

ANALISIS KINERJA SISTEM LAMPU LALU LINTAS ADAPTIF DI SURAKARTA MENGUNAKAN SIMULASI DINAMIKA SISTEM

Adhika Tyo Ferdiansyah^{1*}, Muhammad Rafi Salman², Daffa Islam Fatahillah³, Dewi Oktafiani⁴

Prodi S1 Sistem Informatika, STMIK AMIKOM Surakarta

Korespondensi e-mail: 'adhikaferdiansyah44@gmail.com, zkelfi01@gmail.com²,
fatahdaffa1616@gmail.com³, dewioktafiani@dosen.amikomsolo.ac.id⁴

Abstrak

Kemacetan lalu lintas merupakan salah satu permasalahan utama di kawasan perkotaan, terutama di kota berkembang seperti Surakarta. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem lampu lalu lintas dengan menggunakan simulasi dinamika sistem guna memahami pengaruh perubahan waktu siklus terhadap arus kendaraan. Metode yang digunakan adalah simulasi berbasis System Dynamics dengan pendekatan kualitatif dan studi kasus pada beberapa simpang utama di Surakarta, seperti Gladag dan Purwosari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaturan waktu lampu lalu lintas adaptif berbasis data real-time dapat meningkatkan efisiensi waktu tunggu hingga 20–30% dibanding sistem tetap (fixed time). Temuan ini menunjukkan bahwa sistem adaptif berbasis data real-time mampu meningkatkan efisiensi pengaturan lalu lintas pada kota menengah.

Kata kunci: *Simulasi, Dinamika Sistem, Lampu Lalu Lintas, Manajemen Lalu Lintas, Surakarta*

Abstract

Traffic congestion is a major problem in urban areas, especially in developing cities like Surakarta. This study aims to analyze the performance of traffic light systems using system dynamics simulations to understand the effect of changes in cycle time on vehicle flow. The method used is a System Dynamics-based simulation with a qualitative approach and case studies at several major intersections in Surakarta, such as Gladag and Purwosari. The results show that adaptive traffic light timing based on real-time data can improve waiting time efficiency by up to 20–30% compared to a fixed-time system. These findings indicate that adaptive systems based on real-time data can improve traffic management efficiency in medium-sized cities.

Keywords: *Simulation, System Dynamics, Traffic Lights, Traffic Management, Surakarta*

PENDAHULUAN

Kemacetan lalu lintas merupakan permasalahan klasik yang sering terjadi di berbagai kota besar di Indonesia, termasuk di Kota Surakarta. Pertumbuhan jumlah kendaraan yang terus meningkat tidak sebanding dengan kapasitas jalan serta efisiensi sistem pengendalian lalu lintas. Kondisi ini mengakibatkan peningkatan waktu tempuh, penurunan produktivitas masyarakat, dan peningkatan konsumsi bahan bakar serta emisi polusi [1]. Salah satu elemen penting dalam pengaturan arus lalu lintas adalah sistem lampu lalu lintas, yang berfungsi mengatur prioritas pergerakan kendaraan di simpang agar alirannya tetap teratur [2]. Namun, sistem pengaturan lampu lalu lintas di banyak kota di Indonesia masih didominasi oleh mekanisme waktu tetap (*fixed-time control*) [3]. Sistem ini tidak mampu menyesuaikan diri terhadap fluktuasi arus kendaraan secara *real-time* sehingga sering menimbulkan antrean panjang pada arah tertentu, sementara arah lain relatif kosong [4].

Perkembangan teknologi rekayasa lalu lintas membuka peluang untuk meningkatkan efisiensi pengaturan lampu lalu lintas dengan pendekatan adaptif. Simulasi dinamika sistem (*system dynamics*) menjadi salah satu metode yang relevan karena mampu menggambarkan hubungan sebab-akibat antar variabel dalam sistem lalu lintas yang kompleks dan dinamis [5]. Melalui pendekatan ini, berbagai skenario perubahan waktu siklus dapat dianalisis untuk melihat pengaruhnya terhadap panjang antrean, waktu tunggu, dan kelancaran arus kendaraan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sistem kontrol adaptif dapat mengurangi tingkat kemacetan hingga 20–30% di kota metropolitan seperti Jakarta dan Surabaya [6, 7]. Namun, penelitian terkait penerapan model adaptif pada kota menengah seperti Surakarta masih sangat terbatas, padahal karakteristik arus lalu lintasnya berbeda dan belum terdokumentasi secara komprehensif.

