

Estimasi Emisi Gas Buang Kendaraan pada Simpang Koordinasi Menggunakan Microsimulasi PTV VISSIM

Dwi Mahardika Darari Yushila¹, Frans Tohom², Ainun Rahmawati³

^{1,2,3} Program Studi Rekayasa Sistem Transportasi Jalan, Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan

Email: darariyushila@gmail.com¹; frans.tohom@pktj.ac.id^{2*}; ainunrahmawati@pktj.ac.id³

ABSTRAK

Peningkatan volume kendaraan bermotor di kawasan perkotaan berdampak langsung pada kinerja simpang bersinyal dan besaran emisi gas buang kendaraan yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja lalu lintas eksisting, mengestimasi emisi karbon monoksida (CO) dan nitrogen oksida (NOx), serta mengkaji perubahan emisi berdasarkan tiga skenario rekayasa lalu lintas di Simpang SMA 2 Lumajang dan Simpang Sukodono, Kabupaten Lumajang, Jawa Timur. Kedua simpang bersinyal empat fase ini berjarak 700 meter dan terdampak pengalihan kendaraan berat akibat penyempitan Jalur Lingkar Timur (JLT). Metode yang digunakan adalah pemodelan mikrosimulasi menggunakan PTV VISSIM 2025 yang dilengkapi modul Emissions untuk estimasi emisi CO dan NOx secara terintegrasi. Model divalidasi melalui lima iterasi kalibrasi dengan uji GEH dan MAPE, dan dinyatakan valid dengan nilai GEH < 5,0, sedangkan nilai MAPE rata-rata berada pada kategori sangat baik di Simpang SMA 2 Lumajang dan kategori baik di Simpang Sukodono, sehingga model dinyatakan representatif terhadap kondisi lapangan. Hasil analisis eksisting menunjukkan Simpang SMA 2 Lumajang memiliki tingkat pelayanan F (tundaan rata-rata 77,98 detik), sementara Simpang Sukodono berkategori D (tundaan 32,06 detik). Emisi CO eksisting mencapai 1.944,31 g/jam dan NOx sebesar 378,30 g/jam pada Simpang SMA 2 Lumajang. Dari tiga skenario yang diuji, Skenario 2 (waktu siklus 130 detik sesuai PKJI 2023 dengan optimasi Fixed Time Signal Controller) terbukti paling efektif menurunkan emisi CO rata-rata menjadi 1.337,04 g/jam dan NOx menjadi 260,14 g/jam pada Simpang SMA 2 Lumajang, serta CO sebesar 720,03 g/jam dan NOx 140,10 g/jam pada Simpang Sukodono.

Kata Kunci: Emisi Gas Buang, Simpang Koordinasi, PTV VISSIM, Kinerja Simpang, Rekayasa Lalu Lintas.

ABSTRACT

The increasing volume of motor vehicles in urban areas directly affects the performance of signalized intersections and the magnitude of vehicle exhaust emissions. This study aims to analyze existing traffic performance, estimate carbon monoxide (CO) and nitrogen oxide (NOx) emissions, and assess emission changes based on three traffic engineering scenarios at SMA 2 Lumajang Intersection and Sukodono Intersection, Lumajang Regency, East Java. Both four-phase signalized intersections are 700 meters apart and are affected by the diversion of heavy vehicles due to the narrowing of the Eastern Ring Road (JLT). The method employed is microsimulation modeling using PTV VISSIM 2025 equipped with the Emissions module for integrated CO and NOx estimation. The model was validated through five calibration iterations using the GEH test for traffic volume and MAPE for queue length. All approaches satisfied the GEH < 5.0 criterion, while the average MAPE values were categorized as very good at SMA 2 Lumajang Intersection and good at Sukodono Intersection, indicating that the model adequately represented field traffic conditions. Existing analysis results show that SMA 2 Lumajang Intersection has a Level of Service F (average delay 77.98 seconds), while Sukodono Intersection is categorized as D (delay 32.06 seconds). Existing CO emissions reached 1,944.31 g/hr and NOx 378.30 g/hr at SMA 2 Lumajang Intersection. Among three tested scenarios, Scenario 2 (130-second cycle time per PKJI 2023 with Fixed Time Signal Controller optimization) proved most effective in reducing average CO emissions to 1,337.04 g/hr and NOx to 260.14 g/hr at SMA 2 Lumajang, and CO to 720.03 g/hr and NOx to 140.10 g/hr at Sukodono Intersection.

Key words: Vehicle Exhaust Emissions, Coordinated Intersection, PTV VISSIM, Intersection Performance, Traffic Engineering

Submitted:
06 Maret 2026

Reviewed:
02 April 2026

Revised
11 Mei 2026

Published:
01 August 2026

PENDAHULUAN

Perubahan iklim dan degradasi kualitas udara perkotaan merupakan tantangan global yang erat kaitannya dengan peningkatan emisi gas buang dari sektor transportasi. *World Resources Institute*

(WRI) melaporkan bahwa emisi gas rumah kaca global meningkat 51% antara tahun 1990 hingga 2021, dengan kontribusi sektor transportasi mencapai 13,7% dari total emisi energi global (Aritenang, 2024). Di Indonesia, kondisi ini

semakin kritis seiring dengan pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor yang mencapai 166,47 juta unit pada tahun 2024 dan sektor transportasi jalan berkontribusi sekitar 27% dari total emisi gas rumah kaca nasional (Sudarti et al., 2022).

