

PENGARUH PEMBANGUNAN TOL SOLO-YOGYA TERHADAP KINERJA SIMPANG BERSINYAL (THE EFFECT OF SOLO-YOGYA TOLL ROAD DEVELOPMENT ON THE PERFORMANCE OF SIGNAL INTERSECTIONS)

**Wahyuningsih Tri Hermani^{1*)}, Ary Setyawan²⁾, Budi Yulianto²⁾,
AR. Hanung Triyono³⁾**

¹⁾BBPJJN Jawa Tengah – D.I. Yogyakarta, Indonesia

²⁾Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

³⁾Dinas PU Bina Marga dan Cipta Karya Provinsi Jawa Tengah, Semarang, Indonesia

^{*)}wahyuningsihth@student.uns.ac.id

Diterima: 27 Juli 2023 ; direvisi: 05 Juni 2024; disetujui: : 24 Juni 2024.

ABSTRAK

Pembangunan jalan tol Solo-Yogyakarta merupakan bagian dari Proyek Strategis Nasional. Pada tahap pembangunan, infrastruktur jalan tol perlu menilai dampak lalu lintas terhadap ruas jalan dan simpang di sekitarnya, mengingat banyak gangguan keamanan dan keselamatan. Evaluasi kinerja jalan sangat penting untuk mengatasi permasalahan lalu lintas yang mungkin muncul selama operasional jalan tol di masa mendatang. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghitung kinerja lalu lintas di simpang bersinyal yang dipengaruhi pembangunan jalan tol Solo-Yogya. Lokasi yang diteliti adalah empat simpang bersinyal di jalan tol Solo-Yogya dengan menggunakan data primer jumlah kendaraan, waktu tempuh, dan kecepatan kendaraan. Kinerja simpang bersinyal dihitung menggunakan Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) 2023, sedangkan distribusi pergerakan masa depan dilakukan menggunakan peranti lunak JICA STRADA dan model gravitasi dengan tarif jalan tol yang berlaku. Pertumbuhan lalu lintas yang digunakan adalah 5,6% per tahun menggunakan pertimbangan data jumlah kendaraan dalam Jawa Tengah Dalam Angka. Kinerja simpang bersinyal setelah pembangunan jalan tol Solo-Yogya tahun 2022 memiliki nilai Nisbah Volume Kapasitas (NVK) rata-rata sebesar 0,78 dan pada tahun 2046 sebesar 1,47. Di simpang-3 Bangak Barat dan simpang-4 Condong Catur, disarankan untuk membangun Simpang Susun sebelum tahun 2032. Rekomendasi tersebut untuk mengurangi keterlambatan kendaraan karena pada tahun 2032 nilai Nisbah Volume Kapasitas lebih dari 0,8. Studi ini memberikan wawasan mengenai kombinasi metode untuk meramalkan pertumbuhan lalu lintas pada simpang bersinyal di sekitar jalan bebas hambatan.

Kata Kunci: kinerja lalu lintas, JICA STRADA, model gravitasi, kapasitas simpang bersinyal, APILL

ABSTRACT

The construction of the Solo-Yogyakarta toll road is part of the National Strategic Project. At the construction stage, toll road infrastructure needs to assess the impact of traffic on surrounding roads and intersections, considering the many security and safety problems. Road performance evaluation is critical to overcome traffic problems that may arise during toll road operations in the future. This research aims to calculate traffic performance at signalized intersections, which are influenced by the construction of the Solo-Yogya toll road. The locations studied were four signalized intersections on the Solo-Yogya toll road using primary data on the number of vehicles, travel time, and vehicle speed. The performance of signalized intersections is calculated using the 2023 Indonesian Road Capacity Guidelines, while the distribution of future movements is carried out using JICA STRADA Software and the Gravity model with applicable toll road rates. The traffic growth is 5.6% per year, according to data on the number of vehicles in Jawa Tengah Dalam Angka. The performance of signalized intersections after constructing the Solo-Yogya toll road in 2022 has an average Volume Capacity Ratio (VCR) value of 0.78. In 2046, it will be 1.47. At intersection-3 Bangak Barat and intersection-4 Condong Catur, building an Interchange before 2032 is recommended. The recommendation is to reduce vehicle delays, as in 2032, the VCR value will be more than 0.8. The study gives insight into the combined methods of forecasting traffic growth on signalized intersections near freeways.

