas bus, sepanjang koridor bus mengalami pengurangan waktu tempuh hingga 8% dan pengurangan rata-rata tundaan kendaraan hingga 13,3%, baik untuk bus maupun semua kendaraan lainnya. Model sinyal prioritas bus dikembangkan oleh Hu, *et al.*, (2023) untuk kondisi jalur non-bus guna mengoptimalkan pengurangan emisi karbon kendaraan.

Model optimalisasi jadwal baru BRT yang dikembangkan oleh Ren, *et al.*, (2021) mengoptimalkan jadwal BRT di setiap halte dan sinyal prioritas bus pasif di setiap persimpangan secara bersamaan, dengan menggunakan *genetic algorithm*. Hasil penelitian menunjukkan pengurangan tundaan kendaraan lebih dari 15% dapat diperoleh apabila interval keberangkatan lebih dari 360 detik, volume lalu lintas kurang dari 300 kend/jam/lintas, dan jumlah total simpul kurang dari 60. Ni, *et al.*, (2022) mengevaluasi strategi sinyal prioritas bus pasif pada sistem BRT Taichung di Taiwan. Model optimasi berbasis simulasi mikro dikembangkan untuk mengkoordinasikan *offset* sinyal pada jalan arteri BRT guna meminimalkan keterlambatan bus BRT tanpa mengurangi tingkat layanan lalu lintas lainnya secara signifikan. Hasil analisis menunjukkan bahwa sinyal prioritas bus pasif dapat mengurangi 22% keterlambatan bus BRT dengan dampak yang kecil pada lalu lintas lainnya. Penelitian serupa oleh Kim, *et al.*, (2022) memadukan lampu lalu lintas di 15 simpang

bersinyal sepanjang koridor transit di Sejong, Korea, dengan menerapkan strategi sinyal prioritas bus pasif. Sinyal di simpang dioptimalisasi dengan menggunakan program MAXBAND. Model sinyal prioritas bus pasif yang diusulkan dapat mengurangi tundaan kendaraan sekitar 17% dibandingkan sistem yang beroperasi pada kondisi eksisting.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji penerapan strategi sinyal prioritas bus pasif dan aktif di berbagai konteks perkotaan, serta menunjukkan bahwa strategi tersebut dapat meningkatkan efisiensi waktu perjalanan dan keandalan layanan bus BRT. Namun, penelitian terdahulu belum mengulas secara mendalam keunggulan, keterbatasan, dan konsekuensi penerapan masing-masing strategi sinyal prioritas bus pasif dan aktif pada kondisi lalu lintas campuran (*mixed traffic*) dengan interaksi intens antara kendaraan pribadi yang heterogen dan transportasi publik, seperti yang terjadi di kawasan aglomerasi Sarbagita, Bali. Selain itu, strategi sinyal prioritas bus sangat dipengaruhi oleh karakteristik simpang, proporsi lalu lintas bus BRT, ketersediaan peralatan, dan alokasi anggaran, sehingga evaluasi kinerja melalui pemodelan transportasi menjadi langkah penting sebelum diterapkan di lapangan (Imran *et al.*, 2022).

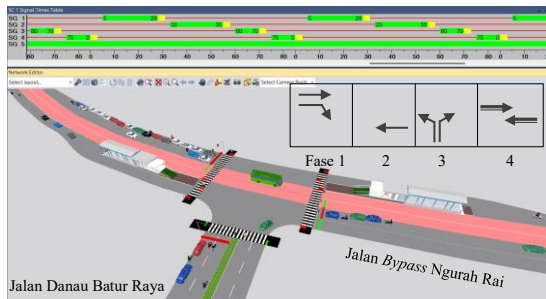
Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja strategi sinyal prioritas bus pasif dan aktif pada simpang bersinyal dalam sistem BRT, dengan menggunakan simulasi mikro VISSIM. Studi kasus dilakukan pada kawasan sistem BRT Sarbagita karena wilayah ini merepresentasikan karakteristik lalu lintas campuran antara kendaraan pribadi dan transportasi publik yang kompleks. Penilaian fokus pada efektivitas kedua strategi dalam meningkatkan keandalan layanan transportasi publik (bus) dan kelancaran arus lalu lintas melalui pengurangan rata-rata tundaan kendaraan, sehingga diperoleh pemahaman komprehensif mengenai keunggulan, keterbatasan, serta konsekuensi penerapan masing-masing strategi sinyal prioritas bus.

Metode

Pendekatan eksperimental diterapkan melalui pemodelan transportasi dengan bantuan perangkat lunak simulasi mikro VISSIM. Perangkat lunak ini merupakan sistem simulasi lalu lintas tingkat lanjut yang mereplikasi operasi jaringan transportasi berdasarkan perilaku mikroskopis serta dilengkapi fitur perancangan sinyal yang memungkinkan simulasi dan pengoptimalan waktu sinyal dengan berbagai strategi, seperti *fixed-time*, *vehicle-actuated*, dan *adaptive control*. Proses studi simulasi mencakup tiga tahapan utama, yaitu pembuatan model simulasi beserta proses kalibrasi

dan validasinya, penyusunan skenario model simulasi serta evaluasi kinerja model simulasi yang dihasilkan.