Persimpangan bersinyal merupakan titik kritis dalam jaringan jalan perkotaan yang berpotensi menghasilkan emisi gas buang lebih tinggi dibandingkan ruas jalan biasa. Kondisi berhenti dan berjalan (*stop-and-go*) yang terjadi di simpang menyebabkan kendaraan beroperasi pada mode *idling* yang tidak efisien, sehingga meningkatkan konsumsi bahan bakar dan emisi CO serta NOx (Flamarz Al-Arkawazi, 2018; Marzoug et al., 2022). Karbon monoksida (CO) merupakan produk pembakaran tidak sempurna yang berbahaya bagi kesehatan, sementara nitrogen oksida (NOx) berkontribusi pada pembentukan polutan sekunder dan memperburuk kualitas udara ambien (World Health Organization, dalam Miles, 2021).

Kabupaten Lumajang mengalami kondisi khusus akibat penyempitan jalan di Simpang Tukum Jalur Lingkar Timur (JLT) yang mengalihkan kendaraan berat, khususnya truk pengangkut pasir vulkanik Gunung Semeru, ke jalur utama perkotaan (Adeapryanis, 2025). Pengalihan ini meningkatkan beban lalu lintas secara signifikan pada dua simpang bersinyal yang saling berdekatan, yaitu Simpang SMA 2 Lumajang dan Simpang Sukodono. Meskipun Indeks Kualitas Udara Lumajang tahun 2024 tercatat 92,07 (kategori sangat baik), kondisi mikro di simpang-simpang padat pada jam puncak tetap berpotensi menghasilkan emisi lokal yang signifikan, mengingat total kendaraan di Lumajang mencapai 187 ribu unit pada 2025 (Andika, 2025).

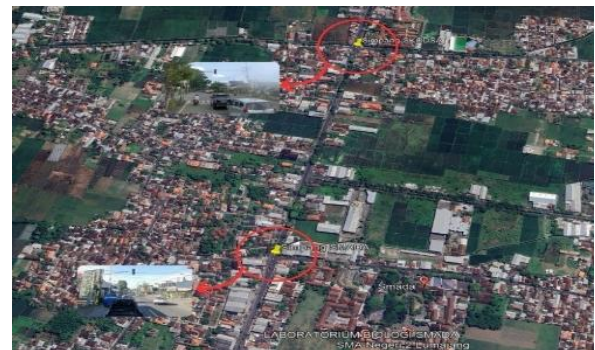
Koordinasi sinyal antar simpang berdekatan merupakan salah satu strategi manajemen lalu lintas yang terbukti efektif dalam mengurangi tundaan, panjang antrian, dan emisi gas buang (Kirono et al., 2018; Roess et al., 2011). Dalam hal ini, Putu dan Anggayeni (2024) menegaskan secara eksplisit bahwa estimasi emisi gas buang dari keluaran PTV VISSIM hanya dapat diambil dan dianalisis apabila model simulasi telah dinyatakan valid terhadap kondisi lapangan, sehingga proses kalibrasi dan validasi menjadi prasyarat mutlak sebelum nilai emisi CO dan NOx dapat dijadikan dasar analisis dan pengambilan keputusan. Penelitian tersebut sekaligus membuktikan bahwa optimasi waktu sinyal dan penerapan koordinasi simpang yang didasarkan pada model yang valid mampu menurunkan emisi CO dan NOx secara signifikan, hasil yang juga dikonfirmasi oleh Primasari et al. (2021) pada simpang bersinyal di Kota Tegal. Namun demikian, belum banyak kajian yang secara

sistematis membandingkan beberapa skenario rekayasa lalu lintas terhadap perubahan emisi pada simpang koordinasi di Indonesia, khususnya dengan menerapkan alur analisis yang bersyarat: emisi hanya diolah setelah model terbukti valid, sebagaimana yang diterapkan dalam penelitian ini menggunakan modul *Emissions* bawaan PTV VISSIM 2025.

Penelitian ini bertujuan: (1) menganalisis kinerja lalu lintas eksisting di Simpang SMA 2 Lumajang dan Simpang Sukodono berdasarkan simulasi PTV VISSIM; (2) mengestimasi emisi CO dan NOx pada kondisi eksisting; dan (3) menganalisis perubahan emisi CO dan NOx pada tiga skenario rekayasa lalu lintas. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi berbasis data bagi Pemerintah Kabupaten Lumajang dalam pengelolaan lalu lintas yang berorientasi pada pengurangan emisi gas buang dan peningkatan kualitas udara perkotaan.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Periode Penelitian



Gambar 1 Peta Lokasi Survei
(Sumber: Google Earth)