Keywords: traffic performance, JICA STRADA, gravity model, signalized intersection capacity, APILL

PENDAHULUAN

Pemerintah melakukan pembangunan infrastruktur jalan setiap tahun. Pembangunan infrastruktur jalan yang berkelanjutan dapat mempercepat pemerataan perekonomian antarwilayah [(Calderón et al. 2023; Putra, Amalia, and Dewi 2019; Du et al. 2019; Wang et al. 2022; Liu, 2021). Salah satu pembangunan jalan, yaitu pembangunan jalan tol Solo-Yogyakarta sepanjang 96,51 km yang merupakan bagian dari Proyek Strategis Nasional sesuai dengan Peraturan Presiden Nomor 56 Tahun 2018. Pembangunan jalan tol Solo-Yogyakarta memengaruhi kinerja lalu lintas dan meningkatkan pelayanan jalan (Jamail, Halim, and Jamail 2020; Husin et al. 2021; Zhou et al. 2021; Mu and Gong 2023). Di masa depan, jaringan lalu lintas akan berubah seiring dengan perubahan beban kendaraan yang merupakan bagian dari jalan (Shatanawi, Alatawneh, and Mészáros 2022; Bagheri et al. 2020).

Pada tahap pembangunan, infrastruktur jalan tol harus menilai dampak lalu lintas mengingat banyak gangguan keamanan dan keselamatan. Volume lalu lintas pada negara berkembang dalam beberapa tahun terakhir telah meningkat rata-rata 4,13%, yang menyebabkan penurunan tingkat layanan, waktu perjalanan yang lebih lama, dan peningkatan gangguan keamanan (Abbas, Obaid, and Alwash 2022; Duraku and Ramadani 2019; Khan, Gulliver, and Imran 2021).

Adanya infrastruktur jalan baru, seperti jalan tol, memberikan alternatif rute yang akan digunakan masyarakat untuk mencapai destinasi wisata. Antisipasi dampak lalu lintas dilakukan dengan melakukan manajemen dan rekayasa lalu lintas. Evaluasi kinerja jalan sangat penting untuk mengatasi permasalahan lalu lintas selama operasional jalan tol di masa mendatang (Hermani et al. 2023; Suryani, Mutiawati, and Faisal 2023).

Masalah transportasi disebabkan juga oleh meningkatnya aktivitas pembangunan dan kemacetan lalu lintas. Pembangunan jalan tol Solo-Yogya mempunyai dampak peningkatan kemacetan pada simpang jalan dan ruas jalan di sekitar gerbang tol. Oleh karena itu, diperlukan perencanaan yang baik untuk mengatasi permasalahan transportasi (Etinosa et al. 2022).

Infrastruktur transportasi yang buruk mengakibatkan aksesibilitas yang buruk terhadap mata pencaharian dan menambah masalah kemacetan (Zhang et al. 2020; Baniya, Rocha, and Ruta 2020; Pokharel et al. 2021; Simini et al. 2021). Selain itu, penilaian rencana investasi belum memadai untuk mencegah masalah lalu lintas [(Alam et al. 2022; Nurjaman et al. 2020; Boulos, Tsouros, & Holopaine 2015). Pemerintah hanya menghitung masa konsesi dengan menentukan nilai investasi. Dampak pembangunan infrastruktur belum menjadi pertimbangan keterlambatan kendaraan terhadap akses jalan di sekitar pembangunan. Keterlambatan kendaraan mengakibatkan pengguna menghabiskan lebih banyak dana untuk biaya operasional kendaraan.

Peningkatan jumlah kendaraan pada simpang bersinyal dan ruas jalan sekitar gerbang tol mengakibatkan tingkat kemacetan semakin meningkat. Simpang bersinyal adalah pertemuan dua atau lebih ruas jalan sebidang yang diatur oleh Alat Pemberi Isyarat Lalu Lintas (APILL) (DJBM 2023). Ukuran kinerja simpang bersinyal terkait dengan kondisi geometris, lingkungan, dan lalu lintas (PUPR 1997). Kondisi geometris digambarkan dalam bentuk sketsa yang memberikan informasi lebar jalan, batas pinggir jalan, lebar bahu, lebar median jalan, dan arah. Kondisi lingkungan dihitung berdasarkan jenis lingkungan jalan, kelas hambatan samping, dan ukuran kelas kota. Metode penentuan kinerja simpang bersinyal ditinjau dari nilai kapasitas, tingkat kejenuhan, waktu tunda, dan peluang antrean.

Tujuan paper ini adalah menghitung kinerja lalu lintas pada simpang bersinyal sebagai pengaruh dari pembangunan jalan tol Solo-Yogya. Hal ini penting untuk menganalisis perkiraan jumlah pergerakan dan peningkatan lalu lintas kendaraan di masa depan menggunakan estimasi Matriks Asal-Tujuan (MAT), peranti lunak JICA STRADA, dan model gravitasi (Jamilah and Handayani 2018). Model Gravitasi adalah pemodelan yang digunakan untuk membuat parameter hubungan pergerakan antar zona (Breyer, Rydergren, and Gundlegård 2020).

