

PENGARUH OPTIMASI DAN KOORDINASI SIMPANG BERSINYAL TERHADAP EMISI KARBON MONOKSIDA (CO) DI KORIDOR JL. SOEKARNO HATTA, KABUPATEN KEBUMEN

Wahyu Susilojati¹, Panji Pasa Pratama², William Seno³

Politeknik Transportasi Darat Indonesia - STTD
Corresponding e-mail: wahyu.susilojati@gmail.com

Copyright © 2026 The Author



This is an open access article

Under the Creative Commons Attribution Share Alike 4.0 International License

DOI: [10.53866/jimi.v6i2.1477](https://doi.org/10.53866/jimi.v6i2.1477)

Abstrak

Koordinasi simpang bersinyal umumnya dievaluasi hanya dari indikator kinerja lalu lintas, sementara dampaknya terhadap kualitas udara di sekitar simpang jarang diukur langsung, padahal kawasan tersebut sering menjadi tempat beraktivitas pedagang dan pejalan kaki. Penelitian ini mengestimasi emisi karbon monoksida (CO) pada tiga simpang bersinyal di Jalan Soekarno Hatta, Kabupaten Kebumen, yaitu Simpang Tugu Lawet, Simpang Pegadaian, dan Simpang SMPN 5, yang sebelumnya telah dikoordinasikan waktu siklusnya menggunakan MKJI 1997 dan Transyt 16. Estimasi dilakukan dengan menguraikan volume lalu lintas menjadi tiga kategori kendaraan yaitu sepeda motor, kendaraan ringan, dan kendaraan berat, kemudian mengalikan volume tiap kategori dan panjang antrian dari kajian rekayasa lalu lintas terdahulu dengan faktor emisi resmi masing-masing kategori menurut PERMENLH No. 12 Tahun 2010, dibandingkan antara kondisi eksisting, optimasi terpisah, dan koordinasi. Hasil menunjukkan emisi CO turun dari 26,66 kilogram per jam pada kondisi eksisting menjadi 14,36 kilogram per jam pada optimasi dan 14,27 kilogram per jam pada koordinasi, atau turun 46,48%, yang sedikit melampaui persentase penurunan waktu tempuh koridor sebesar 44%. Namun, dari penurunan tersebut, 46,15% atau setara 99,3% dari total manfaat koordinasi sudah tercapai pada tahap optimasi simpang secara terpisah, sementara koordinasi hanya menambah manfaat emisi yang sangat kecil dan bahkan memperpanjang antrian pada tiga dari delapan pendekat. Temuan ini menunjukkan bahwa manfaat koordinasi sinyal lebih terasa pada efisiensi waktu tempuh sistem dibanding pengurangan emisi lokal, sehingga optimasi terpisah dapat menjadi opsi awal yang lebih sederhana dan hemat biaya bagi daerah dengan keterbatasan anggaran, tanpa mengorbankan manfaat kualitas udara secara signifikan dibanding koordinasi penuh.

Kata Kunci: Emisi Karbon Monoksida, Koordinasi Simpang Bersinyal, Optimasi Lalu Lintas

The Effect of Signalized Intersection Optimization and Coordination on Carbon Monoxide (CO) Emissions along the Soekarno Hatta Corridor, Kebumen Regency

Abstract

The coordination of signalized intersections is generally evaluated solely based on traffic performance indicators, while its impact on air quality around the intersections is rarely measured directly, even though these areas are often bustling with vendors and pedestrians. This study estimates carbon monoxide (CO) emissions at three signalized intersections on Soekarno Hatta Road, Kebumen Regency, namely Tugu Lawet Intersection, Pegadaian Intersection, and SMPN 5 Intersection, whose signal cycle times had previously been coordinated using MKJI 1997 and Transyt 16. Estimates were calculated by disaggregating traffic volume into three vehicle categories, namely motorcycles, light vehicles, and heavy vehicles, then multiplying each category's volume and queue length from a previous traffic engineering study by its respective official emission factor under PERMENLH No. 12 of 2010, comparing existing conditions, separate optimization, and coordination. The results show that CO emissions decreased from 26.66

kilograms per hour under existing conditions to 14.36 kilograms per hour under the optimization scenario and 14.27 kilograms per hour under the coordination scenario, a 46.48% reduction that slightly exceeded the 44% reduction in travel time along the corridor. However, of this reduction, 46.15%, equivalent to 99.3% of the total coordination benefit, was already achieved during the separate intersection optimization phase, while signal coordination added only a very small additional benefit in terms of emissions and even lengthened the queue at three of the eight approaches. These findings indicate that the benefits of signal coordination are more pronounced in terms of travel time efficiency than in terms of reducing local emissions; therefore, separate optimization may be a simpler and more cost-effective initial option for areas with budget constraints, without significantly compromising air quality benefits compared to full coordination.