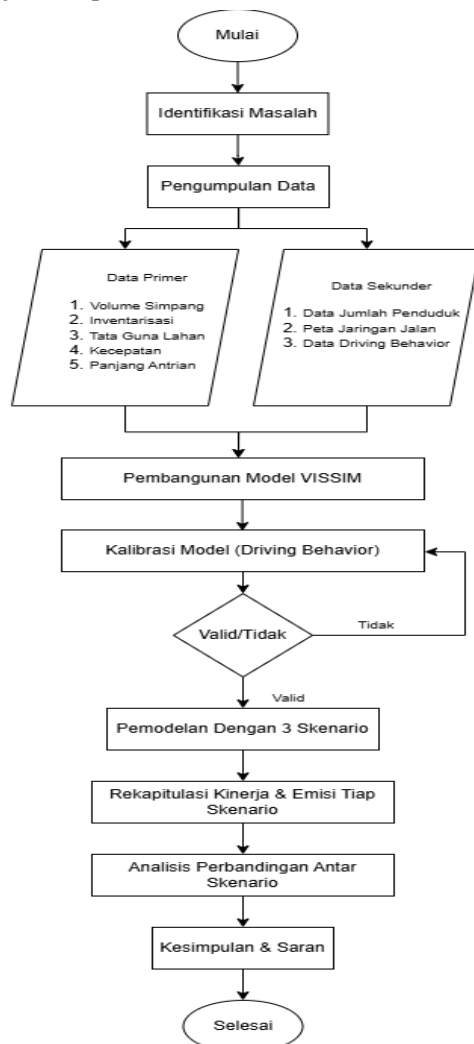
Penelitian dilakukan pada dua simpang empat bersinyal yang saling berdekatan di Kabupaten Lumajang, yaitu Simpang SMA 2 Lumajang (persimpangan Jl. Brigjen Slamet Riyadi, Jl. Argopuro, dan Jl. HOS Cokroaminoto) dan Simpang Sukodono (persimpangan Jl. Brigjen Slamet Riyadi, Jl. Bromo, dan Jl. Veteran). Jarak antar kedua simpang adalah 700 meter, memenuhi syarat koordinasi simpang (Roess et al., 2011). Survei lapangan dilaksanakan pada hari Selasa sebagai hari representatif sibuk, dari pukul 06.00 hingga 18.00 WIB, dengan jam puncak terpilih adalah pukul 15.00–16.00 WIB.

Pengumpulan Data

Data primer yang dikumpulkan meliputi: (1) survei inventarisasi geometrik simpang menggunakan *walking measure*; (2) survei volume lalu lintas dengan metode *Classified Turning Movement Count* (CTMC) untuk tiga jenis kendaraan yaitu sepeda motor (SM), mobil penumpang (MP), dan kendaraan sedang (KS); (3)

survei kecepatan *spot speed* pada jam non-puncak dengan jumlah sampel ditentukan menggunakan rumus *Slovin* ($e = 10\%$); (4) survei waktu siklus dan fase APILL; (5) survei panjang antrian pada jam puncak; serta (6) survei *driving behaviour* untuk parameter *lateral* dan *car following*.

Tahapan penelitian disusun secara sistematis mulai dari identifikasi permasalahan, penentuan lokasi, pengumpulan data primer dan sekunder, pembangunan model jaringan PTV VISSIM 2025, kalibrasi dan validasi model, estimasi emisi, pengujian skenario, hingga penyusunan rekomendasi kebijakan. Alur penelitian ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

Pemodelan PTV VISSIM

Pemodelan mikrosimulasi dilakukan dengan mempergunakan perangkat lunak PTV VISSIM 2025 dengan model perilaku kendaraan *Wiedemann 74* yang sesuai untuk kondisi lalu lintas perkotaan. Input model mencakup: jaringan jalan (*link dan connector*) berbasis citra *Google Earth*; volume lalu lintas pada jam puncak; distribusi kecepatan kendaraan (*desired speed*

distribution); komposisi kendaraan (*vehicle composition*); pengaturan waktu sinyal; parameter *driving behaviour* hasil survei lapangan; serta pengaturan area konflik (*conflict area*). Modul *Emissions* diaktifkan melalui menu *Evaluation Configuration* untuk memperoleh keluaran emisi CO dan NOx per pendekatan melalui *Node Evaluation*.

Estimasi emisi dalam penelitian ini diperoleh dari keluaran *Node Evaluation* pada PTV VISSIM 2025 dan digunakan untuk membandingkan perubahan relatif antar skenario pada jaringan, volume lalu lintas, serta parameter simulasi yang sama. Faktor emisi bawaan *Node Evaluation* didasarkan pada persamaan standar *TRANSYT 7-F* dan data *Oak Ridge National Laboratory* yang merepresentasikan armada kendaraan Amerika Utara, sehingga belum dikalibrasi secara khusus terhadap profil usia kendaraan, jenis bahan bakar, dan teknologi mesin kendaraan di Indonesia (PTV Group, 2025a). Oleh karena itu, hasil emisi CO dan NOx dalam penelitian ini diinterpretasikan sebagai estimasi komparatif untuk mengevaluasi efektivitas skenario rekayasa lalu lintas, bukan sebagai inventarisasi emisi absolut wilayah.

Kalibrasi dan Validasi Model

Kalibrasi dilakukan melalui lima iterasi dengan penyesuaian parameter *driving behaviour* (*Car Following Model* dan *Lateral Behaviour*). Validasi menggunakan dua metode statistik: uji *GEH* untuk volume lalu lintas (model valid jika $GEH < 5,0$) dan *Mean Absolute Percentage Error* (*MAPE*) untuk panjang antrian (model valid jika $MAPE < 10\%$). Setiap iterasi dijalankan dengan lima nilai *random seed* berbeda untuk mengakomodasi keragaman stokastik dalam simulasi.