Simpang 3 Danau Batur Raya yang merupakan pertemuan Jalan *Bypass* Ngurah Rai dan Jalan Danau Batur Raya di Bali, bagian dari rencana jaringan BRT Sarbagita, dipilih sebagai studi kasus dan dimodelkan dengan simulasi mikro VISSIM untuk mengevaluasi kinerja strategi sinyal prioritas bus. Jalan *Bypass* Ngurah Rai eksisting merupakan jalan dengan tipe 4/2 D, yaitu memiliki empat lajur dua arah yang dipisahkan oleh median. Pada rencana pengembangan infrastruktur BRT Sarbagita, dua lajur bagian dalam pada ruas jalan tersebut akan dialokasikan sebagai lajur khusus bus BRT. Lokasi halte direncanakan berada di sisi kiri lajur khusus bus BRT setelah simpang. Gambar 1 memperlihatkan desain Simpang 3 Danau Batur Raya sebagai bagian dari infrastruktur BRT Sarbagita. Data input model simulasi diperoleh dari survei lapangan meliputi volume dan komposisi lalu lintas di simpang, kecepatan lalu lintas ruas jalan, waktu sinyal APILL, perilaku kendaraan, layanan transportasi publik, serta berbagai parameter simulasi lainnya.



Gambar 1. Geometri model simulasi Simpang 3 Bersinyal Jalan Bypass Ngurah Rai - Jalan Danau Batur Raya (Model simulasi dasar)

Mengingat kondisi lalu lintas di wilayah penelitian berbeda dengan di negara maju, di mana di negara maju lalu lintas berbasis lajur dengan lalu lintas homogen, sedangkan di wilayah penelitian lalu lintas cenderung tidak teratur dengan lalu lintas heterogen, maka model simulasi dasar perlu dikalibrasi dan divalidasi (Budiharjo, *et al.*, 2021). Parameter model simulasi dasar dikalibrasi untuk memastikan bahwa hasil keluaran model secara statistik sesuai dengan kondisi lapangan, melalui penyesuaian parameter *car following*, *lane change*, *desired speed distribution*, *reduced speed area*, dan *priority rules* (Park dan Schneeberger, 2003). Volume kendaraan yang masuk dan keluar jaringan jalan model simulasi dasar menjadi dasar perbandingan selama proses kalibrasi. Persyaratan kalibrasi divalidasi menggunakan rumus statistik Geoffrey E. Havers (GEH) (Gustavsson, 2007).

Setelah model simulasi dasar tervalidasi, model tersebut digunakan untuk membangun model simulasi skenario yaitu dengan mengganti sistem kontrol sinyal lalu lintas pada model dasar simulasi sesuai dengan strategi sinyal prioritas bus yang diterapkan. Model skenario simulasi yang digunakan terdiri dari tujuh skenario. Skenario-1 sampai Skenario-3 adalah model simulasi dengan strategi sinyal prioritas bus pasif, dan Skenario-4 sampai Skenario-7 adalah model simulasi dengan strategi sinyal prioritas bus aktif.

Skenario-1 adalah model simulasi dengan strategi sinyal prioritas bus pasif yaitu penyesuaian waktu siklus di mana pengaturan sinyal model simulasi dasar dioptimalkan jumlah fase dan durasi waktu hijau. Skenario-2 adalah model simulasi dengan pemisahan fase, di mana dalam satu siklus sinyal disediakan dua fase bus yang terpisah untuk memberikan lebih banyak kesempatan bus melintasi simpang. Skenario-3 adalah model simulasi dengan penyesuaian waktu siklus dengan pergerakan *early cut off*.

Skenario-4 adalah model simulasi dengan strategi sinyal prioritas bus aktif yaitu penyisipan fase di mana fase bus akan diaktifkan apabila bus terdeteksi akan melintasi simpang. Skenario-5 adalah model simulasi dengan pemotongan merah, di mana bus terdeteksi pada saat fase bus berada dalam kondisi kuning atau merah. Sistem kontrol akan memutus waktu sinyal pada fase lain yang sedang hijau untuk segera beralih ke fase bus dan mengaktifkannya. Pada Skenario-6 adalah model simulasi dengan perpanjangan hijau, di mana bus terdeteksi pada saat fase bus berada dalam kondisi hijau, waktu hijau akan diperpanjang hingga bus selesai melintasi simpang. Skenario-7 adalah model simulasi dengan pemotongan merah dan perpanjangan hijau.