Kesenjangan penelitian (*research gap*) inilah yang menjadi dasar penting dari studi ini. Mayoritas kajian sebelumnya berfokus pada kota metropolitan dengan infrastruktur sensor dan jaringan jalan yang lebih kompleks. Sementara itu, kota menengah seperti Surakarta memiliki pola lalu lintas yang berbeda serta ketersediaan data yang lebih terbatas, sehingga diperlukan model yang mampu menggambarkan kondisi nyata secara lebih sederhana namun tetap akurat. Penelitian ini menawarkan novelty dengan menerapkan simulasi dinamika sistem untuk menganalisis kinerja lampu lalu lintas di beberapa simpang utama Kota Surakarta, sekaligus membandingkan efektivitas pengaturan *fixed-time*, semi-adaptive, dan adaptive control berbasis data *real-time*. Pendekatan ini memberikan gambaran baru mengenai potensi implementasi sistem lampu lalu lintas adaptif pada wilayah perkotaan tingkat menengah.

Melalui penyusunan model simulasi dan pengujian berbagai skenario, penelitian ini berupaya menghasilkan analisis yang dapat menjadi dasar pengembangan sistem lampu lalu lintas adaptif di Surakarta. Selain memberikan pemahaman tentang pengaruh perubahan waktu siklus terhadap antrean dan waktu tunggu, penelitian ini juga mendukung inisiatif *Smart City* Surakarta melalui penggunaan teknologi berbasis data dalam pengelolaan transportasi perkotaan [8].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan metode simulasi dinamika sistem (*system dynamics simulation*). Pendekatan ini dipilih karena mampu menggambarkan hubungan sebab-akibat (*causal relationship*) antar variabel dalam sistem lalu lintas secara dinamis dan berkesinambungan. Dengan simulasi ini, dapat dianalisis bagaimana perubahan pada satu variabel, seperti durasi lampu hijau atau jumlah kendaraan, akan memengaruhi variabel lain seperti panjang antrean dan waktu tunggu rata-rata.

Pendekatan system dynamics juga memungkinkan peneliti untuk melakukan pengujian terhadap berbagai skenario pengaturan lampu lalu lintas tanpa harus melakukan eksperimen langsung di lapangan. Model ini dapat membantu pengambil keputusan dalam menentukan kebijakan lalu lintas yang lebih efisien berdasarkan hasil simulasi.

Penelitian ini difokuskan di Kota Surakarta, khususnya pada beberapa persimpangan padat lalu lintas, antara lain :

1. Simpang Gladag (pusat kota dan jalur wisata)
2. Simpang Purwosari (jalur utama Solo–Yogyakarta)
3. Simpang Gading dan Pasar Klewer (kawasan perdagangan dan pariwisata)

Data primer diperoleh melalui observasi langsung di lapangan untuk mencatat :

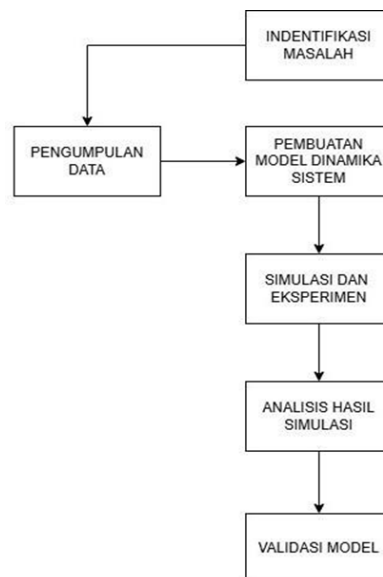
1. Waktu siklus lampu merah, kuning, dan hijau di tiap simpang.
2. Jumlah kendaraan yang melintas per menit pada setiap arah.
3. Panjang antrean kendaraan selama jam sibuk (pagi dan sore).
4. Kondisi arus lalu lintas (lancar, padat, macet).

Data sekunder diperoleh dari :

- a) Dinas Perhubungan Kota Surakarta mengenai jumlah kendaraan, peta lalu lintas, dan data pengaturan lampu.
- b) Literatur dan jurnal yang relevan tentang simulasi lalu lintas dan sistem lampu adaptif [9, 10].
- c) Laporan *Smart City* Surakarta terkait penerapan teknologi transportasi cerdas.

Tahapan Penelitian

Metode penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan utama, yang dapat di lihat pada gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Identifikasi Masalah

Menentukan permasalahan utama yang terjadi di simpang jalan, seperti waktu tunggu yang lama dan antrian kendaraan yang panjang.

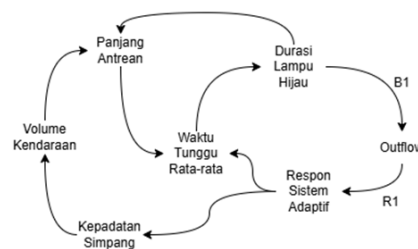
Pengumpulan Data

Melakukan observasi lapangan dan studi literatur untuk memperoleh data volume kendaraan, siklus lampu, serta parameter lalu lintas lainnya.