Rumus *GEH*:

$$GEH = \sqrt{[(qsim - qobs)^2 / (0,5 \times (qsim + qobs))]} \dots\dots\dots (1)$$

Rumus *MAPE*:

$$MAPE = (1/n) \times \sum |At - Ft| / At \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

Skenario Rekayasa Lalu Lintas

Tiga skenario disusun untuk menganalisis pengaruh perubahan pengaturan sinyal terhadap kinerja dan emisi: **(1) Skenario 1:** optimasi waktu siklus eksisting 90 detik menggunakan fitur *Optimized All Fixed Time Signal Controllers* PTV VISSIM; **(2) Skenario 2:** penerapan waktu siklus 130 detik sesuai rekomendasi PKJI 2023 untuk tipe APILL empat fase dengan optimasi *Fixed Time Signal Controller*; **(3) Skenario 3:** penerapan koordinasi sinyal antar kedua simpang

dengan waktu siklus 130 detik dan nilai *offset* 76 detik berdasarkan hasil survei *Moving Car Observer (MCO)* dengan kecepatan rata-rata 33 km/jam.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Geometrik dan Volume Lalu Lintas

Simpang SMA 2 Lumajang dan Simpang Sukodono merupakan simpang empat bersinyal

dengan tipe jalan 2/2 TT (dua lajur dua arah tanpa median) pada jalan mayor Jl. Brigjen Slamet Riyadi. Lebar jalan mayor berkisar antara 12,0–12,4 meter, sementara jalan minor memiliki lebar 5,0–9,0 meter. Kedua simpang menggunakan empat fase sinyal dengan waktu siklus eksisting 90 detik.

Tabel 1. Data Volume Lalu Lintas pada Jam Puncak (15.00-16.00 WIB)

Lokasi Simpang	Kaki Simpang	SM (kend/jam)	MP (kend/jam)	KS (kend/jam)	Total (kend/jam)
SMA 2 Lumajang	Selatan	1.131	269	69	1.469
SMA 2 Lumajang	Utara	930	145	75	1.150
SMA 2 Lumajang	Barat	857	10	0	867
SMA 2 Lumajang	Timur	657	63	0	720
Sukodono	Selatan	834	249	74	1.157
Sukodono	Utara	861	158	79	1.098
Sukodono	Barat	974	16	0	990
Sukodono	Timur	693	73	0	766

Sumber: Hasil Survei, 2025

Sepeda motor mendominasi komposisi kendaraan di kedua simpang, mencapai lebih dari 76% dari total volume. Total kendaraan yang melintas pada jam puncak mencapai 4.371 kendaraan/jam di Simpang SMA 2 Lumajang dan 4.301 kendaraan/jam di Simpang Sukodono. Dominasi

kendaraan berat (KS) pada pendekat utara dan selatan yang merupakan jalur utama kendaraan dari dan menuju kawasan pasir Lumajang menjadi faktor pembeda utama antara kedua lokasi penelitian ini dibandingkan simpang perkotaan pada umumnya (Shidiiqi, 2023).

Tabel 2. Persentase Kendaraan Sedang pada Setiap Pendekat

Lokasi Simpang	Pendekat	KS (kend/jam)	Total (kend/jam)	Persentase
SMA 2 Lumajang	Selatan	69	1469	4,7%
	Utara	75	1150	6,52%
	Barat	0	867	0%
	Timur	0	720	0%
Simpang Sukodono	Selatan	74	1157	6,4%
	Utara	79	1098	7,19%
	Barat	0	990	0%
	Timur	0	766	0%

Sumber: Hasil Survei, 2025

Berdasarkan tabel diatas kendaraan sedang hanya melintasi pada pendekat utara dan selatan pada kedua simpang. Pada simpang SMA 2 Lumajang proporsi KS tertinggi terdapat pada pendekat utara sebesar 6,52% sedangkan pada simpang Sukodono proporsi tertinggi terdapat pada pendekat utara sebesar 7,19%. Kondisi ini menunjukkan bahwa koridor utara dan selatan merupakan lintasan utama kendaraan berat akibat pengalihan arus dari Jalur Lingkar Timur (JLT).

Kalibrasi dan Validasi Model PTV VISSIM

Proses kalibrasi dilakukan sebanyak lima iterasi dengan penyesuaian bertahap pada parameter *Car*

Following Model (Average Standstill Distance, Additive dan Multiplicative Part of Safety Distance) dan *Lateral Behaviour* (jarak lateral minimum, posisi kendaraan di lajur, serta pengaturan *overtake*). Parameter *Lateral Behaviour* disesuaikan dengan hasil observasi lapangan, di antaranya dengan mengaktifkan opsi '*Overtake on Same Lane*' dan '*Diamond Queuing*' yang mencerminkan perilaku khas pengemudi lokal.

Tabel 3. Parameter Kalibrasi Perilaku Pengemudi

Parameter	Nilai Kalibrasi	Keterangan
<i>Average Standstill Distance</i> (SM dan MP)	2,0 m – 0,15 m	mewakili jarak antar kendaraan yang rapat pada kondisi antrian.
<i>Additive Part of Safety Distance</i> (SM dan MP)	2,0 m – 0,15 m	mengurangi jarak aman agar mendekati perilaku lokal.
<i>Multiplicative Part of Safety Distance</i>	3,0 m – 2,0 m	menyesuaikan sensitivitas jarak aman dan arus jenuh.
<i>Waiting Time Before Diffusion</i>	60 detik – 180 detik	mengurangi kendaraan hilang saat antrian panjang.
<i>Desired Position, Diamond Queuing, Consider Next Turn</i>	1. Middle of lane – any 2. Diamond Queuing : Yes 3. Consider Next Turn : Yes	Pengaturan ini mewakili pergerakan yang tidak sepenuhnya berbasis lajur dan pemilihan posisi sebelum berbelok.
<i>Overtake on Same Lane</i>	On Right & Left	mewakili perilaku mendahului dalam satu lajur.
<i>Minimum Lateral Distance dan Minimum Longitudinal Speed</i>	0,20 m dan 1,0 m dengan 0,15 m dan 0,15 m	Pengaturan ini mewakili jarak lateral rapat dan manuver pada kecepatan rendah.