Simulasi mikro VISSIM secara internal terdiri atas dua komponen utama. Pertama adalah model arus lalu lintas, di mana pengguna membangun jaringan secara grafis dan menghasilkan arus lalu lintas, dengan opsi penerapan pengendalian sinyal berbasis FTC. Kedua adalah model pengendalian sinyal, di mana pengguna memiliki kemampuan untuk mendefinisikan logika pengendalian sinyal aktuasi (*actuated*) atau adaptif (*adaptive*).

Logika pengendalian berbasis aktuasi atau adaptif tersebut dikembangkan dengan menggunakan VAP (*Vehicle Actuated Programme*). Strategi sinyal prioritas bus Skenario-4 sampai dengan Skenario-7 menggunakan logika pengendalian sinyal berbasis aktuasi, maka pengendalian sinyalnya dimodelkan dengan menggunakan VAP.

Efektivitas setiap strategi sinyal prioritas bus pada model simulasi dasar maupun model simulasi skenario dievaluasi berdasarkan rata-rata tundaan kendaraan yang dialami oleh bus dan keseluruhan lalu lintas di simpang dalam satu jam. Untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai keunggulan dan keterbatasan masing-masing strategi, dilakukan beberapa opsi perubahan jumlah frekuensi (*headway*) bus dan volume lalu lintas dalam studi simulasinya.

Hasil dan Pembahasan

Model simulasi dasar Simpang 3 Danau Batur Raya dibangun menggunakan simulasi mikro VISSIM *Licensed Version 2020-13*, dengan mengacu pada kondisi lapangan, di mana geometri simpang dan pengaturan sinyal lalu lintas didesain sesuai peruntukan simpang dalam sistem BRT. Simpang dikendalikan dengan sinyal FTC dengan empat fase, di mana fase 4 merupakan tambahan fase eksisting yang diperuntukkan bagi pergerakan bus BRT, lihat Gambar 1. Waktu hijau (*gt*) fase yaitu $gt_1=23$ detik, $gt_2=22$ detik, $gt_3=10$ detik, dan $gt_4=10$ detik, dengan *intergreen* (*ig*) sebesar 5 detik dan waktu siklus (*ct*) sebesar 85 detik.

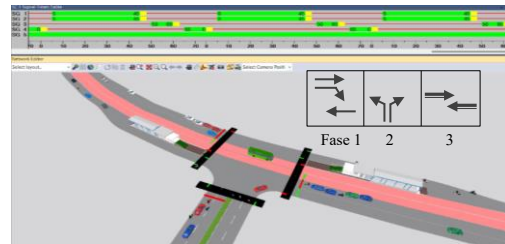
Tabel 1. Hasil uji validasi model simulasi dasar

Nama Jalan	Observasi (ken/jam)	Model (ken/jam)	GEH
Jl. Bypass Ngurah Rai (Timur) (<i>Inbound</i>)	1.080	1083	0,1
Jl. Danau Batur Raya (<i>Inbound</i>)	635	650	0,6
Jl. Bypass Ngurah Rai (Barat) (<i>Inbound</i>)	1.080	1052	0,9
Jl. Bypass Ngurah Rai (Timur) (<i>Outbound</i>)	1.130	1100	0,9
Jl. Danau Batur Raya (<i>Outbound</i>)	510	483	1,2
Jl. Bypass Ngurah Rai (Barat) (<i>Outbound</i>)	1.155	1125	0,9

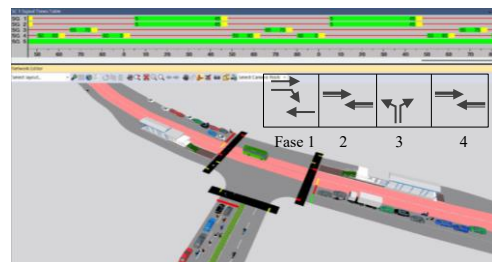
Efektivitas setiap strategi sinyal prioritas bus dievaluasi dengan membandingkan output dari masing-masing model simulasi yang dihasilkan selama satu jam. Model simulasi dijalankan sebanyak lima kali dengan variasi *random seeds* untuk menangani sifat stokastik lalu lintas yang dinamis. Parameter Simpang 3 Danau Batur Raya dikalibrasi agar menghasilkan output yang valid sesuai kondisi lapangan secara statistik. Output model simulasi yang dijadikan perbandingan dengan data observasi yaitu volume kendaraan yang masuk dan keluar jaringan jalan model simulasi. Model simulasi dasar Simpang 3 Danau Batur Raya dinyatakan valid apabila nilai $GEH < 5,0$. Hasil uji validasi model menggunakan rumus statistik GEH ditampilkan pada Tabel 1. Seluruh volume kendaraan yang masuk dan keluar dari jaringan

jalan dalam model simulasi memiliki nilai $GEH < 5,0$, sehingga model simulasi dasar Simpang 3 Danau Batur Raya dinyatakan valid.