Keywords: carbon monoxide emissions, signalized intersection coordination, traffic optimization

1. Pendahuluan

Karbon monoksida (CO) termasuk polutan gas buang kendaraan bermotor yang paling langsung membahayakan kesehatan pengguna jalan, karena gas ini mengikat hemoglobin darah jauh lebih kuat daripada oksigen sehingga membentuk karboksihemoglobin dan mengganggu suplai oksigen ke jaringan tubuh. Pedagang dan petugas lapangan yang beraktivitas dalam waktu lama di tepi jalan padat kendaraan menghadapi risiko kesehatan kumulatif yang jauh lebih besar dibanding pengguna kendaraan yang hanya melintas sesaat (Rambling et al., 2022). Temuan ini relevan bagi kawasan *Central Business District* Kabupaten Kebumen, tempat pedagang Pasar Tumenggungan dan pertokoan di sepanjang Jalan Soekarno Hatta beraktivitas setiap hari. Simpang bersinyal di kawasan ini karena itu layak mendapat perhatian tersendiri dalam evaluasi kualitas udara perkotaan, tidak sekadar diperlakukan sebagai satu titik dalam jaringan jalan secara umum.

Karakteristik pembentukan CO juga berbeda secara mendasar dari karbon dioksida (CO₂). CO₂ terbentuk dari pembakaran sempurna, sedangkan CO justru dominan muncul pada pembakaran tidak sempurna yang terjadi saat kendaraan berakselerasi dari posisi berhenti, yaitu kondisi yang paling sering dijumpai di persimpangan bersinyal. Secara metodologis berarti intervensi yang mengurangi frekuensi dan durasi berhenti jalan (*stop and go*) berpotensi memberi manfaat proporsional lebih besar terhadap CO dibanding terhadap polutan lain yang lebih dipengaruhi oleh jarak tempuh total. Argumen ini diperkuat oleh Wu dkk. (2025) yang menunjukkan bahwa sinyal lalu lintas adaptif berbasis data besar pada 100 kota terpadat di Tiongkok mampu menurunkan waktu tempuh sekaligus emisi karbon secara signifikan, karena pengaturan sinyal yang lebih baik meminimalkan waktu *idle* dan pengereman kendaraan. Temuan tersebut menegaskan bahwa koordinasi waktu siklus pada simpang bersinyal berpengaruh langsung terhadap besaran emisi kendaraan, sebuah dimensi yang jarang disentuh ketika evaluasi hanya berhenti pada kinerja lalu lintas.

Kondisi tersebut tercermin pada koridor Jalan Soekarno Hatta, tempat tiga simpang bersinyal yang saling berdekatan yaitu Simpang Tugu Lawet, Simpang Pegadaian, dan Simpang SMPN 5. Kawasan tersebut sebelumnya beroperasi tanpa koordinasi waktu siklus sehingga kendaraan berulang kali berhenti di sepanjang koridor sejauh 601 meter. Kajian rekayasa lalu lintas terhadap ketiga simpang ini pernah dilakukan dan berhasil menurunkan waktu tempuh koridor dari 155 detik menjadi 87,57 detik atau berkurang sekitar 44% melalui optimasi dan koordinasi waktu siklus APILL menggunakan MKJI 1997 dan Transyt 16 (Susilojati et al., 2023). Namun keberhasilan tersebut hanya diukur dari indikator kinerja lalu lintas tanpa mengukur dampaknya terhadap kualitas udara di sekitar simpang yang notabene ramai oleh aktivitas pejalan kaki dan pedagang. Pola semacam ini cukup umum dijumpai dalam evaluasi kebijakan rekayasa lalu lintas di Indonesia yang sering berhenti pada indikator mobilitas tanpa menutup lingkaran evaluasi ke dampak lingkungan dan kesehatan yang sebetulnya menjadi tujuan akhir kebijakan tersebut.

Celah ini belum banyak diisi oleh literatur yang ada sehingga sejauh penelusuran penulis terdapat dua pola keterbatasan pada studi terdahulu. Purnomoasri dkk. (2023), dalam kajian di Simpang Bersinyal Bejen, Kabupaten Karanganyar, menghitung emisi CO dari volume kendaraan dan panjang antrian menggunakan faktor emisi resmi Kementerian Lingkungan Hidup, namun intervensi yang diuji terbatas pada pelebaran jalan di satu simpang tunggal dan bukan koordinasi sinyal antar simpang sehingga belum menjawab pertanyaan mengenai efek sistem koridor secara keseluruhan. Sementara itu, Sasmita dkk.