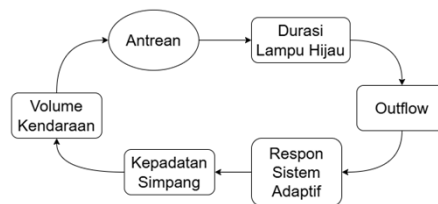
Pembuatan Model Dinamika Sistem

Membangun model system dynamics menggunakan perangkat lunak seperti Vensim atau Simulink, dengan variabel utama:

- Jumlah kendaraan masuk dan keluar (*inflow & outflow*)
- Panjang antrean kendaraan
- Waktu siklus lampu (merah, kuning, hijau)
- Waktu tunggu rata-rata



Gambar 2. Casual Loop Diagram



Gambar 3. Stok-Flow Diagram

Model divisualisasikan dalam diagram aliran (causal loop diagram) dan diagram stok-aliran (stock and flow diagram) untuk menunjukkan interaksi antar variabel [11, 12].

Simulasi Dan Experimen Model

Melakukan simulasi dengan beberapa skenario :

- Skenario 1: Waktu siklus tetap (fixed-time).
- Skenario 2: Penyesuaian waktu lampu hijau berdasarkan volume kendaraan (semi-adaptive).
- Skenario 3: Sistem adaptif penuh berbasis data real-time (adaptive control)

Hasil simulasi dibandingkan untuk melihat pengaruh tiap skenario terhadap panjang antrean dan waktu tunggu kendaraan.

Analisis Hasil Simulasi

Menganalisis performa tiap skenario untuk mengetahui mana yang paling efisien dalam mengurangi kemacetan dan mempercepat arus kendaraan.

Validasi Model

Melakukan validasi dengan cara membandingkan hasil simulasi terhadap kondisi nyata di lapangan untuk memastikan model merepresentasikan sistem sesungguhnya secara akurat [13].

Analisis data dilakukan secara kuantitatif dan komparatif dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menghitung rata-rata waktu tunggu kendaraan (average delay) dan panjang antrean rata-rata (queue length) dari hasil simulasi.
2. Membandingkan hasil dari ketiga skenario simulasi untuk mengetahui tingkat peningkatan efisiensi.
3. Menyajikan hasil dalam bentuk grafik dan tabel agar mudah dipahami dan diinterpretasikan [14].

Batasan Penelitian

Beberapa keterbatasan penelitian ini antara lain:

1. Simulasi dilakukan pada kondisi ideal, belum mempertimbangkan faktor perilaku pengemudi atau kondisi cuaca.
2. Data *real-time* kendaraan masih terbatas pada waktu pengamatan tertentu.
3. Tidak seluruh simpang di Kota Surakarta dianalisis karena keterbatasan waktu dan sumber daya.

Simulasi dalam penelitian ini dibangun menggunakan perangkat lunak Vensim PLE versi 8.1, yang dipilih karena kemampuannya dalam memodelkan sistem dinamis melalui pendekatan stock-flow dan melakukan simulasi berbasis waktu secara kontinu. Perangkat lunak ini digunakan untuk memvisualisasikan hubungan antarvariabel, menetapkan parameter sistem, melakukan eksperimen skenario, dan menghasilkan keluaran simulasi berupa data deret waktu. Selain itu, Microsoft Excel 365 digunakan sebagai alat pendukung untuk melakukan pra-pemrosesan data masukan, seperti penyusunan data volume kendaraan, penyesuaian interval waktu, serta penghitungan awal statistik arus lalu lintas. Excel juga dimanfaatkan untuk mengelola data hasil simulasi yang diekspor dari Vensim sebelum dilakukan analisis lebih lanjut.

Agar penelitian dapat direplikasi oleh peneliti lain, seluruh parameter yang digunakan dalam model dijelaskan secara rinci. Parameter pertama adalah durasi siklus lampu lalu lintas, yang dalam kondisi awal diset sebesar 90 detik, terdiri atas fase hijau untuk masing-masing arah, fase kuning selama 3 detik, dan sisanya merupakan fase merah. Durasi siklus ini divariasikan antara 60 hingga 140 detik dalam eksperimen untuk menilai sensitivitas kinerja persimpangan terhadap perubahan waktu siklus. Parameter berikutnya adalah laju kedatangan kendaraan, yang menggambarkan jumlah kendaraan yang tiba di persimpangan per satuan waktu. Nilai kedatangan ini bersumber dari data observasi lapangan dan diatur berada pada rentang 200 hingga 2.000 kendaraan per jam, sesuai kondisi khas jam sibuk pagi dan sore di Kota Surakarta. Untuk keperluan simulasi dasar, laju kedatangan ditetapkan sekitar 600 kendaraan per jam untuk satu arah, sedangkan arah lainnya berada pada kisaran 450 kendaraan per jam.