Tabel 4. Hasil Validasi GEH dan MAPE pada Kalibrasi Kelima (Valid)

Kaki Simping	GEH (Volume)	MAPE (Antrian, %)	Keterangan
SMADA – Selatan	1,263	9,40	Diterima / Sangat Baik
SMADA – Barat	1,085	0,55	Diterima / Sangat Baik
SMADA – Utara	0,122	7,99	Diterima / Sangat Baik
SMADA – Timur	0,446	11,28	Diterima / Baik
Sukodono – Selatan	1,290	9,61	Diterima / Sangat Baik
Sukodono – Barat	0,138	1,01	Diterima / Sangat Baik

Sukodono – Utara	0,829	16,15	Diterima / Baik
Sukodono – Timur	0,096	19,04	Diterima / Baik

Sumber: Hasil Analisis PTV VISSIM, 2025

Seluruh kaki simping memenuhi kriteria validasi $GEH < 5,0$. Nilai *MAPE* pada kalibrasi kelima memiliki rata-rata 9,40% untuk Simping SMA 2 Lumajang yang termasuk kategori sangat baik ($MAPE \leq 10\%$), sedangkan Simping Sukodono memiliki rata-rata *MAPE* sebesar 12,87% yang masih berada dalam kategori baik ($MAPE 10-20\%$). Variabilitas nilai *MAPE* yang lebih tinggi pada Simping Sukodono disebabkan oleh ketidakseragaman pola antrian akibat fluktuasi volume kendaraan berat yang melintasi simping tersebut. Berdasarkan kriteria validasi yang digunakan (Halim et al., 2019; Anggoro & Kusuma, 2019), model dinyatakan valid dan representatif terhadap kondisi eksisting.

Kinerja Lalu Lintas Kondisi Eksisting

Hasil simulasi PTV VISSIM pada kondisi eksisting dengan waktu siklus 90 detik menunjukkan kinerja yang kurang optimal pada kedua simping, terutama akibat tingginya beban kendaraan berat pada pendekat selatan dan utara.

Tabel 5. Kinerja Lalu Lintas Eksisting Berdasarkan PTV VISSIM

Kaki Simping	Panjang Antrian (m)	Tundaan (detik)	LOS (PM 96/2015)
SMADA – Selatan	115,93	177,74	F
SMADA – Barat	29,08	98,82	F
SMADA – Utara	9,43	11,67	B
SMADA – Timur	9,76	23,70	C
Sukodono – Selatan	4,78	5,42	B
Sukodono – Barat	16,70	42,93	E
Sukodono – Utara	35,02	37,41	D
Sukodono – Timur	26,06	42,58	E

Sumber: Hasil Analisis PTV VISSIM, 2025

Simpang SMA 2 Lumajang menghasilkan rata-rata tundaan 77,98 detik/kendaraan dengan LOS F dan rata-rata panjang antrian 41,05 meter. Pendekat selatan mengalami kondisi paling kritis dengan

tundaan mencapai 177,74 detik dan antrian 115,93 meter, yang disebabkan oleh volume kendaraan tertinggi (1.469 kend/jam) dan tingginya proporsi kendaraan sedang. Simpang Sukodono memiliki rata-rata tundaan 32,09 detik/kendaraan dengan LOS D dan rata-rata antrian 20,64 meter. Kondisi ini sejalan dengan temuan Rakha et al. (2004) bahwa peningkatan tundaan di simpang bersinyal secara langsung memperburuk pola operasi kendaraan dan meningkatkan emisi gas buang.

Emisi CO dan NOx Kondisi Eksisting

Tabel 6. Rekapitulasi Emisi CO dan NOx Kondisi Eksisting (g/jam)

Lokasi Simpang	Emisi CO (g/jam)	Emisi NOx (g/jam)
SMA 2 Lumajang – Selatan	1.154,95	224,71
SMA 2 Lumajang – Barat	485,53	94,47
SMA 2 Lumajang – Utara	141,96	27,62
SMA 2 Lumajang – Timur	161,87	31,50
Total SMA 2 Lumajang	1.944,31	378,30
Sukodono – Selatan	116,82	22,73
Sukodono – Barat	334,14	65,01
Sukodono – Utara	678,32	131,97
Sukodono – Timur	444,23	86,43
Total Sukodono	1.573,52	306,14

Sumber: Hasil Analisis PTV VISSIM 2025

Emisi CO dan NOx tertinggi pada Simpang SMA 2 Lumajang terjadi di pendekat selatan (CO: 1.154,95 g/jam; NOx: 224,71 g/jam), sedangkan pada Simpang Sukodono tertinggi di pendekat utara (CO: 678,32 g/jam; NOx: 131,97 g/jam). Pola distribusi emisi ini berkorelasi kuat dengan nilai tundaan pada masing-masing pendekat. Pendekat dengan tundaan tertinggi menghasilkan emisi yang lebih besar, konsisten dengan temuan Boriboonsomsin et al. (2010) dan Kumara & Widodo (2019) yang menyatakan bahwa semakin buruk kinerja lalu lintas, semakin besar emisi gas buang yang dihasilkan. Total emisi CO pada Simpang SMA 2 Lumajang (1.944,31 g/jam) lebih tinggi 23,6% dibandingkan Simpang Sukodono (1.573,52 g/jam), sejalan dengan perbedaan kinerja lalu lintas antara kedua simpang.