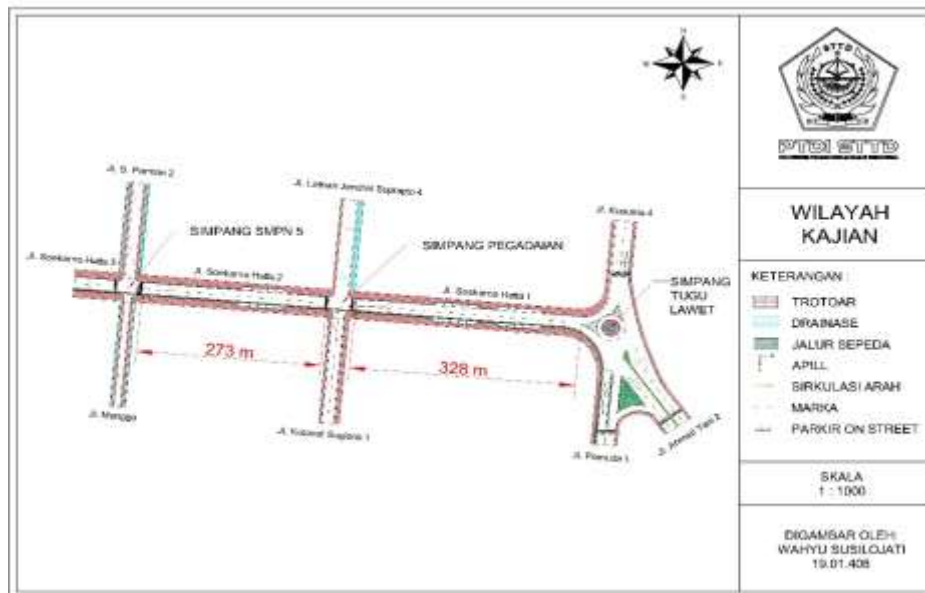
(2022) mengukur hubungan volume, kecepatan, dan emisi CO secara langsung di Jalan Jenderal Sudirman Pekanbaru tetapi tidak mengaitkannya dengan skenario intervensi rekayasa lalu lintas apa pun sehingga temuannya bersifat deskriptif korelasional tanpa implikasi kebijakan yang dapat diuji secara kuantitatif. Belum ditemukan kajian yang menerapkan kerangka volume, panjang antrian, dan faktor emisi tersebut pada sistem simpang yang dikoordinasikan secara simultan sehingga belum diketahui apakah manfaat koordinasi terhadap CO sebanding dengan manfaatnya terhadap waktu tempuh atau apakah manfaat tersebut sesungguhnya sudah tercapai pada tahap optimasi simpang secara terpisah. Hal tersebut memiliki implikasi kebijakan langsung karena optimasi terpisah jauh lebih murah dan lebih sederhana untuk diimplementasikan dibanding koordinasi sistem penuh.

Berangkat dari kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengestimasi emisi CO pada kondisi eksisting, optimasi terpisah, dan koordinasi tiga simpang bersinyal di koridor Jalan Soekarno Hatta, Kabupaten Kebumen, serta menganalisis apakah penurunan emisi CO sebanding dengan penurunan waktu tempuh hasil koordinasi, dan sejauh mana koordinasi memberi manfaat tambahan dibanding optimasi simpang secara terpisah. Penelitian ini melengkapi evaluasi kinerja lalu lintas yang telah dilakukan sebelumnya dengan dimensi kualitas udara yang terukur, sekaligus menawarkan dasar kuantitatif bagi evaluasi kebijakan koordinasi sinyal dari perspektif kesehatan lingkungan perkotaan. Pertimbangan ini relevan bagi Pemerintah Kabupaten Kebumen maupun bagi pengambil kebijakan rekayasa lalu lintas di daerah lain yang tengah mempertimbangkan investasi koordinasi sinyal serupa.

2. Metode Penelitian

2.1. Objek, Waktu, dan Tempat Penelitian

Objek penelitian ini adalah tiga simpang bersinyal pada koridor Jalan Soekarno Hatta kawasan *Central Business District* Kabupaten Kebumen, yaitu Simpang Tugu Lawet, Simpang Pegadaian, dan Simpang SMPN 5 yang sebelumnya telah dikoordinasikan waktu siklusnya pada kajian rekayasa lalu lintas terdahulu. Ketiga simpang berada pada satu koridor sepanjang 601 meter dengan jarak antar simpang yang masing-masing 328 meter dan 273 meter. Jarak antar simpang yang relatif pendek sehingga pengaturan sinyal pada satu simpang secara langsung memengaruhi simpang berikutnya dan menjadikan koordinasi relevan diterapkan secara sistemik. Sedangkan analisis emisi dilakukan pada tahun 2026 berbasis data sekunder hasil survei tahun 2023 (Susilojati et al., 2023), dengan asumsi geometrik jalan dan pola pergerakan di kawasan tersebut belum berubah signifikan dalam rentang waktu tersebut.



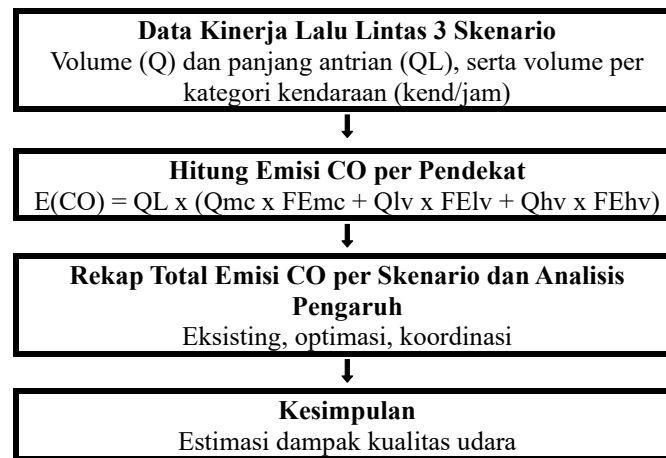
Gambar 1. Layout Wilayah Kajian Tiga Simpang Bersinyal di Jalan Soekarno Hatta, Kabupaten Kebumen (Susilojati et al., 2023)