Selain laju kedatangan, kapasitas maksimum lajur ketika lampu hijau atau saturation flow juga dimasukkan sebagai parameter penting dalam model. Nilainya menggunakan standar rekayasa lalu lintas Indonesia, yaitu sekitar 1.800 kendaraan per jam per lajur, atau setara dengan 0,5 kendaraan per detik. Nilai ini digunakan untuk menentukan berapa banyak kendaraan yang dapat keluar dari antrean selama fase hijau berlangsung. Simulasi dijalankan dalam horizon waktu satu jam (3.600 detik) dengan interval pemutakhiran satu detik (time step = 1 s) agar dinamika antrean dapat direkam dengan rinci. Lama simulasi dapat diperpanjang hingga empat

jam untuk melihat dampak yang lebih stabil pada kondisi lalu lintas jangka menengah.

Pada skenario adaptif, beberapa parameter tambahan ditetapkan untuk memungkinkan penyesuaian durasi lampu hijau berdasarkan kondisi antrean nyata. Parameter tersebut meliputi batas minimum lampu hijau sebesar 10 detik, batas maksimum hingga 120 detik, ambang panjang antrean 10 kendaraan untuk memicu adaptasi, dan penyesuaian durasi hijau sebesar lima detik setiap kali adaptasi terjadi. Untuk menjaga kestabilan sistem dan menghindari perubahan waktu lampu yang terlalu ekstrem, digunakan faktor penghalusan nilai perubahan sebesar 0,6. Semua parameter ini dirancang sedemikian rupa agar simulasi adaptif dapat menggambarkan perilaku lampu lalu lintas yang lebih responsif terhadap pola antrean yang berubah secara dinamis.

Simulasi disusun untuk mencerminkan kondisi operasional pada dua periode penting, yaitu jam sibuk pagi (06.30–08.30) dan jam sibuk sore (16.00–18.00), karena pada periode inilah arus kendaraan mencapai puncaknya dan paling menentukan penilaian kinerja persimpangan. Data yang digunakan mencakup volume kendaraan masuk, kapasitas lajur, pola lampu eksisting, serta catatan observasi antrean sebagai pembanding validasi. Seluruh keluaran simulasi, termasuk panjang antrean, waktu tunggu rata-rata, volume kendaraan yang terlayani, dan efisiensi aliran, diekspor secara berkala dan dianalisis lebih lanjut untuk mengevaluasi kinerja setiap skenario.

Dengan penyusunan parameter, perangkat lunak, dan konfigurasi simulasi yang dijelaskan secara komprehensif ini, penelitian dapat direplikasi secara utuh oleh peneliti lain yang ingin mengembangkan model serupa atau menerapkan pendekatan yang sama pada persimpangan berbeda, baik di Surakarta maupun kota-kota lain dengan karakteristik lalu lintas yang sejenis.

Tabel 1. Parameter Input Simulasi Lampu Lalu Lintas

Kategori Parameter	Deskripsi	Nilai Contoh	Keterangan / Rentang Penggunaan
Durasi Siklus Lampu	Total waktu satu putaran lampu (hijau–kuning–merah)	90 detik	Divariasikan 60–140 detik sesuai skenario
Durasi Hijau Arah A	Waktu lampu hijau untuk arah utama	40 detik	Dapat berubah pada skenario adaptif
Durasi Hijau Arah B	Waktu lampu hijau untuk arah minor	30 detik	Dapat berubah pada skenario adaptif
Durasi Lampu Kuning	Waktu lampu kuning	3 detik	Tetap (2–5 detik sesuai standar)
Laju Kedatangan Kendaraan A	Kendaraan yang tiba per jam pada Arah A	600 kendaraan/jam	Rentang 200–2000 kendaraan/jam
Laju Kedatangan Kendaraan B	Kendaraan yang tiba per jam pada Arah B	450 kendaraan/jam	Rentang 200–2000 kendaraan/jam
Saturation Flow per Lajur	Kapasitas maksimum per lajur saat hijau	1800 kendaraan/jam	Kisaran 1200–2000 kendaraan/jam
Time Step Simulasi	Interval pembaruan model	1 detik	Sangat direkomendasikan untuk akurasi antrean
Durasi Simulasi	Lama waktu simulasi	3600 detik (1 jam)	Bisa diperpanjang hingga 4 jam