Setelah tervalidasi, model simulasi dasar digunakan untuk membangun model simulasi skenario dengan mengganti sistem kontrol sinyal sesuai strategi prioritas bus. Skenario-1 menggunakan sinyal FTC dengan tiga fase yang dioptimalkan, sehingga menghasilkan waktu siklus lebih singkat dibandingkan Model simulasi dasar (Gambar 2). Waktu hijau fase yaitu $gt_1=40$ detik, $gt_2=10$ detik, dan $gt_3=10$, dengan $ig=5$ detik dan $ct=75$ detik. Model simulasi Skenario-2 beroperasi serupa dengan model simulasi Skenario-1, kecuali pada fase bus, dijalankan dua kali dalam satu siklus yaitu di fase 2 dan 4, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Waktu hijau fase yaitu $gt_1=40$ detik, $gt_2=10$ detik, $gt_3=10$ detik, dan $gt_4=10$, dengan $ig=5$ detik dan $ct=90$ detik.



Gambar 2. Model simulasi Skenario-1



Gambar 3. Model simulasi Skenario-2

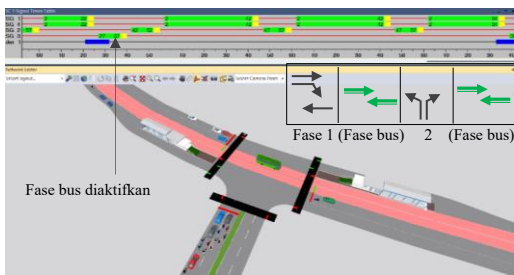
Model simulasi Skenario-3 menggunakan sinyal FTC dengan tiga fase yang dioptimalkan dengan konsep *early cut off*. Fase 1 merupakan gabungan arus lalu lintas lurus dari barat dan timur dengan bus BRT, lihat Gambar 4. Waktu hijau fase yaitu $gt_1=30$ detik, $gt_2=10$ detik, dan $gt_3=10$, dengan $ig=5$ detik dan $ct=65$ detik.

Model simulasi Skenario-4 menggunakan sinyal aktuasi dengan dua fase normal, di mana fase bus disisipkan antara fase 1 dan fase 2 (atau sebaliknya) ketika bus terdeteksi akan melintasi simpang lihat Gambar 5. Waktu hijau fase yaitu $gt_1=40$ detik, $gt_2=10$ detik, dan $gt_{\text{fasebus}}=10$ detik, dengan $ig=5$ detik dan ct variatif sesuai aktif tidaknya fase bus. Pengaturan fase model simulasi Skenario-5 serupa dengan model simulasi Skenario-3, kecuali apabila

bus BRT terdeteksi pada fase 2 atau 3, maka fase 1 akan diaktifkan untuk memberi waktu bus untuk melintasi simpang, lihat Gambar 6. Waktu hijau fase yaitu $gt_1=30$ detik, $gt_2=10$ detik, dan $gt_3=15$, dengan $ig=5$ detik dan ct variatif sesuai terdeteksi tidaknya bus BRT.



Gambar 4. Model simulasi Skenario-3

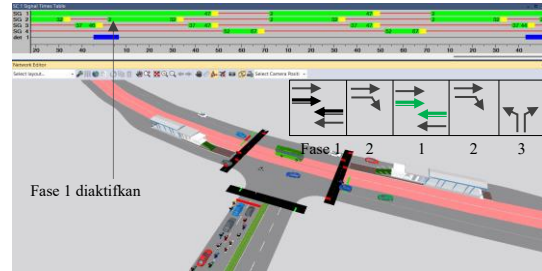


Gambar 5. Model simulasi Skenario-4

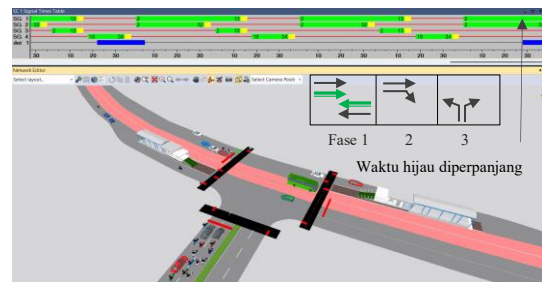
Pengaturan fase model simulasi Skenario-6 serupa dengan model simulasi Skenario-3, kecuali gt pada fase 1 diperpanjang hingga bus melintasi simpang apabila bus terdeteksi pada fase tersebut, lihat Gambar 7. Waktu hijau fase yaitu $gt_1=30$ detik (pada kondisi normal, bila bus terdeteksi durasi gt diperpanjang), $gt_2=10$ detik, dan $gt_3=15$, dengan $ig=5$ detik dan ct variatif sesuai terdeteksi tidaknya bus pada fase 1. Model simulasi Skenario-7 merupakan gabungan strategi sinyal prioritas bus Skenario-5 dan 6. Evaluasi kinerja seluruh strategi sinyal prioritas bus dilakukan dengan variasi *headway* bus 2,5 menit, 5,0 menit, dan 7,5 menit.