2.2. Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan studi dokumentasi terhadap data sekunder yang seluruhnya bersumber dari kajian rekayasa lalu lintas Susilojati dkk. (2023) pada koridor yang sama. Data kinerja lalu lintas berupa volume kendaraan (smp/jam) dan panjang antrian (meter) pada delapan pendekat di tiga simpang untuk tiga skenario (eksisting, optimasi terpisah, dan koordinasi) diperoleh dari hasil analisis menggunakan MKJI 1997 dan Transyt 16. Selain rekapitulasi volume dalam smp/jam, lembar kerja survei yang sama turut memuat pencacahan lalu lintas terklasifikasi pada jam puncak yang identic berupa jumlah sepeda motor, kendaraan ringan, dan kendaraan berat dalam satuan kendaraan/jam, yang dipakai untuk menghitung emisi per kategori kendaraan. Data faktor emisi CO per kilometer untuk tiap kategori kendaraan bersumber dari Permen LH No. 12 Tahun 2010, sebagaimana dikutip Purnomoasri, Yuono, Sumina, dan Utama (2023), yang pada studi kasus Simpang Bejen, Kabupaten Karanganyar turut menghitung komposisi lalu lintas per kategori kendaraan (sepeda motor, mobil, bus, dan truk) sebelum mengalikannya dengan faktor emisi masing-masing. Pendekatan serupa juga diterapkan Luthfi, Firdausiyah, dan Yudono (2024) dalam menghitung emisi kendaraan angkutan barang berdasarkan kategori kendaraan mengacu regulasi yang sama. Pendekatan pengumpulan data sekunder secara umum memiliki preseden metodologi seperti pada penelitian di Simpang Masjid Kota Langsa yang juga mengestimasi beban emisi dari data volume dan antrian tanpa pengukuran konsentrasi udara langsung (Iqbal & Muammar, 2022). Meskipun demikian, karena data bersumber dari kajian 2023 maka keterbatasan validitas temporal ini dibahas lebih lanjut pada bagian Diskusi.

2.3. Teknik Analisis Data

Data dianalisis secara kuantitatif menggunakan kerangka Purnomoasri dkk. (2023), dengan satu penyesuaian pada perlakuan volume kendaraan. Volume yang dipakai Purnomoasri dkk. (2023) pada dasarnya bukan volume tunggal, melainkan volume per kategori kendaraan yang masing-masing dikalikan faktor emisinya sendiri sesuai Permen LH No. 12 Tahun 2010, sehingga penelitian ini mengikuti pendekatan aslinya tersebut secara konsisten melalui rumus $E(CO) = QL \times (Q_{mc} \times FE_{mc} + Q_{lv} \times FE_{lv} + Q_{hv} \times FE_{hv})$, dengan $E(CO)$ sebagai emisi CO (gram/jam); QL sebagai panjang antrian (km) yang menjadi proksi tingkat keterdampakan kemacetan; Q_{mc} , Q_{lv} , dan Q_{hv} berturut-turut sebagai volume sepeda motor, kendaraan ringan, dan kendaraan berat pada jam puncak dalam satuan kendaraan/jam bukan smp/jam; serta FE_{mc} , FE_{lv} , dan FE_{hv} sebagai faktor emisi CO masing-masing kategori sebesar 14 gram/km, 32,4 gram/km, dan rata-rata 9,7 gram/km dari faktor bus (11 gram/km) dan truk (8,4 gram/km) karena data survei tidak memisahkan keduanya secara terpisah (Permen LH No. 12 Tahun 2010, sebagaimana dikutip Purnomoasri dkk., 2023). Volume kendaraan per kategori diperoleh dari pencacahan lalu lintas terklasifikasi pada jam puncak yang sama dengan volume smp/jam pada Tabel 1, sehingga kedua besaran tetap konsisten satu sama lain meski dinyatakan dalam satuan berbeda. Penggunaan panjang antrian sebagai proksi memiliki dasar empiris karena membuktikan panjang antrian berkorelasi signifikan dengan kadar emisi CO pada lajur pendekat simpang (Aidita et al., 2022). Berbeda dari Purnomoasri dkk. (2023) yang hanya memakai panjang antrian terpanjang pada satu simpang, teknik analisis ini diterapkan pada seluruh delapan pendekat di tiga simpang secara simultan agar diperoleh gambaran sistem koridor secara utuh. Data kemudian direkapitulasi menjadi total emisi per skenario dan dianalisis melalui dua perbandingan yaitu penurunan emisi CO terhadap penurunan waktu tempuh koridor (44%), serta kontribusi optimasi terpisah dibanding kontribusi tambahan koordinasi terhadap penurunan emisi total. Keseluruhan tahapan ini dirangkum pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Penelitian

Estimasi emisi bertumpu pada delapan pendekat lalu lintas di tiga simpang kajian dengan volume kendaraan (Q) yang identik pada ketiga skenario karena optimasi dan koordinasi hanya mengubah pengaturan waktu sinyal, bukan permintaan lalu lintas (Susilojati et al., 2023). Variabel yang berubah antar skenario adalah panjang antrian tiap pendekat sebagaimana yang dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Volume Kendaraan dan Panjang Antrian pada Delapan Pendekat untuk Tiga Skenario (Eksisting, Optimasi, Koordinasi)