HIPOTESIS

Kinerja simpang bersinyal pada pembangunan jalan tol Solo-Yogya akan menurun sejalan dengan penambahan jumlah lalu lintas kendaraan dan kapasitas jalan yang cenderung tetap. Kinerja jalan yang menurun

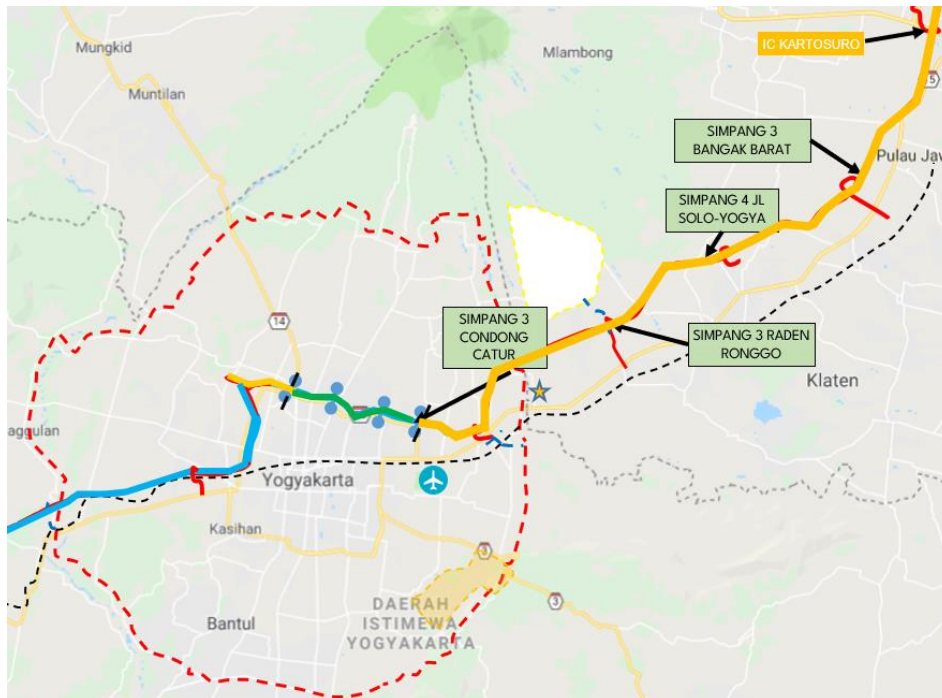
mengakibatkan waktu tempuh dan waktu tundaan menjadi bertambah.

METODOLOGI

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada tahun 2022 menggunakan metode kuantitatif dengan menganalisis seluruh pergerakan lalu lintas di empat simpang bersinyal jalan tol Solo-Yogya. Simpang bersinyal jalan tol Solo-Yogya yang dianalisa, yaitu Simpang 3 Bangak Barat, Simpang 4 Jalan Solo-Yogyakarta, Simpang 3 Raden Ronggo, dan Simpang 4 Condongcatur. Geometrik ke-4 simpang bersinyal adalah jalan datar dengan jumlah 4 lajur jalan.

Total panjang jalan tol Solo-Yogyakarta sepanjang 96,51 Km. Zonasi pemodelan dibagi menjadi 16 zona yang terdiri atas 11 zona dalam dan 5 zona luar.



Gambar 1. Lokasi penelitian di empat simpang bersinyal jalan tol Solo-Yogya

Tipe jenis empat simpang bersinyal tol Solo-Yogya adalah persimpangan sebidang dengan geometrik jalan datar.