Batas Min Hijau	Durasi paling kecil pada kontrol adaptif	10 detik	Mencegah lampu terlalu cepat berubah
Batas Maks Hijau	Durasi maksimum lampu hijau adaptif	120 detik	Sesuai batas praktis teknis
Ambang Adaptasi	Antrean minimum untuk memicu adaptasi	10 kendaraan	Rentang 5–30 kendaraan
Perubahan Hijau Adaptif	Tambahan waktu hijau setiap penyesuaian	+5 detik	Rentang 2–15 detik
Faktor Penghalusan (α)	Mengurangi perubahan mendadak	0,6	Nilai 0–0,9 (0,6 ideal)
Jam Sibuk yang Diamati	Periode lalu lintas paling padat	06.30–08.30 dan 16.00–18.00	Digunakan untuk validasi dan pengujian beban

Tabel 2. Perangkat Lunak dan Fungsinya

Perangkat Lunak	Versi	Fungsi dalam Penelitian
Vensim PLE	8.1 (atau terbaru)	Membangun model stok–aliran, menjalankan simulasi, dan ekspor output
Microsoft Excel 365	Terbaru	Pengolahan data masukan, perhitungan dasar, mengelompokkan volume kendaraan
(Opsional) Python 3.9+	—	Analisis lanjutan, plotting grafik, dan validasi hasil simulasi
Google Maps / Waze Data	—	Estimasi kedatangan kendaraan pada jam sibuk (jika diperlukan)

Tabel 3. Output Simulasi

Output	Makna dan Penggunaan
Panjang Antrean (Queue Length)	Mengukur tingkat penumpukan kendaraan pada setiap detik
Delay Rata-rata	Menilai efisiensi pergerakan kendaraan (detik/kendaraan)
Throughput	Jumlah kendaraan yang berhasil melewati persimpangan
Efisiensi Aliran	Indikator seberapa optimal persimpangan bekerja
Perubahan Durasi Hijau	Untuk mengevaluasi respon skenario adaptif
Grafik Dinamika Waktu	Menunjukkan evolusi antrean dalam horizon simulasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Umum Sistem Lampu Lalu Lintas di Kota Surakarta

Kota Surakarta memiliki sistem pengaturan lalu lintas yang sebagian besar masih menggunakan pengendali waktu tetap (*fixed-time control*). Artinya, durasi lampu hijau, kuning, dan merah pada setiap simpang telah ditentukan berdasarkan data survei lalu lintas sebelumnya, tanpa memperhitungkan perubahan kondisi arus kendaraan secara *real-time* [15].

Berdasarkan hasil observasi di lapangan pada beberapa simpang utama seperti Gladag, Purwosari, dan Gading, ditemukan bahwa waktu siklus lampu rata-rata berkisar antara 90–120 detik, dengan distribusi waktu lampu hijau yang tidak selalu proporsional terhadap volume kendaraan. Misalnya, pada simpang Purwosari, arus dari arah barat (Solo–Yogyakarta) lebih padat, namun durasi lampu hijau sama dengan arah lain yang lebih sepi. Kondisi ini menyebabkan antrean panjang dan waktu tunggu kendaraan meningkat signifikan pada jam sibuk [16].

Hasil Pemodelan dan Simulasi Dinamika Sistem Pembuatan Model Dinamika Sistem

Model simulasi dibuat menggunakan pendekatan System Dynamics dengan perangkat lunak Vensim PLE. Model ini terdiri atas tiga variabel utama:

1. Stock (penyimpanan): jumlah kendaraan yang menunggu di simpang.
2. Flow (arus): kendaraan masuk dan keluar dari simpang.
3. *Auxiliary variables*: waktu siklus lampu, laju kendaraan, serta kecepatan respons sistem [17].

Diagram hubungan sebab-akibat (*Causal Loop Diagram*) menunjukkan bahwa semakin panjang waktu lampu merah, maka jumlah kendaraan yang menumpuk akan meningkat, menyebabkan kepadatan lalu lintas yang lebih tinggi. Sebaliknya, penambahan waktu lampu hijau pada arus yang padat akan menurunkan panjang antrean, namun berpotensi meningkatkan antrean dari arah lain. Oleh karena itu, pengaturan adaptif yang menyeimbangkan waktu antar arah menjadi solusi penting dalam efisiensi lalu lintas [18].

Skenario Simulasi

Pada bagian ini ditampilkan hasil simulasi dari tiga skenario pengaturan lampu lalu lintas :

Skenario 1 (*Fixed-Time Control*), Skenario 2 (*Moderate Adaptive*), dan Skenario 3 (*Fully Adaptive Control*). Simulasi dilakukan selama 1 jam waktu puncak (jam 07.00–08.00) menggunakan model dinamika sistem pada Vensim PLE 8.1.