Simpang – pendekat	Q (smp/jam)	QL eksisting (m)	QL optimasi (m)	QL koordinasi (m)
Tugu Lawet – Jl. Ahmad Yani	1.020	118	71	63
Tugu Lawet – Jl. Pemuda	649	121	68	57
Tugu Lawet – Jl. Kusuma	988	80	51	42
Pegadaian – Jl. Soekarno Hatta Segmen 1	1.364	76	43	53
Pegadaian – Jl. Kolonel Sugiono	600	114	51	63
SMPN 5 – Jl. Soekarno Hatta Segmen 2	1.032	86	33	35
SMPN 5 – Jl. Mangga	116	27	13	13
SMPN 5 – Jl. S. Parman	255	59	29	29

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa panjang antrian pada seluruh delapan pendekat menurun dari kondisi eksisting menuju optimasi. Namun demikian, transisi dari optimasi menuju koordinasi tidak seragam. Tiga pendekat di Simpang Tugu Lawet (Jl. Ahmad Yani, Jl. Pemuda, dan Jl. Kusuma) tetap menurun secara konsisten, dua pendekat di Simpang SMPN 5 (Jl. Mangga dan Jl. S. Parman) relatif stabil sedangkan tiga pendekat lainnya justru mengalami peningkatan panjang antrian pada tahap koordinasi dibanding optimasi yaitu Jl. Soekarno Hatta Segmen 1 (43 m menjadi 53 m), Jl. Kolonel Sugiono (51 m menjadi 63 m) di Simpang Pegadaian, dan Jl. Soekarno Hatta Segmen 2 di Simpang SMPN 5 (33 m menjadi 35 m). Volume smp/jam pada Tabel 1 selanjutnya diuraikan menjadi volume kendaraan aktual per kategori pada jam puncak yang sama, sebagai dasar perhitungan emisi CO per golongan kendaraan. Tabel 2 merangkum hasil penguraian tersebut untuk kedelapan pendekat.

Tabel 2. Komposisi Kendaraan per Kategori pada Jam Puncak untuk Delapan Pendekat

Simpang – pendekat	MC (kend/jam)	LV (kend/jam)	HV (kend/jam)	Total (kend/jam)
Tugu Lawet – Jl. Ahmad Yani	2.036	590	18	2.644
Tugu Lawet – Jl. Pemuda	1.399	357	10	1.766
Tugu Lawet – Jl. Kusuma	2.363	506	7	2.876
Pegadaian – Jl. Soekarno Hatta Segmen 1	2.972	739	23	3.734
Pegadaian – Jl. Kolonel Sugiono	1.134	360	10	1.504
SMPN 5 – Jl. Soekarno Hatta Segmen 2	2.012	605	19	2.636
SMPN 5 – Jl. Mangga	383	40	0	423
SMPN 5 – Jl. S. Parman	768	96	4	868

Emisi CO dihitung dengan rumus $E(\text{CO}) = QL \times (Q_{mc} \times F_{Emc} + Q_{lv} \times F_{Elv} + Q_{hv} \times F_{Ehv})$ sebagaimana dijelaskan pada bagian 2.3. Sebagai ilustrasi, perhitungan untuk Jl. Soekarno Hatta Segmen 1 pada skenario eksisting menghasilkan $E = 0,076 \text{ km} \times (2.972 \text{ kend/jam} \times 14 \text{ gram/km} + 739 \text{ kend/jam} \times 32,4 \text{ gram/km} + 23 \text{ kend/jam} \times 9,7 \text{ gram/km}) = 0,076 \text{ km} \times 65.774,7 \text{ gram/km/jam} = 4.998,88 \text{ gram/jam}$. Perhitungan yang sama diterapkan pada seluruh pendekat dan skenario, menghasilkan rekapitulasi pada Tabel 3.

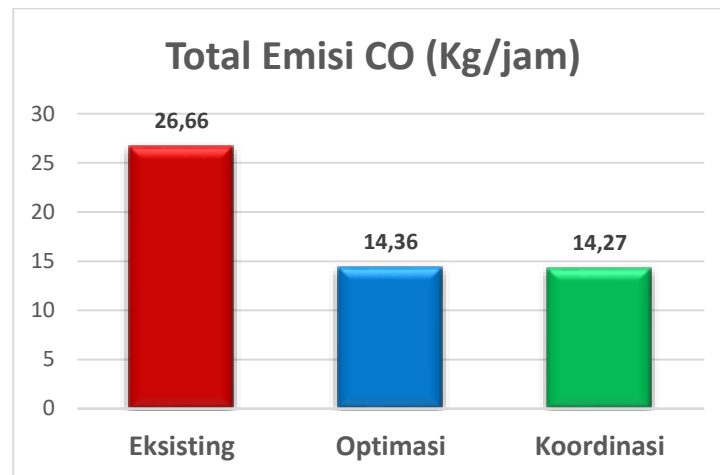
Tabel 3. Estimasi Emisi Karbon Monoksida (CO) per Pendekat pada Tiga Skenario