Metode Analisa Data

Distribusi pergerakan masa depan dapat diperkirakan dengan peranti lunak JICA

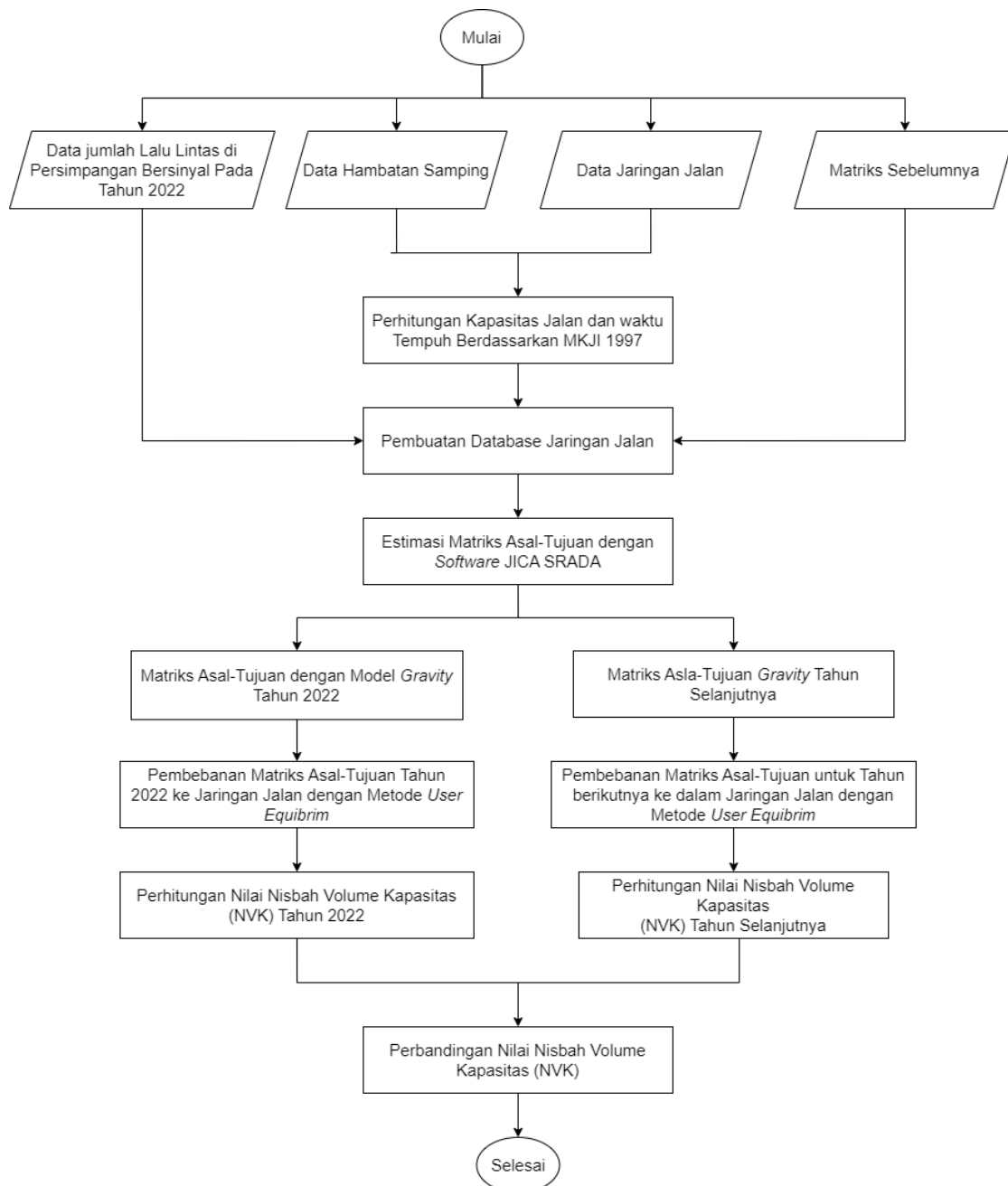
STRADA dan model gravitasi (*gravity model*). Dalam persamaan model gravitasi, ada nilai parameter untuk memperkirakan distribusi pergerakan di tahun mendatang. Model gravitasi untuk perhitungan lalu lintas masa depan telah banyak digunakan untuk perjalanan komuter dan dapat menggambarkan perilaku yang mengikuti pola yang mirip dengan hukum

gravitasi Newton yang terkenal (Martinez, Garcia, and Kumar 2021; Wu et al. 2021).

Instrumen sebagai alat untuk memperoleh data dilakukan dengan memasukkan data perhitungan lalu lintas, data hambatan samping, data jaringan jalan, perhitungan kapasitas jalan, dan waktu tempuh sesuai dengan standar Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997, membuat *database* jaringan jalan dan memperkirakan MAT

dengan peranti lunak JICA STRADA dan model Gravitasi .

Studi kasus dilakukan dengan pendekatan model gravitasi untuk memperkirakan besarnya pola pergerakan asal tujuan, dan fungsi hambatan yang digunakan adalah *Eksponensial-Negatif* dengan penyelesaian menggunakan metode *Least Squares*. Alur penelitian disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alur penelitian

Model gravitasi sebagai distribusi matriks tujuan dengan model transportasi menghasilkan pergerakan pada tahun perencanaan. Proses pendistribusian sarana merupakan komponen utama dari data MAT yang dibutuhkan dalam proses perencanaan dan pemodelan sistem transportasi (Akbaridin et al. 2019).