Gambar 8 dan 9 menunjukkan rata-rata tundaan bus dan keseluruhan lalu lintas di simpang untuk berbagai strategi sinyal prioritas bus pada seluruh kondisi *headway*. Model simulasi dasar serta Skenario-1 hingga Skenario-3 yang menggunakan sinyal FTC menunjukkan bahwa rata-rata tundaan keseluruhan lalu lintas di simpang relatif sama pada seluruh kondisi *headway* (Gambar 9). Namun, untuk rata-rata tundaan bus di simpang (Gambar 8), terdapat variasi hasil antara 1,8% hingga 48,3% pada model simulasi dasar hingga Skenario-3, di mana tundaan terendah terjadi pada *headway* 7,5 menit akibat frekuensi kedatangan bus yang lebih jarang. Sementara itu, pada Skenario-4 hingga Skenario-7 yang menerapkan sinyal aktuasi, baik rata-rata tundaan bus maupun rata-rata tundaan

keseluruhan lalu lintas di simpang menunjukkan pola yang variatif antar kondisi *headway*.



Gambar 6. Model simulasi Skenario-5



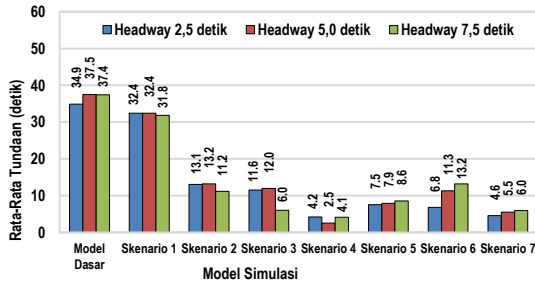
Gambar 7. Model simulasi Skenario-6

Penggunaan strategi sinyal prioritas bus pasif penyesuaian waktu siklus melalui pengurangan jumlah fase dan optimalisasi pergerakan lalu lintas dapat meminimalkan rata-rata tundaan bus dan keseluruhan lalu lintas di simpang. Skenario-1 dengan tiga fase menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan model simulasi dasar dengan empat fase. Skenario-3 dengan tiga fase dan optimalisasi pergerakan lalu lintas menggunakan konsep *early cut off* menghasilkan rata-rata tundaan bus dan keseluruhan lalu lintas di simpang yang paling optimal dibanding strategi sinyal prioritas bus pasif lainnya. Skenario-2, dengan memberikan dua fase bus dalam satu siklus, berhasil menurunkan rata-rata tundaan bus, namun menyebabkan rata-rata tundaan keseluruhan lalu lintas meningkat. Strategi ini memberi kesempatan lebih besar bagi bus untuk melintasi simpang, tetapi penambahan jumlah fase bus berdampak pada lamanya tundaan keseluruhan lalu lintas.

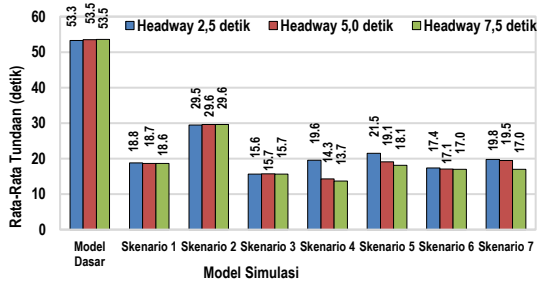
Strategi sinyal prioritas bus aktif penyisipan fase (Skenario-4) menggunakan konsep *early cut off* terbukti paling efektif dalam mengurangi rata-rata tundaan bus dan keseluruhan lalu lintas di simpang dibanding strategi sinyal prioritas bus aktif lainnya. Normalnya hanya diterapkan dua fase, namun ketika bus terdeteksi mendekati simpang, fase bus disisipkan secara dinamis di antara fase-fase normal untuk mengoptimalkan aliran lalu lintas sekaligus memberikan prioritas bagi bus. Skenario-5 mengaktifkan fase bus ketika bus terdeteksi akan melintasi simpang pada fase lain, sehingga layanan bus dapat lebih optimal dengan tundaan yang

rendah. Namun, konsekuensinya rata-rata tundaan keseluruhan lalu lintas di simpang menjadi tinggi.

Skenario-6 memperpanjang waktu hijau fase bus ketika bus terdeteksi akan melintasi simpang pada fase bus. Pola tundaan kendaraan pada skenario ini serupa dengan Skenario-5, yaitu semakin tinggi prioritas terhadap bus, semakin besar pula rata-rata tundaan keseluruhan lalu lintas di simpang. Secara umum, hal serupa juga terjadi pada Skenario-7 yang menggabungkan kedua strategi tersebut.