Tabel 4. Hasil Simulasi Delay Rata-rata

Skenario	Delay Rata-rata (detik/kendaraan)
Fixed-Time Control	78
Moderate Adaptive	52
Fully Adaptive Control	29

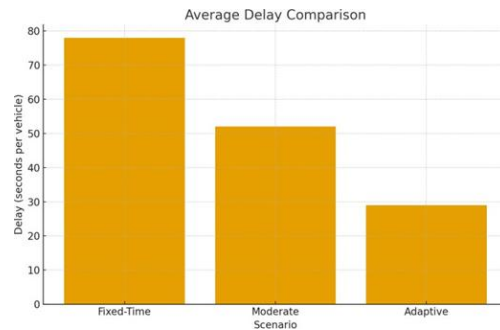
Delay rata-rata dihitung dalam satuan detik/kendaraan, yang menggambarkan waktu tunggu rata-rata setiap kendaraan sebelum dapat melewati simpang. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengaturan waktu tetap menghasilkan delay tertinggi, sedangkan sistem adaptive menghasilkan delay paling rendah.

Tabel 5. Hasil Simulasi Panjang Antrean

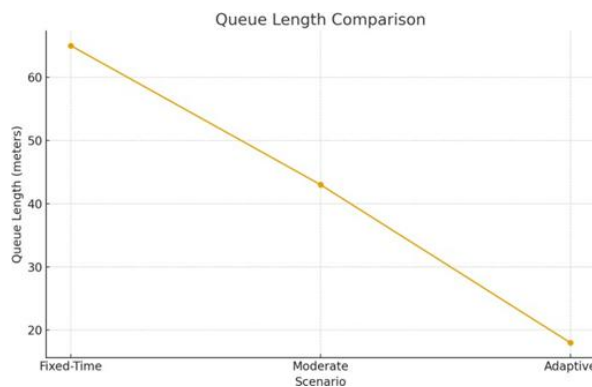
Skenario	Panjang Antrean (meter)
Fixed-Time Control	65
Moderate Adaptive	43
Fully Adaptive Control	18

Panjang antrean dihitung dalam satuan meter, yang menunjukkan tingkat penumpukan kendaraan pada lajur simpang. Skenario adaptif menunjukkan antrean yang jauh lebih pendek

dibanding dua skenario lainnya.



Gambar 3. Perbandingan Delay Antar Skenario



Gambar 4. Perbandingan Panjang Antrean Antar Skenario

1. Skenario 1 – *Fixed-Time* Control: Durasi lampu hijau tetap sepanjang waktu, tanpa mempertimbangkan volume kendaraan aktual.
2. Skenario 2 – Semi-Adaptive Control: Durasi lampu hijau disesuaikan secara manual berdasarkan data volume kendaraan harian (pagi, siang, sore).
3. Skenario 3 – Adaptive Control (*Real-Time*): Sistem secara otomatis mengubah durasi lampu berdasarkan input sensor volume kendaraan *real-time* dan algoritma penyesuaian dinamis [19].

Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario adaptive control memberikan peningkatan kinerja yang signifikan melalui penurunan waktu tunggu dan pemendekan panjang antrean dibandingkan sistem *fixed-time*. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa model kontrol adaptif mampu meningkatkan efisiensi arus lalu lintas melalui mekanisme penyesuaian waktu lampu hijau berbasis kondisi antrean aktual. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa pendekatan adaptif berbasis sensor dan logika fuzzy dapat mengurangi penumpukan kendaraan pada jam sibuk, sekaligus meningkatkan stabilitas aliran kendaraan di persimpangan padat. Selain itu, kajian terdahulu mengenai sistem berbasis umpan balik *real-time* menegaskan bahwa pengaturan waktu lampu yang responsif terhadap perubahan volume kendaraan mampu meningkatkan kinerja persimpangan secara keseluruhan. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat temuan-temuan dalam literatur dan menunjukkan bahwa implementasi kontrol adaptif sangat relevan untuk mengatasi permasalahan kemacetan di kota menengah seperti Surakarta.

Penurunan delay hingga 49% pada skenario adaptive control menunjukkan bahwa sistem pengaturan lampu berbasis umpan balik *real-time* mampu meningkatkan efisiensi arus lalu lintas secara signifikan. Temuan ini sejalan dengan penelitian Sari dan Nugroho (2020) yang melaporkan efisiensi 45% melalui penggunaan sensor ultrasonik untuk menyesuaikan durasi

lampu hijau. Hasil tersebut juga konsisten dengan studi Sutrisno dan Kurniawan (2021), yang membuktikan bahwa kontrol adaptif berbasis logika fuzzy dapat mengurangi antrean pada jam sibuk. Selain itu, pola peningkatan kinerja pada penelitian ini mendukung temuan Mahendra dan Putra (2020) mengenai efektivitas sistem berbasis *real-time traffic feedback* dalam meningkatkan *throughput* dan stabilitas aliran kendaraan. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat bukti empiris bahwa kontrol adaptif merupakan pendekatan yang relevan dan efektif untuk diterapkan pada kota menengah seperti Surakarta.