Model gravitasi digunakan untuk memodelkan pergerakan antarzona dengan MAT (Martinez, Garcia, and Kumar 2021; Dombalyan et al. 2017). Model gabungan dari distribusi pergerakan lalu lintas dan aksesibilitas antarzona ini dapat dimodelkan dengan model gravitasi. Pergerakan transportasi dipengaruhi oleh pergerakan antarzona jalan. Dalam pola gerakan ini, faktor penyeimbang dapat dibentuk dalam batas antara besaran tarikan dan bangkitan perjalanan lalu lintas yang disajikan pada persamaan:

$$T_{id} = O_i \cdot D_d \cdot A_i \cdot B_d \cdot f(C_{id}) \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

- O_i = Pergerakan total dari zona asal
- D_d = Total pergerakan dari zona tujuan
- A_i, B_d = Faktor penyeimbang zona
- $f(C_{id})$ = Fungsi penghalang
- T_{id} = Total pergerakan antarzona

Penentuan nilai aksesibilitas pergerakan antarzona menggunakan fungsi jarak, waktu, dan biaya (Hidayat dan Niskhi 2021).

Metode *Least Squares* atau Kuadrat Terkecil memungkinkan kita untuk menentukan nilai parameter β dalam persamaan model gravitasi yang tidak diketahui dalam persamaan. Penggunaan metode *Least Squares* meminimalkan perbedaan hasil data pengamatan dan pemodelan pergerakan lalu lintas. Model Metode Kuadrat Terkecil menggunakan persamaan:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = f = \sum_{i=1}^N \sum_{d=1}^N \left[\frac{2}{T} (T_{id} - \hat{T}_{id}) \cdot \frac{\partial T_{id}}{\partial \beta} \right] \quad (2)$$

Keterangan:

- f : tarikan dan bangkitan lalu lintas
- N : tahun ke-n
- T_{id} : jumlah perjalanan di masa yang akan datang di zona i

Proses perancangan fasilitas jalan dari studi kelayakan investasi, dapat digunakan untuk peramalan lalu lintas. Faktor-faktor yang terlibat dalam penentuan jaringan jalan yang kompleks dapat dilakukan dengan pemodelan

yang tepat (Dombalyan et al. 2017). Perangkat lunak JICA STRADA dan model gravitasi digunakan sebagai pemodelan lalu lintas masa depan.

Indikator uji statistik sebagai analisis regresi linier digunakan untuk mendapatkan hasil pemodelan arus lalu lintas dengan jumlah lalu lintas aktual berdasarkan data survei. Nilai kesamaan pemodelan ini menggunakan nilai koefisien determinasi (R^2).

$$R^2 = \frac{\sum_i (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{\sum_i (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \dots \dots \dots (3)$$

Pengolahan Database

Jaringan jalan dapat diproses atau dibentuk menggunakan peranti lunak JICA STRA. Pengolahan data jaringan jalan berdasarkan kota/kabupaten dimulai dengan pembagian zona. ArcGIS digunakan untuk menentukan data koordinat volume lalu lintas yang akan dimasukkan ke dalam jaringan jalan. Data nilai matriks dari perhitungan tahap sebelumnya kemudian digunakan sebagai data input pada peranti lunak JICA STRADA untuk selanjutnya menghasilkan analisis model lalu lintas. MAT dengan model gravitasi telah dikalibrasi sebelumnya dengan nilai β .

Estimasi MAT sebagai penilaian performa jalan untuk beberapa tahun ke depan diperoleh dari nilai pemodelan MAT dengan menggunakan angka pertumbuhan lalu lintas sebesar 5,6%. MAT ini menggunakan model gravitasi untuk menghitung nilai C_{id} 2046. MAT masing-masing untuk tahun 2022 dan 2046 digunakan untuk menghitung jumlah volume lalu lintas dengan menggunakan nilai pertumbuhan lalu lintas. Nilai Nisbah Volume Kapasitas (NVK) diperoleh dari nilai volume lalu lintas yang melewati ruas jalan dibagi dengan kapasitas jalan tersebut.