Gambar 8. Perbandingan rata-rata tundaan bus di simpang dengan opsi perubahan headway



Gambar 9. Perbandingan rata-rata tundaan keseluruhan lalu lintas di simpang dengan opsi perubahan headway

Penerapan strategi sinyal prioritas bus Skenario-1 hingga Skenario-7 menunjukkan adanya *trade-off* antara efisiensi layanan bus dan kinerja keseluruhan lalu lintas, di mana peningkatan prioritas bagi bus menurunkan rata-rata tundaan bus di simpang namun secara bersamaan meningkatkan tundaan keseluruhan lalu lintas di simpang. Semakin pendek *headway* bus, rata-rata tundaan keseluruhan lalu lintas di simpang cenderung meningkat, terutama pada strategi sinyal prioritas bus aktif. Hal ini disebabkan oleh pengaturan sinyal yang lebih sering mengalihkan waktu hijau ke fase bus, sehingga menimbulkan akumulasi antrean pada fase non-bus dan berdampak pada peningkatan tundaan keseluruhan lalu lintas. Strategi sinyal prioritas bus aktif pada Skenario-4 terbukti paling optimal, dengan kinerja yang umumnya lebih baik dibandingkan strategi sinyal prioritas bus pasif pada Skenario-3. Namun, pada kondisi *headway* 2,5 menit, kinerjanya menurun dibandingkan

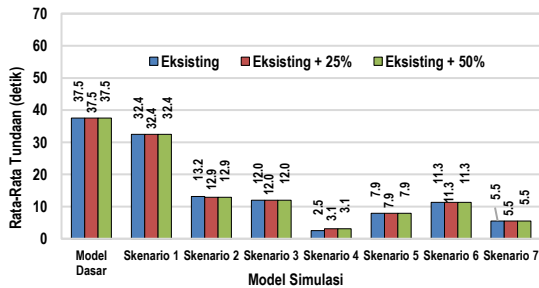
Skenario- 3, menunjukkan bahwa strategi aktif tidak selalu lebih unggul dari strategi pasif.

Untuk menganalisis sensitivitas kinerja seluruh strategi sinyal prioritas bus terhadap volume lalu lintas, volume lalu lintas pada jaringan jalan eksisting ditingkatkan secara bertahap sebesar lebih dari 25% dan 50%. Gambar 10 menunjukkan bahwa perubahan volume lalu lintas pada jaringan jalan tidak mempengaruhi rata-rata tundaan bus di simpang. Hal ini terjadi karena jumlah bus tidak berubah sehingga alokasi waktu hijau yang diberikan bagi bus juga tetap. Namun, kondisi ini berbeda dengan rata-rata tundaan keseluruhan lalu lintas di simpang yang dipengaruhi oleh volume lalu lintas. Semakin tinggi volume lalu lintas, semakin tinggi rata-rata tundaan keseluruhan lalu lintas di simpang.

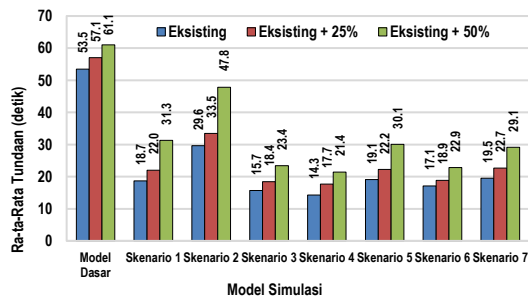
Seperti terlihat pada Gambar 11, volume lalu lintas terbukti sensitif terhadap strategi sinyal prioritas bus. Kenaikan volume lalu lintas secara signifikan berdampak pada peningkatan rata-rata tundaan keseluruhan lalu lintas di simpang, seiring dengan meningkatnya derajat kejenuhan simpang. Pada saat volume lalu lintas bertambah sebesar 50%, strategi sinyal prioritas bus pasif dan aktif terbaik yaitu Skenario-3 dan Skenario-4 menunjukkan kenaikan rata-rata tundaan keseluruhan lalu lintas yang relatif sama, masing-masing sebesar 49,0% dan 49,7%. Meskipun demikian, efektivitas kedua strategi tersebut masih mampu mempertahankan tingkat pelayanan simpang (*Level of Service/LOS*) C, yang menandakan bahwa kondisi lalu lintas di simpang tetap stabil.