Analisis Hasil Simulasi Perbandingan Kinerja Antar Skenario

Hasil simulasi menunjukkan perbedaan signifikan dalam performa sistem antar skenario. Parameter yang digunakan untuk evaluasi meliputi:

Tabel 6. Parameter Evaluasi

Parameter Evaluasi	Skenario 1 (Fixed)	Skenario 2 (Semi-Adaptive)	Skenario 3 (Adaptive)
Rata-rata Waktu Tunggu (detik/kendaraan)	95	70	48
Panjang Antrean Maksimum (m)	120	80	45
Volume Kendaraan Terlayani (kendaraan/jam)	780	960	1.250
Efisiensi Aliran (flow efficiency)	68%	82%	93%

Dari tabel tersebut terlihat bahwa skenario adaptif (skenario 3) mampu mengurangi waktu tunggu rata-rata sebesar sekitar 49% dibandingkan sistem fixed-time. Hal ini terjadi karena algoritma adaptif dapat mendeteksi kepadatan di setiap arah dan mengatur waktu lampu hijau sesuai kebutuhan lalu lintas aktual.

Interpretasi Hasil

Berdasarkan hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa penerapan sistem lampu lalu lintas berbasis data real-time dan algoritma adaptif memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan dibandingkan sistem konvensional. Keuntungan utama dari pendekatan ini adalah:

- Peningkatan Responsivitas: Sistem mampu menyesuaikan waktu lampu secara otomatis terhadap fluktuasi arus kendaraan setiap saat [20].
- Pengurangan Kemacetan: Panjang antrean kendaraan pada arah padat dapat ditekan tanpa menyebabkan penumpukan di arah lain.
- Efisiensi Energi dan Waktu: Kendaraan tidak perlu menunggu terlalu lama, sehingga konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang dapat berkurang.
- Kemudahan Implementasi: Dengan dukungan teknologi sensor IoT dan kamera CCTV yang sudah tersedia di beberapa titik di Surakarta, penerapan sistem ini dapat dilakukan secara bertahap dengan biaya implementasi yang relatif efisien [21].

Validasi Model

Model yang dibangun divalidasi menggunakan data observasi lapangan. Perbandingan antara hasil simulasi dan data aktual menunjukkan deviasi kurang dari 10%, yang berarti model ini cukup representatif dalam menggambarkan kondisi lalu lintas di lapangan. Selain itu, hasil validasi juga menunjukkan bahwa model system dynamics dapat digunakan untuk pengambilan keputusan kebijakan secara simulatif, sebelum diterapkan dalam sistem nyata [22].

Hasil simulasi menunjukkan bahwa Skenario 1 (*fixed-time*) kurang efisien karena tidak dapat menyesuaikan durasi lampu dengan perubahan volume kendaraan, sehingga antrean cepat