HASIL DAN ANALISIS

Kinerja Jalan

Penurunan performa jalan disebabkan oleh beberapa hal di antaranya peningkatan jumlah lalu lintas pengguna jalan. Penurunan kinerja mengakibatkan penurunan kualitas layanan, penurunan kecepatan, dan peningkatan waktu perjalanan. Pelayanan kepada pengguna jalan dapat ditingkatkan dengan menyediakan

infrastruktur jalan dengan performa jalan yang baik. Nilai NVK pada simpang bersinyal jalan tol Solo-Yogya dapat dilihat dari kinerja dan perencanaan jalan saat ini dan ke depan. Kondisi jalan yang memiliki nilai NVK $\leq 0,8$ dinilai stabil dan belum perlu dilakukan pelebaran jalan untuk meningkatkan kapasitas jalan tersebut. Sementara itu, jalan dengan nilai $\geq 0,8$ dikategorikan sebagai jalan yang tidak stabil bahkan kritis. Jalan kritis memerlukan penanganan berupa pelebaran jalan atau peningkatan manajemen jalan atau kapasitas rekayasa untuk memperbaiki atau mengoptimalkan jaringan jalan.

Nisbah Volume Kapasitas (NVK)

Parameter lalu lintas seperti kepadatan lalu lintas, kecepatan, dan nilai NVK dapat digunakan untuk menilai kinerja lalu lintas. Faktor utama penentuan tingkat kinerja persimpangan jalan menggunakan rasio volume lalu lintas terhadap kapasitas jalan berdasarkan Pedoman Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997 (PUPR 1997).

Rumus NVK adalah sebagai berikut:

$$NVK = \frac{V}{C} \dots\dots\dots(4)$$

Dimana:

NVK = Nisbah Volume Kapasitas

V = Volume Lalu Lintas

C = Kapasitas (smp/jam)

Prakiraan lalu lintas dapat digunakan untuk analisis dan rekomendasi pembangunan yang lebih baik di masa depan untuk mengatasi permasalahan jalan (Tamin 2000). Penjelasan nilai NVK pada berbagai kondisi tercantum dalam tabel berikut.

Tabel 1. Berbagai kondisi Nilai Nisbah Volume-Kapasitas

NVK	Keterangan
>1,0	Kondisi jalan kritis
0,8 – 1,0	Kondisi jalan tidak stabil
< 0,8	Kondisi jalan stabil

Sumber: Tamin (2000)

Waktu Tunda Rata-Rata (detik/smp)

Perilaku lalu lintas berdasarkan Pedoman Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997 diwakili oleh tingkat pelayanan, ukuran kualitatif yang mencerminkan persepsi pengemudi terhadap kualitas mengendarai

kendaraan. Tingkat pelayanan jalan diklasifikasikan sebagai Pelayanan Tingkat A sampai F (Marlok. 1991). Hubungan dan perbandingan tingkat layanan jalan dijelaskan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hubungan tingkat ayanan dan kondisi jalan

Tingkat Pelayanan	Kondisi Jalan	Rasio Q/C
A	Arus bebas dengan kecepatan tinggi, pengemudi dapat memilih kecepatan yang diinginkan tanpa penundaan	0,00 – 0,20
B	Arus stabil, kondisi lalu lintas membatasi kecepatan, dan pengemudi memiliki kebebasan untuk memilih kecepatan	0,20 – 0,44
C	Arusnya stabil, dan kecepatan serta pergerakan kendaraan terbatas pada kondisi lalu lintas	0,45 – 0,74
D	Arus yang mendekati tidak stabil, pengemudi masih dapat mengontrol kecepatan, dan perbandingan Q/C masih dapat ditoleransi	0,75- 0,85
E	Arusnya tidak stabil, volume lalu lintas mendekati kapasitas, dan kecepatan terkadang macet	0,85 – 1,00
F	Kemacetan lalu lintas, kecepatan rendah, hambatan atau penundaan signifikan	> 1,00

Sumber: Morlok 1985: 213.

Tabel 3. Nilai NVK pada empat simpang bersinyal tol Solo-Yogya pada tahun 2022

Lokasi Simpang	LHR (smp/jam)	C (smp/jam)	Tahun 2022		LOS
			DS	Tundaan Rata-rata (det/smp)	
Bangak Barat	340	622	0,55	40,1	D
Jl Solo-Yogya Raden Ronggo	1069	1521	0,70	38,4	D
Condong	476	714	0,67	42,7	E
catur	927	1205	0,77	602,7	F

Tabel 4. Nilai NVK pada empat simpang bersinyal tol Solo-Yogya pada tahun 2046

Lokasi Simpang	Tahun 2046				LOS
	LHR (smp/jam)	C (smp/jam)	DS	Tundaan Rata-rata (det/smp)	
Bangak Barat	1258	622	2,02	1886,6	F
Jl Solo-Yogya Raden	1452	1521	0,95	655	F
Ronggo	762	714	1,07	201,5	F
Condong catur	1259	1205	1,04	994	F