Simpang – pendekat	CO eksisting (g/jam)	CO optimasi (g/jam)	CO koordinasi (g/jam)
Tugu Lawet – Jl. Ahmad Yani	5.639,76	3.393,42	3.011,06
Tugu Lawet – Jl. Pemuda	3.781,23	2.124,99	1.781,24
Tugu Lawet – Jl. Kusuma	3.963,54	2.526,76	2.080,86
Pegadaian – Jl. Soekarno Hatta Segmen 1	4.998,88	2.828,31	3.486,06
Pegadaian – Jl. Kolonel Sugiono	3.150,62	1.409,49	1.741,13
SMPN 5 – Jl. Soekarno Hatta Segmen 2	4.124,07	1.582,49	1.678,40
SMPN 5 – Jl. Mangga	179,77	86,55	86,55
SMPN 5 – Jl. S. Parman	820,17	403,13	403,13
Total	26.658,03	14.355,14	14.268,44

Tabel 3 menunjukkan tiga pendekat bervolume tertinggi yaitu Jl. Ahmad Yani, Jl. Soekarno Hatta Segmen 1, dan Jl. Soekarno Hatta Segmen 2 yang juga konsisten menyumbang porsi emisi terbesar pada tiap skenario, sejalan dengan dominasi kendaraan pada ketiga pendekat tersebut di Tabel 2. Total emisi CO menurun dari 26.658,03 gram/jam pada kondisi eksisting menjadi 14.355,14 gram/jam pada kondisi optimasi, dan 14.268,44 gram/jam pada kondisi koordinasi. Persentase penurunan emisi terhadap kondisi eksisting untuk masing-masing skenario dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 3.

Tabel 4. Rekapitulasi Total Emisi CO dan Persentase Penurunan terhadap Kondisi Eksisting

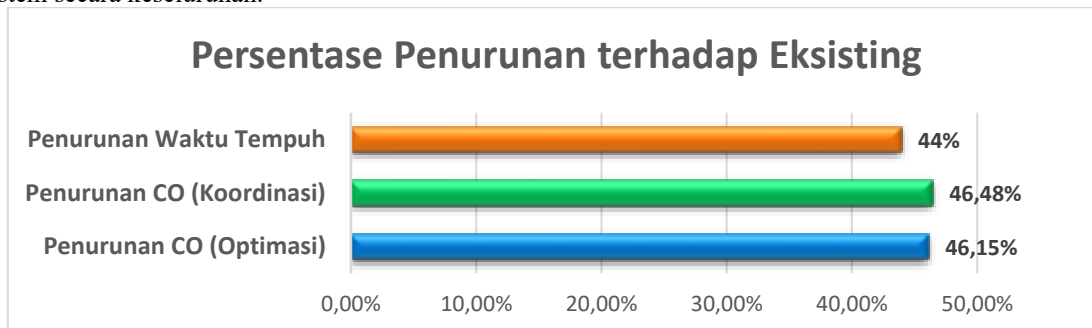
Skenario	Emisi CO (kg/jam)	Penurunan CO terhadap eksisting
Eksisting	26,66	-
Optimasi	14,36	46,15%
Koordinasi	14,27	46,48%



Gambar 3. Total Emisi CO yang Dihasilkan pada Tiga Skenario

Grafik ini memperlihatkan bahwa waktu tempuh koridor turun 44%, sementara emisi CO turun 46,48% pada skenario koordinasi yang artinya CO turun sedikit lebih tajam daripada waktu tempuh. Hal ini konsisten dengan argumen Muziansyah dkk. (2015) bahwa CO jauh lebih sensitif terhadap pola henti jalan dibandingkan dengan jarak atau waktu tempuh itu sendiri, karena mayoritas emisi CO terbentuk pada saat kendaraan berakselerasi dari posisi berhenti, bukan selama pergerakan bebas.

Namun ada temuan kedua yang lebih tajam yaitu dari 46,48% penurunan CO yang terjadi pada tahap koordinasi tetapi sebanyak 46,15% atau setara 99,3% dari total manfaat itu sudah tercapai pada tahap optimasi terpisah. Tahap koordinasi hanya menambah 86,7 gram/jam atau kurang dari seperlima persen dari total emisi eksisting. Koordinasi bahkan memperpanjang antrian pada tiga dari delapan pendekat yang dikaji sebagaimana telah dijelaskan pada Tabel 1 yang hampir menghapus tambahan manfaat emisi dari sistem secara keseluruhan.