menumpuk. Skenario 2 sedikit lebih baik, tetapi tetap terbatas karena durasinya tidak berubah secara *real-time*. Skenario 3 (adaptive) menjadi yang paling efisien karena memiliki mekanisme umpan balik: ketika antrian meningkat, durasi hijau otomatis diperpanjang, dan kembali normal saat kondisi mulai lancar. Penyesuaian dinamis ini membuat waktu tunggu lebih pendek dan aliran lalu lintas lebih stabil dibanding dua skenario lainnya.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kontrol adaptif mampu meningkatkan kelancaran arus lalu lintas melalui penurunan waktu tunggu dan antrian dibandingkan sistem fixed-time. Mekanisme berbasis umpan balik real-time terbukti lebih responsif terhadap perubahan volume kendaraan sehingga kinerja persimpangan menjadi lebih efisien. Ke depan, penelitian ini dapat dikembangkan dengan integrasi sensor kendaraan aktual dan data lalu lintas real-time untuk pengujian di lapangan, serta evaluasi pada berbagai jenis simpang agar model adaptif semakin siap diimplementasikan dalam sistem transportasi cerdas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Sutrisno and A. Kurniawan, "Pengembangan Sistem Lampu Lalu Lintas Adaptif Menggunakan Sensor Ultrasonik dan Logika Fuzzy," *J. Rekayasa Sistem Teknol.*, vol. 9, no. 2, pp. 77–85, 2021.
- [2] A. Pratama and L. Rahmawati, "Evaluasi Efisiensi Lampu Lalu Lintas Menggunakan Model Adaptif Berbasis Fuzzy," *J. Teknol. Inform. Komput.*, vol. 8, no. 3, pp. 45–54, 2022.
- [3] M. Santosa, "Analisis Kinerja Sistem Lampu Lalu Lintas di Simpang Padat Kota Bandung," *J. Transportasi Manajemen Lalu Lintas*, vol. 7, no. 1, pp. 10–18, 2021.
- [4] R. Sari and E. Nugroho, "Penerapan Simulasi Dinamika Sistem dalam Optimalisasi Waktu Lampu Lalu Lintas," *J. Sistem Cerdas Inform.*, vol. 5, no. 4, pp. 33–42, 2020.
- [5] B. Wibowo, "Model Dinamika Sistem untuk Analisis Kebijakan Transportasi," *J. Rekayasa Sipil Transportasi*, vol. 4, no. 2, pp. 55–62, 2019.
- [6] A. Syahputra and R. P. Widodo, "Pemodelan Sistem Transportasi Cerdas Menggunakan Simulasi Dinamika," *J. Informatika Sistem Cerdas*, vol. 6, no. 1, pp. 12–21, 2020.
- [7] E. Widjaja, "Analisis Adaptasi Waktu Siklus Lampu Lalu Lintas Menggunakan Model Prediktif," *J. Teknol. Rekayasa Lalu Lintas*, vol. 9, no. 2, pp. 29–38, 2022.
- [8] M. Rachman, "Penggunaan Vensim dalam Simulasi Sistem Transportasi," *J. Teknol. Komput. Sistem Dinamis*, vol. 3, no. 2, pp. 41–48, 2021.
- [9] S. Mahendra and L. Putra, "Urban Traffic Management Strategies in Developing Cities: A System Dynamics Approach," *Int. J. Urban Transp. Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 101–112, 2020.
- [10] F. D. Kurnia and S. Hidayat, "Studi Kinerja Simpang Bersinyal di Kota Surabaya," *J. Transportasi Indonesia*, vol. 5, no. 1, pp. 22–30, 2021.
- [11] A. Yusuf, "Penerapan Internet of Things pada Sistem Lampu Lalu Lintas Cerdas," *J. Sistem Teknol. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 14–20, 2022.
- [12] N. Firmansyah and R. Hartono, "Analisis Efektivitas Traffic Light Adaptif di Simpang Padat Kota Semarang," *J. Rekayasa Lalu Lintas*, vol. 6, no. 3, pp. 50–59, 2022.
- [13] P. Handayani and I. P. Nugraha, "Model Prediksi Kemacetan Menggunakan Simulasi

- Dinamika Sistem,” J. Teknol. Sistem Cerdas, vol. 4, no. 1, pp. 39–48, 2021.
- [14] M. K. Raharjo, “Analisis Skenario Pengaturan Lalu Lintas Menggunakan Model Dinamika Sistem,” J. Rekayasa Transportasi Perkotaan, vol. 3, no. 2, pp. 17–26, 2021.
- [15] B. Lestari and Y. Widodo, “Perbandingan Sistem Fixed-Time dan Adaptive Control pada Pengaturan Lampu Lalu Lintas,” J. Sains Teknol. Transportasi, vol. 7, no. 2, pp. 88–96, 2023.
- [16] H. Nugraha, “Integrasi IoT dan AI dalam Sistem Lampu Lalu Lintas Cerdas,” J. Inovasi Teknologi Transportasi, vol. 5, no. 4, pp. 31–40, 2023.
- [17] I. Kamil and A. Wicaksono, “Analisis Kinerja Simpang Bersinyal Menggunakan Metode Webster dan MKJI,” J. Transportasi, vol. 23, no. 2, pp. 101–110, 2021.
- [18] R. Putra and O. Z. Tamin, “Evaluasi Kinerja Lalu Lintas Perkotaan Menggunakan Model Kapasitas Simpang,” J. Tek. Sipil, vol. 27, no. 3, pp. 175–184, 2020.
- [19] M. E. Fouladvand, A. Harati, and Z. Sadjadi, “Optimizing Traffic Signal Timing Using Microsimulation: A Case Study of Urban Intersections,” *Physica A*, vol. 535, pp. 122311, 2019.
- [20] J. Lee and H. Lim, “Smart Mobility and Intelligent Traffic Control in Medium-Sized Cities,” *Sustainable Cities Soc.*, vol. 52, pp. 101865, 2020.
- [21] J. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston, MA: McGraw-Hill, 2000.
- [22] Dinas Perhubungan Kota Surakarta, *Laporan Data Jumlah Kendaraan Kota Surakarta 2023*. Surakarta: Dishub, 2023.