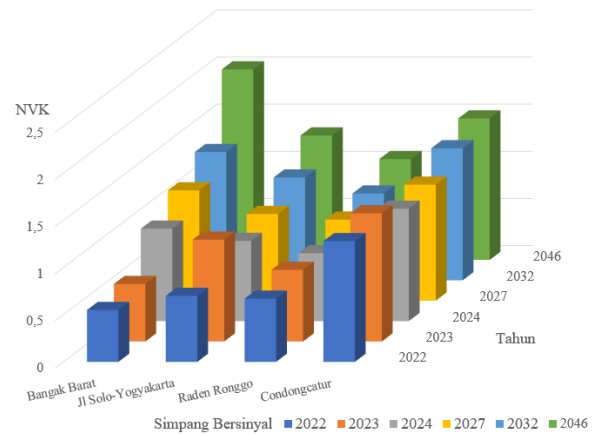
Dengan data Lalu Lintas Harian (LHR) dan kapasitas (C), diperoleh derajat kejenuhan (DS) pada setiap simpang. Pada empat simpang sebidang jalan tol Solo-Yogya nilai ruas jalan $0 \leq VCR < 0,4$ pada tahun 2022 sebesar 0,0 % dan pada tahun 2046 sebesar 0 %, nilai ruas jalan $0,4 \leq VCR < 0,8$ pada tahun 2022 sebesar 75,0 % dan pada tahun 2046 sebesar 0 %. Pada tahun 2022 nilai VCR ruas jalan $\geq 0,8 = 25,0$ % dan pada tahun 2046 sebesar 100,0% (Tabel 3 dan Tabel 4).

Tabel 5. Nilai NVK pada simpang bersinyal tol Solo-Yogya pada tahun 2022-2046

Lokasi Simpang	NVK (Tahun)					
	2022	2023	2024	2027	2032	2046
Bangak Barat	0,55	0,61	0,70	0,87	1,36	2,02
Jl Solo-Yogya Raden	0,70	0,75	0,78	0,80	0,83	0,95
Ronggo	0,67	0,71	0,72	0,86	0,92	1,07
Condong catur	0,77	0,80	0,82	0,88	0,91	1,04

Pembangunan jalan tol Solo-Yogya akan dilakukan mulai tahun 2023 hingga 2024. Selanjutnya, pada tahun 2024-2026 adalah masa operasional jalan tol. Perhitungan prakiraan lalu lintas dilakukan mulai dari awal pengoperasian jalan tol Solo-Yogya, yaitu pada tahun 2024, dan berakhir pada tahun 2046, setelah masa konsesi pembangunan jalan tol Solo-Yogya berakhir selama dua puluh dua tahun.

Nilai NVK Pada Simpang Bersinyal Tol Solo-yogya Tahun 2022-2046



Gambar 3. NVK di simpang bersinyal tol Solo-Yogya pada tahun 2022-2046

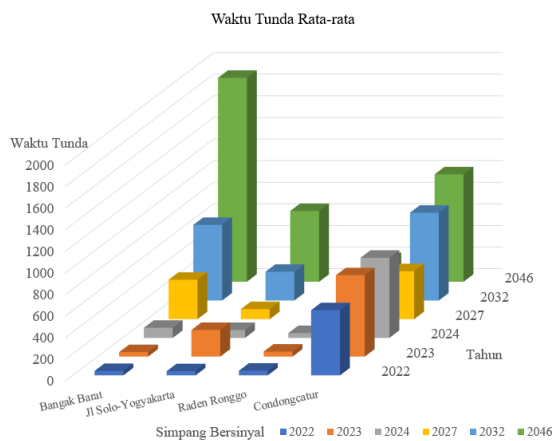
Kinerja simpang bersinyal pada pembangunan jalan tol Solo-Yogya tahun 2022 memiliki nilai NVK rata-rata sebesar 0,78 dengan nilai tertinggi pada simpang 4 Condongcatur sebesar 1,28 dan nilai terendah pada simpang 3 Bangak Barat sebesar 0,55. Pada tahun 2046, simpang bersinyal dalam pembangunan jalan tol Solo-Yogya memiliki Nilai NVK rata-rata sebesar 1,47 dengan nilai tertinggi di simpang 3 Bangak Barat sebesar 2,02 dan nilai terendah di simpang 3 Raden Ronggo sebesar 1,07.