Visualisasi *heat map* pada **Gambar 3** menunjukkan bahwa pada pendekat dengan tundaan dan panjang antrian terbesar, yaitu terletak pada pendekat

selatan Simpang SMA 2 Lumajang dan pendekat utara Simpang Sukodono.

Lokasi Simpang	Hotspot Emisi	
SMADA Selatan	1.155	225
SMADA Barat	486	94
SMADA Utara	142	28
SMADA Timur	162	32
Sukodono Selatan	117	23
Sukodono Barat	334	65
Sukodono Utara	678	132
Sukodono Timur	444	86
	CO (g/jam)	Nox (g/jam)

Gambar 3 Heat Map Emisi CO & NOx pada Kondisi Eksisting

Pola ini memperkuat hasil penelitian bahwa peningkatan tundaan pada kondisi simpang berdamping langsung terhadap akumulasi emisi CO dan Nox.

Hasil Simulasi Tiga Skenario Rekayasa Lalu Lintas

Tabel 7. Perbandingan Kinerja dan Emisi pada Tiga Skenario

Skenario	Lokasi	Rata-rata Tundaan (det)	LOS	Rata-rata CO (g/jam)	Rata-rata NOx (g/jam)
Eksisting	SMADA	77,98	F	1.944,31	378,30
Eksisting	Sukodono	32,09	D	1.573,52	306,14
Skenario 1 (90 det)	SMADA	72,45	E-F	1.524,23	296,47
Skenario 1 (90 det)	Sukodono	30,17	D	961,04	187,00
Skenario 2 (130 det)	SMADA	55,03	E	1.337,04	260,14
Skenario 2 (130 det)	Sukodono	22,27	C	720,03	140,10
Skenario 3 (Koordinasi)	SMADA	80,92	F	1.499,28	291,70
Skenario 3 (Koordinasi)	Sukodono	24,55	C-D	775,41	150,87

Sumber: Hasil Analisis PTV VISSIM 2025

Skenario 1 (optimasi 90 detik) hanya menghasilkan penurunan emisi CO yang moderat. Meskipun distribusi waktu hijau dioptimalkan, durasi siklus yang terlalu pendek tidak cukup mengakomodasi volume kendaraan yang tinggi, sehingga tundaan tetap signifikan terutama pada pendekat selatan Simpang SMA 2 Lumajang (tundaan 196,85 detik, LOS F).

Skenario 2 (waktu siklus 130 detik, PKJI 2023) terbukti paling efektif dalam menurunkan emisi

gas buang. Pada Simpang SMA 2 Lumajang, emisi CO turun menjadi 1.337,04 g/jam (penurunan 31,2% dari eksisting) dan NO_x menjadi 260,14 g/jam (penurunan 31,3%). Pada Simpang Sukodono, emisi CO turun menjadi 720,03 g/jam (penurunan 54,3%) dan NO_x menjadi 140,10 g/jam (penurunan 54,2%). Penurunan ini sejalan dengan temuan Raditya Kresna (2014) bahwa optimasi waktu siklus dapat menurunkan emisi CO dan NO_x hingga 30%, serta dengan Purnomoasri et al. (2023) yang menunjukkan penurunan emisi signifikan pada penerapan waktu siklus optimal.

Skenario 3 (koordinasi simpang) menghasilkan hasil yang bervariasi. Pada Simpang Sukodono, efek *green wave* memberikan penurunan emisi yang cukup baik (CO: 775,41 g/jam). Namun pada Simpang SMA 2 Lumajang, penerapan *offset* justru meningkatkan tundaan pada pendekat selatan dan timur akibat ketidaksesuaian *offset* dengan distribusi arus yang tidak merata. Hal ini mengakibatkan emisi pada Simpang SMA 2 Lumajang pada Skenario 3 lebih tinggi dibandingkan Skenario 2. Temuan ini mengkonfirmasi pernyataan Kirono et al. (2018) bahwa koordinasi simpang hanya efektif apabila kondisi awal (volume, geometrik, jarak) memenuhi persyaratan teknis koordinasi, dan perlu dikombinasikan dengan optimasi waktu siklus yang tepat.