Hasil penelitian ini memperkaya literatur terkait penerapan sinyal prioritas bus pasif dan aktif dengan menunjukkan bahwa efektivitas masing-masing strategi sangat bergantung pada kondisi operasional lalu lintas di lapangan. Sejalan dengan temuan Yulianto dan Setiono (2020), Wu *et al.*, (2020), dan Thodi *et al.*, (2021), hasil analisis mengindikasikan bahwa peningkatan frekuensi bus cenderung menurunkan efektivitas strategi sinyal prioritas bus aktif akibat meningkatnya kompleksitas pengaturan fase dan akumulasi antrean kendaraan pada fase non-bus. Namun, berbeda dari sebagian penelitian terdahulu yang menempatkan strategi aktif sebagai pendekatan yang lebih unggul, penelitian ini secara empiris menunjukkan bahwa pada kondisi *headway* bus yang pendek dan volume lalu lintas tinggi, strategi sinyal prioritas bus pasif mampu memberikan kinerja yang setara, bahkan lebih stabil, dalam menjaga kinerja keseluruhan lalu lintas dan tingkat pelayanan simpang. Temuan ini memperkuat hasil penelitian Lin *et al.*, (2017) yang menyatakan bahwa strategi sinyal prioritas bus aktif lebih sesuai

diterapkan pada kondisi arus bus rendah, sedangkan strategi sinyal prioritas bus pasif lebih efektif pada kondisi arus bus tinggi. Selain itu, adanya *trade-off* antara penurunan rata-rata tundaan bus dan peningkatan rata-rata tundaan keseluruhan lalu lintas menegaskan pentingnya penyesuaian strategi sinyal prioritas bus terhadap karakteristik simpang, jumlah fase, pola pergerakan lalu lintas, dan frekuensi layanan bus.



Gambar 10. Rata-rata tundaan bus di simpang dengan opsi perubahan volume lalu lintas



Gambar 11. Rata-rata tundaan keseluruhan lalu lintas di simpang dengan opsi perubahan volume lalu lintas

Penelitian ini menyediakan bukti empiris lintas-strategi yang menunjukkan bahwa strategi sinyal prioritas bus aktif tidak selalu lebih unggul dibandingkan strategi pasif, serta pemilihan strategi harus dilakukan secara kontekstual berdasarkan kondisi operasional lalu lintas di lapangan. Mengingat biaya investasi dan operasional sistem sinyal prioritas bus aktif relatif lebih tinggi dibandingkan strategi pasif, pemilihan strategi yang tepat memerlukan evaluasi yang cermat melalui penilaian kinerja berbagai teknologi sinyal prioritas bus, sebagaimana ditekankan oleh Thodi *et al.*, (2021), agar diperoleh kinerja simpang yang efektif dan efisien. Temuan ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan teori evaluasi sinyal prioritas bus, penyempurnaan metodologi analisis berbasis simulasi mikro, serta perumusan kebijakan implementasi sistem BRT yang berkelanjutan di kawasan perkotaan Indonesia, termasuk BRT Sarbagita Bali, Mebidang Medan, Metropolitan Cekungan Bandung, dan BRT Trans Semarang yang saat ini berada dalam tahap perencanaan.

Kesimpulan

Hasil studi simulasi menunjukkan bahwa strategi sinyal prioritas bus pasif paling efektif adalah Skenario-3, karena mampu menghasilkan rata-rata tundaan bus dan keseluruhan lalu lintas di simpang terendah pada seluruh kondisi *headway*. Strategi sinyal prioritas bus aktif, Skenario-4 terbukti menjadi pilihan paling optimal, bahkan menunjukkan kinerja yang lebih baik dibanding strategi sinyal prioritas bus pasif Skenario-3, kecuali pada kondisi *headway* 2,5 detik. Pada penerapan strategi sinyal prioritas bus aktif, penurunan *headway* bus cenderung meningkatkan tundaan keseluruhan lalu lintas di simpang. Peningkatan volume lalu lintas terbukti meningkatkan tundaan keseluruhan di simpang, namun pada kenaikan hingga 50%, Skenario 3 (pasif) dan Skenario 4 (aktif) masih mampu mempertahankan tingkat pelayanan simpang pada kategori C. Penelitian ini mengindikasikan bahwa kinerja strategi sinyal prioritas bus dipengaruhi oleh jumlah fase, pola pergerakan lalu lintas, dan frekuensi layanan bus, yang bervariasi sesuai strategi yang diterapkan. Strategi sinyal prioritas bus aktif tidak selalu lebih unggul dibanding strategi sinyal prioritas bus pasif. Oleh karena itu, pemilihan strategi sinyal prioritas bus yang tepat memerlukan evaluasi yang cermat melalui studi simulasi sebelum diimplementasikan di lapangan. Penerapan berbagai strategi sinyal prioritas bus bergantung pada karakteristik simpang, proporsi lalu lintas bus BRT, ketersediaan peralatan, dan anggaran. Dengan demikian, implementasi sinyal prioritas bus di lapangan diharapkan dapat menghasilkan kinerja yang efektif sekaligus efisiensi dari sisi pembiayaan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Sebelas Maret (UNS) yang telah mendanai penelitian ini melalui RKAT UNS Tahun Anggaran 2025 melalui skema Penelitian Penguatan Kapasitas Group Riset (PKGR-UNS) B dengan Nomor Perjanjian Penugasan Penelitian: 371/UN27.22/PT.01.03/2025.