Gambar 4. Persentas Penurunan terhadap Kondisi Eksisting

3.2. Diskusi

Temuan bahwa penurunan emisi CO (46,48%) melampaui penurunan waktu tempuh koridor (44%) memerlukan pembacaan yang berimbang dan tidak dapat langsung disimpulkan sebagai keberhasilan penuh koordinasi sinyal. Pola ini sejalan dengan bukti bahwa panjang antrian bukan jarak atau waktu tempuh semata tetapi berkorelasi lebih signifikan dengan kadar emisi CO pada lajur pendekat simpang karena mayoritas emisi CO terbentuk pada momen kendaraan berakselerasi dari posisi berhenti dan bukan selama pergerakan bebas (Aidita et al., 2022). Argumen ini juga konsisten dengan temuan bahwa sinyal adaptif berbasis data mampu menurunkan emisi karbon secara signifikan justru melalui pengurangan waktu *idle* dan pengereman kendaraan bukan semata melalui percepatan waktu tempuh (Wu et al., 2025). Secara konseptual emisi kendaraan pada persimpangan bersinyal sangat dipengaruhi oleh frekuensi dan durasi siklus percepatan perlambatan (*stop and go cycle*) sehingga setiap intervensi yang memperpendek antrian secara langsung memutus rantai pembentukan emisi pada sumbernya, bukan hanya memindahkan

kemacetan ke titik lain (Teodorović & Janić, 2022). Dengan demikian, sensitivitas CO terhadap pola henti jalan pada penelitian ini memperkuat argumen bahwa CO merupakan indikator yang tepat untuk menilai dampak intervensi berbasis pengurangan *stop and go*, sejalan dengan temuan bahwa emisi CO lebih ditentukan oleh interaksi volume dan kondisi arus dibanding satu variabel tunggal seperti jarak tempuh (Sasmita et al., 2022).

Namun, temuan kedua yang lebih tajam justru menantang asumsi umum bahwa koordinasi selalu lebih unggul dari segala aspek dibanding optimasi terpisah. Fakta bahwa 46,15% dari 46,48% penurunan emisi atau setara 99,3% dari total manfaat koordinasi sudah tercapai pada tahap optimasi konsisten dengan temuan bahwa intervensi lokal sederhana pada satu simpang dapat memberikan manfaat emisi yang signifikan tanpa memerlukan skema koordinasi sistem penuh (Purnomoasri et al., 2023). Temuan *trade off* ini juga konsisten dengan tinjauan komprehensif mengenai optimasi sinyal pada lingkungan konektivitas kendaraan, yang menegaskan bahwa optimasi berbasis koordinasi sistem selalu melibatkan *trade off* inheren antara efisiensi lokal per simpang dan efisiensi jaringan secara keseluruhan (Wang et al., 2021). Kedua manfaat tersebut dengan demikian beroperasi pada level yang berbeda dimana optimasi menyorot efisiensi lokal per simpang, sedangkan koordinasi menyorot efisiensi pergerakan sepanjang koridor secara keseluruhan, dengan konsekuensi *trade off* pada titik-titik tertentu seperti yang teramati pada tiga pendekat di Simpang Pegadaian dan Simpang SMPN 5.

Jika dikaitkan dengan risiko kesehatan pada masyarakat yang beraktivitas di tepi jalan seperti pedagang Pasar Tumenggungan, penurunan emisi CO sebesar 46,15% (optimasi) maupun 46,48% (koordinasi) berpotensi mengurangi risiko paparan kumulatif bagi kelompok yang beraktivitas dalam durasi lama di tepi jalan padat (Eka Suartawan et al., 2022; Hazsya et al., 2018; Raming et al., 2022; Surahman & Susilo, 2021). Perlu dicatat bahwa penelitian ini menghitung beban emisi dari sumber bukan hanya mengukur konsentrasi CO ambien maupun paparan individu secara langsung. Oleh karena itu, potensi manfaat kesehatan tersebut masih memerlukan verifikasi lebih lanjut melalui pengukuran kualitas udara di lapangan. Meskipun demikian, dua keterbatasan penelitian ini perlu digarisbawahi agar interpretasi temuan tidak berlebihan. Pertama, panjang antrian dipakai sebagai proksi jarak terdampak dan bukan jarak tempuh literal, sehingga pendekatan ini tetap merupakan penyederhanaan yang idealnya diuji lebih lanjut melalui pengukuran konsentrasi CO langsung di lapangan. Kedua, data volume dan komposisi kendaraan bersumber dari survei tahun 2023 yang belum tentu mencerminkan pertumbuhan lalu lintas terkini di koridor tersebut.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa koordinasi tiga simpang bersinyal di Jalan Soekarno Hatta, Kabupaten Kebumen, menurunkan emisi CO dari 26,66 kg/jam pada kondisi eksisting menjadi 14,27 kg/jam pada kondisi terkoordinasi, atau turun sebesar 46,48%. Penurunan yang secara proporsional sedikit melampaui penurunan waktu tempuh koridor sebesar 44% menunjukkan bahwa CO memang lebih sensitif terhadap pengurangan pola henti jalan dibanding jarak tempuh itu sendiri. Namun temuan yang lebih penting adalah bahwa optimasi simpang secara terpisah sudah menyumbang 46,15% dari 46,48% penurunan tersebut, atau setara 99,3% dari total manfaat koordinasi. Koordinasi sendiri hanya menambah manfaat emisi yang sangat kecil dan bahkan memperpanjang antrian pada tiga dari delapan pendekat yang dikaji, sehingga manfaat koordinasi tampaknya lebih terasa pada efisiensi waktu tempuh sistem secara keseluruhan ketimbang pada pengurangan emisi lokal per simpang. Bagi pengambil kebijakan, temuan ini memberikan Kesimpulan bahwa optimasi terpisah sudah cukup untuk menangkap sebagian besar manfaat lingkungan sementara investasi tambahan pada sistem koordinasi perlu dipertimbangkan terutama dari sisi efisiensi waktu tempuh. Kesimpulan ini perlu dibaca dengan mempertimbangkan keterbatasan penelitian yaitu penggunaan panjang antrian sebagai proksi jarak terdampak, serta data volume dan komposisi lalu lintas tahun 2023 yang belum mencerminkan kondisi terkini. Penelitian selanjutnya disarankan memverifikasi temuan ini dengan pengukuran konsentrasi CO langsung di lapangan, memisahkan faktor emisi bus dan truk secara terpisah, serta menguji generalisasi pola optimasi dan koordinasi ini pada sistem simpang lain dengan karakteristik geometrik berbeda menggunakan data lalu lintas terkini.