Secara keseluruhan, hubungan antara kinerja simpang dan besaran emisi terbukti konsisten: penurunan tundaan berbanding lurus dengan penurunan emisi CO dan NO_x. Hasil ini mendukung temuan Kutlimuratov et al. (2021), Kvašňovská et al. (2023), dan Qadri et al. (2024) yang menegaskan bahwa perbaikan operasional simpang melalui optimasi sinyal merupakan strategi yang efektif sekaligus efisien untuk menekan emisi gas buang kendaraan di kawasan perkotaan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, dapat ditarik tiga kesimpulan utama. Pertama, kinerja lalu lintas eksisting di Simpang SMA 2 Lumajang menunjukkan tingkat pelayanan F dengan tundaan rata-rata 77,98 detik dan panjang antrian rata-rata 41,05 meter, sedangkan Simpang Sukodono berkategori D dengan tundaan 32,09 detik dan antrian 20,64 meter. Kedua, estimasi emisi kondisi eksisting berdasarkan keluaran PTV VISSIM menunjukkan beban emisi CO sebesar 1.944,31 g/jam dan NO_x 378,30 g/jam di Simpang SMA 2 Lumajang, serta CO 1.573,52 g/jam dan NO_x 306,14 g/jam di Simpang Sukodono. Distribusi emisi tersebut berkorelasi kuat dengan nilai

tundaan per pendekat. Ketiga, dari tiga skenario rekayasa lalu lintas yang diuji, Skenario 2 berupa penerapan waktu siklus 130 detik sesuai PKJI 2023 dengan optimasi *Fixed Time Signal Controller* merupakan skenario terbaik karena mampu menurunkan emisi CO sebesar 31,2% di Simpang SMA 2 Lumajang dan 54,3% di Simpang Sukodono dibandingkan kondisi eksisting. Skenario 3 berupa koordinasi simpang hanya efektif di Simpang Sukodono, tetapi belum optimal di Simpang SMA 2 Lumajang karena distribusi arus dan kebutuhan waktu hijau antar pendekat belum seimbang.

Berdasarkan temuan tersebut, Pemerintah Kabupaten Lumajang, khususnya Dinas Perhubungan, direkomendasikan menjadikan Skenario 2 sebagai prioritas awal penanganan melalui penyesuaian waktu siklus APILL pada Simpang SMA 2 Lumajang dan Simpang Sukodono. Selain optimasi sinyal, diperlukan manajemen kendaraan berat pada koridor terdampak pengalihan JLT, terutama melalui pengaturan jam operasional kendaraan berat di luar jam puncak, evaluasi rute angkutan pasir, serta pengawasan kendaraan berat pada pendekat utara dan selatan yang memiliki proporsi KS tertinggi. Penerapan kebijakan tersebut perlu disertai pemantauan berkala terhadap tundaan, panjang antrian, dan emisi agar pengendalian lalu lintas tidak hanya meningkatkan kinerja simpang, tetapi juga mendukung pengurangan beban emisi kendaraan di kawasan perkotaan Lumajang.

DAFTAR PUSTAKA

- Adeapryanis. (2025). Update lalu lintas Lumajang: Alasan simpang 3 Tukum dipersempit. *Radars Jember*. Diakses dari <https://radarjember.jawapos.com/lumajang/795483302>
- Andika, A. (2025). Jaga langit tetap biru, Bupati Lumajang wajibkan uji emisi kendaraan dinas. *Portal Berita Lumajang*. Diakses dari <https://portalberita.lumajangkab.go.id>
- Anggayeni, N. P. R. (2024). Optimalisasi kinerja simpang bersinyal dengan koordinasi simpang: Studi kasus Simpang Gunung Latimojong dan Simpang Veteran Utara, Makassar. *Thesis (Diploma)*. Politeknik Transportasi Darat Bali. <https://digilib.poltradbali.ac.id/id/eprint/101>
- Anggoro, D., & Kusuma, A. (2019). Aplikasi Mean Absolute Percentage Error (MAPE) dalam evaluasi model simulasi lalu lintas. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 21(1), 15–23.