Daftar Pustaka

- Ali, M. S., Kodi, J., Alluri, P., & Sando, T. (2023). Exploring the operational benefits of transit signal priority: A microsimulation-based analysis. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 12(4), 1080–1092. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2023.03.003>
- Anonim. (2020). *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2020 tentang Rencana*

Pembangunan Jangka Menengah Nasional 2020–2024. Jakarta: Pemerintah Republik Indonesia.

Bongardt, D., Stiller, L., Swart, A., & Wagner, A. (2019). *Sustainable urban transport avoid-shift-improve (A-S-I)*. Eschborn: GIZ.

Budiharjo, A., Rusmandani, P., Inggriani, K., & Mauliyda, M. A. (2021). Mikrosimulasi Junction Metering dalam Meningkatkan Kinerja Simpang Menggunakan Software Vissim. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 27(2), 187-194.

Canitez, F., Alpkokin, P., & Black, J. A. (2019). Agency costs in public transport systems: Net-cost contracting between the transport authority and private operators impact on passengers. *Cities*, 86, 154-166.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.09.022>

Gustavsson, F. N. (2007). *New transportation research progress*. New York: Nova Science Publisher, Inc.

Hassan, S. A., Hamzani, I. N. S., Sabli, A. R., & Sukor, N. S. A. (2021). Bus rapid transit system introduction in Johor Bahru: A simulation-based assessment. *Sustainability*, 13(8), 4437.
<https://doi.org/10.3390/su13084437>

Hu, X., Chen, X., Guo, J., Dai, G., Zhao, J., Long, B., Zhang, T., & Chen, S. (2023). Optimization model for bus priority control considering carbon emissions under non-bus lane conditions. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136747.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136747>

Imran, N. T., Girijan, A., & Vanajakshi, L. D. (2022). A review on bus signal priority systems. *Transportation in Developing Economies*, 8(2), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s40890-022-00167-1>

Institute for Transportation & Development Policy (ITDP). (2016). *The BRT standard*. New York ITDP.

Kim, M., Han, Y., & Kim, Y. (2022). Transit signal priority for an integrated traffic signal system. *Journal of Advanced Transportation*, 2022(1), 5458115. <https://doi.org/10.1155/2022/4869305>

Lin, Y., Yang, X., & Zou, N. (2017). Passive transit signal priority for high transit demand: model formulation and strategy selection. *Transportation Letters*, 11(3), 119-129.

<http://dx.doi.org/10.1080/19427867.2017.1295899>

Ni, Y.-C., Lo, H.-H., Hsu, Y.-T., & Huang, H.-J. (2022). Exploring the effects of passive transit

signal priority design on bus rapid transit operation: A microsimulation-based optimization approach. *Transportation Letters*, 14(1), 14–27.
<https://doi.org/10.1080/19427867.2020.1835524>

Park, B., & Schneeberger, J. (2003). Microscopic simulation model calibration and validation: Case study of VISSIM simulation model for a coordinated actuated signal system. *Transportation Research Record*, 1856(1), 185–192.

Pedro, M. J. G., & Macario, R. (2016). A review of general practice in contracting public transport services and transfer to BRT systems. *Research in Transportation Economics*, 59, 94–106.
<https://doi.org/10.1016/j.retrec.2016.04.001>

Pettersson, F., & Sorensen, C. H. (2020). Why do cities invest in bus priority measures? Policy, polity, and politics in Stockholm and Copenhagen. *Transport Policy*, 98, 178–185.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.08.010>

Ren, Y., Zhao, J., & Zhou, X. (2021). Optimal design of scheduling for bus rapid transit by combining with passive signal priority control. *International Journal of Sustainable Transportation*, 15(5), 407–418.
<https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1707070>

Thodi, B. T., Chilukuri, B. R., & Vanajakshi, L. (2021). An analytical approach to real-time bus signal priority system for isolated intersections. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 26(2), 145-167.
<https://doi.org/10.1080/15472450.2020.1797504>

Transport and Road Research Laboratory (TRRL). (1976). *Bus priority systems*. London: Department of the Environment.

Wu, K., Lu, M., & Guler, S. I. (2020). Modeling and optimizing bus transit priority along an arterial: A moving bottleneck approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 121, 102873. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102873>

Yulianto, B., & Setiono. (2020). Application of demand responsive bus priority traffic signal control at one-way system with contra flow bus lane under mixed traffic. *AIP Conference Proceedings*, 2217(1), 030112.
<https://doi.org/10.1063/5.0000625>

Zhou, L., Wang, Y., & Liu, Y. (2017). Active signal priority control method for bus rapid transit based on vehicle infrastructure integration. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6 (2), 99-109.
<https://doi.org/10.1016/j.ijst.2017.06.001>