Bibliografi

- Aidita, U., Murtiono, E. S., & Nurhidayati, A. (2022). Pengaruh Tundaan Kendaraan Dan Panjang Antrian Terhadap Kadar Emisi Gas Karbon Monoksida (CO) Kendaraan. *Indonesian Journal Of Civil Engineering Education*, 7(1), 72. <https://doi.org/10.20961/ijcee.v7i1.60726>
- Aryo Sasmita, Muhammad Reza, Shinta Elystia, & Syarah Adriana. (2022). Analisis Pengaruh Kecepatan Dan Volume Kendaraan Terhadap Emisi Dan Konsentrasi Karbon Monoksida Di Jalan Jenderal Sudirman, Kota Pekanbaru. *Jurnal Teknik Sipil*, 16(4), 269–279.
- Binning, J. C. (2019). *Transyt 16 User Guide*. Crowthorne: TRL Software.
- Eka Suartawan, P., Sukmayasa, I. M., & Mardikawati, B. (2022). Pengaruh Kebijakan Pembatasan Kegiatan Wilayah Bali Terhadap Keluaran Emisi Gas Buang Kendaraan (Co Dan Nox) Di Jalan Imam Bonjol Denpasar Pada Masa Pandemi Covid-19. *Jurnal Penelitian Sekolah Tinggi Transportasi Darat*, 13(2), 20–29. <https://doi.org/10.55511/jpstd.v13i2.639>
- Hazsya, M., Nurjazuli, N., & Dangiran, H. L. (2018). Hubungan Konsentrasi Karbon Monoksida (Co) Dan Faktor-Faktor Resiko Dengan Konsentrasi C0hb Dalam Darah Pada Masyarakat Beresiko Di Sepanjang Jalan Setiabudi Semarang. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 6(6), 241–250.
- Iqbal, I., & Muammar, R. (2022). Kajian Polusi Udara Dari Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor Pada Simpang Masjid Raya Kota Langsa. *Justek: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 5(2), 125. <https://doi.org/10.31764/justek.v5i2.11475>
- Luthfi, M. A., Firdausiyah, N., & Yudono, A. (2024). Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca Kendaraan Angkutan Barang Di Jalan Sunandar Priyo Sudarmo Kota Malang. *Planning for Urban Region and Environment Journal (PURE)*, 13(2), 1–12.
- Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) (1997).
- Muziansyah, D., Sulistyorini, R., & Sebayang, S. (2015). Model Emisi Gas Buangan Kendaraan Bermotor Akibat Aktivitas Transportasi (Studi Kasus: Terminal Pasar Bawah Ramayana Koita Bandar. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, 3(1), 57–70. <https://doi.org/10.23960/jrsdd.v3i1.394>
- Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 12 Tahun 2010 Tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara Di Daerah (2010).
- 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. <https://doi.org/10.20961/enviro.v25i1.78524>
- Rambing, V. V., Umboh, J., & Warouw, F. (2022). Literature Review: Gambaran Risiko Kesehatan Pada Masyarakat Akibat Paparan Gas Karbon Monoksida (Co). *Kesmas*, 11, 95–101.
- Surahman, G., & Susilo, B. H. (2021). Evaluasi Kinerja Simpang Bersinyal untuk Menunjang Penerapan Eco – Driving. *Jurnal Forum Mekanika*, 10(2). <https://doi.org/10.33322/forummekanika.v10i2.1475>
- Susilojati, W., Pratama, P. P., & Seno, W. (2023). *Koordinasi Simpang Bersinyal pada Ruas Jalan Soekarno Hatta Kabupaten Kebumen*. Politeknik Transportasi Darat Indonesia - STTD.
- Teodorović, D. ., & Janić, Milan. (2022). *Transportation engineering : theory, practice and modeling*. Butterworth-Heinemann.
- Wang, J., Jiang, S., Qiu, Y., Zhang, Y., Ying, J., & Du, Y. (2021). Traffic Signal Optimization under Connected-Vehicle Environment: An Overview. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2021/3584569>
- Wu, K., Ding, J., Lin, J., Zheng, G., Sun, Y., Fang, J., Xu, T., Zhu, Y., & Gu, B. (2025). Big-data empowered traffic signal control could reduce urban carbon emission. *Nature Communications*, 16(1), 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56701-4>