- Aritenang, G. N., & Wicaksono, W. (2024). *Peta jalan Indonesia menuju emisi nol bersih: Menghitung emisi transportasi darat sebagai fondasi kebijakan transportasi berkelanjutan*. World Resources Institute (WRI) Indonesia.
- Batterman, S., & Zhang, K. (2013). Air pollution and health risks due to vehicle traffic. *Science of the Total Environment*, 450–451, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.074>
- Boriboonsomsin, K., & Barth, M. (2010). Explaining fuel consumption and CO2 emission variation on urban freeways. *Transportation Research Record*, 2175(1), 99–108. <https://doi.org/10.3141/2175-12>
- Dirjen Bina Marga. (2023). *Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI 2023)*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Flamarz Al-Arkawazi, S. A. (2018). Measuring the influences and impacts of signalized intersection delay reduction on fuel consumption, operation cost and exhaust emissions. *Civil Engineering Journal*, 4(3), 552–571. <https://doi.org/10.28991/cej-0309115>
- Halim, A., Mustari, N., Renta, A., & Sari, D. (2019). *Kajian validasi model mikrosimulasi lalu lintas menggunakan uji GEH*. Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil, 1(1), 45–52.
- Ismiyati, I., Marlita, D., & Saidah, D. (2014). Pencemaran udara akibat emisi gas buang kendaraan bermotor. *Jurnal Manajemen Transportasi & Logistik*, 1(3), 241–248. <https://doi.org/10.54324/j.mtl.v1i3.23>
- Kirono, J. C., Puspasari, N., & Handayani, N. (2018). Analisis Koordinasi Sinyal Antar Simpang (Studi Kasus Jalan Rajawali-Tingang dan Jalan Rajawali-Garuda). *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 6(2), 109–123. <https://doi.org/10.33084/mits.v6i2.250>
- Kumara, R. A., & Widodo, W. (2019). Analisis kinerja simpang tak bersinyal dan dampak emisi gas buang kendaraan di Jalan Selokan Mataram, Depok, Sleman. *Jurnal Transportasi*, 19(2), 115–124. <https://etd.ums.ac.id/id/eprint/64883/>
- Kutlimuratov, K., Khakimov, S., Mukhitdinov, A., & Samatov, R. (2021). Modelling traffic flow emissions at signalized intersection with PTV VISSIM. *E3S Web of Conferences*, 264, 02051. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126402051>
- Kvašňovská, E., Striegler, R., Pelikan, L., & Havlickova, E. (2023). Capacity and emission evaluation of new interchange designs using microsimulation. *Transportation Research Procedia*, 69, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.145>
- Machmud, S. (2021). Analisis pengaruh tahun perakitan terhadap emisi gas buang kendaraan bermotor. *Jurnal Mesin Nusantara*, 4(1), 21–29. <https://doi.org/10.29407/jmn.v4i1.16038>
- Marzoug, R., Lakouari, N., Pérez Cruz, J. R., & Vega Gómez, C. J. (2022). Cellular automata model for analysis and optimization of traffic emission at signalized intersection. *Sustainability*, 14(21), 14048. <https://doi.org/10.3390/su142114048>
- Miles, J. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.
- Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia. (2015). *PM No. 96 Tahun 2015 tentang Pedoman Pelaksanaan Kegiatan Manajemen dan Rekayasa Lalu Lintas*. Jakarta.
- Primasari, Y. H., Azhar, D. A., & Sasmito, A. (2021). Optimalisasi waktu hijau untuk mengurangi kadar polusi udara pada simpang bersinyal Pasifik di Kota Tegal. *Jurnal Transportasi*, 21(1), 19–26. <https://doi.org/10.26593/jtrans.v21i1.4825>
- PTV Group. (2020). *PTV VISSIM 2025 user manual*. PTV Planung Transport Verkehr AG.
- Purnomoasri, R. D., Yuono, T., Sumina, S., & Utama, F. D. L. (2023). Analisis emisi CO dan CO2 pada simpang bersinyal Bejen Kabupaten Karanganyar. *ENVIRO: Journal of Tropical Environmental Research*, 25(1), 24–33. <https://doi.org/10.20961/enviro.v25i1.78524>
- Qadri, S. S. S. M., Albdairi, M., & Almusawi, A. (2024). Evaluating the environmental benefits of autonomous vehicles in urban intersections: A microscopic simulation approach. *Discover Civil Engineering*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00112-9>
- Raditya, K., Rudissalam, M., Ismiyati, I., & Basuki, K. H. (2014). Analisis Dampak Optimasi Simpang Bersinyal Terhadap Emisi Gas Buang. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 3(1), 66–78. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jkts/article/view/4543>
- Rakha, H., Ahn, K., & Trani, A. (2004). Development of VT-Micro model for estimating hot stabilized light duty vehicle and truck emissions. *Transportation Research*

- Part D: *Transport and Environment*, 9(1), 49–74.
[https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(03\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(03)00054-3)
- Roess, R. P., Prassas, E. S., & McShane, W. R. (2011). *Traffic engineering (4th ed.)*. Prentice Hall.
- Romadhona, P. J., & Daulay, M. R. H. (2018). Estimasi Kinerja Ruas Jalan Dengan Pengaturan Lalu Lintas Satu Arah Pada Kawasan Jetis, Yogyakarta. *Jurnal Teknisia*, 23(1).
<https://journal.uui.ac.id/teknisia/article/view/8396>
- Salman, N., Taqwa, F. M. L., Alimuddin, A., & Arthono, A. (2023). Air Quality Monitoring and Analysis in Tasikmalaya City. *Journal of Community Based Environmental Engineering and Management*, 7(1), 25–32.
<https://doi.org/10.23969/jcbeem.v7i1.7187>
- Shidiiqi, Y. (2023). Daerah penghasil pasir terbaik di Jawa Timur. Diakses dari <https://www.jatimnetwork.com/jatim/4311090358>
- Sudarti, S., Yushardi, Y., & Kasanah, N. (2022). Analisis potensi emisi CO2 oleh berbagai jenis kendaraan bermotor di Jalan Raya Kemantren Kabupaten Sidoarjo. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 9(2), 70–75.
<https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2022.009.02.4>
- Transportation Research Board. (2010). *Highway Capacity Manual (HCM) 2010*. National Academies Press.
- Verawanti, V., & Romadhona, P. J. (2019). Dampak Petugas Pengatur Lalu Lintas terhadap Kinerja Simpang 4 Tak Bersinyal Lembah UGM, Yogyakarta. *Teknisia*, 34(1), 46-54.
<https://journal.uui.ac.id/teknisia/article/view/12544>
- Wahyu, D., Suartawan, P. E., & Atmajaya, A. B. (2024). Pengaruh perubahan inventaris jalan terhadap kualitas udara di Jalan Imam Bonjol Denpasar dengan pendekatan mikrosimulasi. *Jurnal Keselamatan Transportasi Jalan*, 11(1). <https://doi.org/10.46447/ktj.v11i1.590>
- Wulandari, A., Anggada, S., & Wijianto. (2023). Peningkatan kinerja simpang di Kota Banjarbaru: Studi kasus Simpang Trikora Barat dan Simpang APILL 33. Politeknik Transportasi Darat Indonesia – STTD. <http://digilib.ptdisttd.ac.id/id/eprint/4205>