Waktu Tunda Rata-rata

Parameter penting dalam desain jalan termasuk kecepatan. Parameter kecepatan ini adalah informasi tentang kondisi perjalanan dan tingkat layanan. Kendaraan yang berhenti atau tidak dapat berjalan pada kecepatan yang diinginkan adalah penundaan yang menyebabkan peningkatan waktu tempuh untuk perjalanan. Rata-rata Waktu Tunda pada empat simpang bersinyal jalan tol Solo-Yogya pada tahun 2022 dan 2046 adalah sebagai berikut:

Tabel 6. Waktu Tunda Rata-Rata

Lokasi Simpang	Tundaan Simpang (detik)					
	2022	2023	2024	2027	2032	2046
Bangak Barat	40,1	41,6	93,7	364,6	699,2	1886,6
Jl Solo-Yogya Raden	38,4	246,3	73,1	92,9	265,6	655
Ronggo	42,7	46,3	44,6	54,3	67,2	201,5
Condong catur	602,7	752,3	741,4	444,4	811,8	994,0



Gambar 4. Rata-rata waktu tunda tahun 2022 – 2046

Waktu tunda pada simpang bersinyal pembangunan jalan tol Solo-Yogya tahun 2022 rata-rata 180,9 detik dan masuk dalam kategori service level D. Kategori D pada Tingkat Layanan (LOS) berarti arus mendekati tidak stabil, pengemudi masih dapat mengontrol kecepatan, dan perbandingan Q/C masih dapat ditoleransi. Waktu tunda di simpang bersinyal pembangunan jalan tol Solo-Yogya pada 2046 rata-rata 934,2 detik, termasuk dalam kategori tingkat layanan F. Kategori F pada Tingkat Layanan (LOS) berarti terjadi kemacetan lalu lintas, kecepatan rendah, hambatan atau penundaan signifikan. Waktu tunda terbesar di persimpangan 4 Condongcatur pada tahun 2022 adalah 602,7 detik dan pada tahun 2046 pada simpang 3 Bangk Barat dengan rata-rata 1886,6 detik.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penggunaan metode penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 2 dapat memodelkan pertumbuhan volume lalu lintas kendaraan dan kapasitas simpang pada simpang bersinyal. Dari hasil studi ini, beberapa kesimpulan diperoleh. Pertama, kinerja simpang bersinyal pada pembangunan tol Solo-Yogya mengalami penurunan dari tahun 2022 dengan nilai NVK rata-rata sebesar 0,78 menjadi 1,47 pada tahun 2046. Kedua, waktu tempuh kendaraan pada simpang bersinyal yang merupakan akses di ruas Jalan Tol Solo-Yogya mengalami kenaikan dari tahun 2022 dengan waktu tunda rata-rata

180,9 detik menjadi 934,2 detik pada tahun 2046.

Dengan pertumbuhan NVK tersebut, simpang 3 Bangk Barat dan simpang 4 Condong Catur, disarankan untuk dibangun simpang susun sebelum tahun 2032 untuk meningkatkan kinerja simpang karena pada tahun 2032 nilai nisbah volume kapasitas adalah lebih dari 0,8. Perbaikan simpang perlu dilakukan dengan menerapkan manajemen lalu lintas dan pelebaran ruas jalan mulai tahun 2032 di lokasi ruas jalan yang memiliki nilai NVK \geq 0,8. Kondisi pada tahun 2046 adalah semua simpang bersinyal memiliki nilai kondisi yang tidak stabil dan kritis.

Saran

Penelitian lebih lanjut agar dapat mencakup data ruas jalan lokal yang terletak di sekitar lokasi penelitian untuk memperoleh hasil nilai kapasitas simpang bersinyal yang lebih akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih yang sebesar-besarnya kami sampaikan kepada dosen pembimbing yang telah mendampingi dan mengarahkan dalam setiap penelitian yang di lakukan, serta teman-teman mahasiswa S1 Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret yang sudah membantu dalam melakukan survei data lalu lintas.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, Huda Abdulameer, Obaid, Hayder Abbas Obaid, and Alwash . Ali Abdul Ameer. 2022. Enhanced Road Network to Reduce the Effect of (External – External) Freight Trips on Traffic Flow. *Civil Engineering Journal (Iran)* 8 (11): 2573–84. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-11-015>.
- Akbardin, Juang, Danang Parikesit, Bambang Riyanto, Agus Taufik, Mulyono, and Sri Wiwoho Mudjanarko. 2019. The Trips Assignment Influence of Freight Vehicle Network System on the Need for Fuel Consumption in Internal-Regional. *Journal of Physics: Conference Series* 1364 (1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1364/1/012047>.
- Alam, Altaf, Singh, Laxman, Jaffery, Zainul Abidin, Verma , Yogesh Kumar, and Diwakar,

- Manoj. 2022. Distance-Based Confidence Generation and Aggregation of Classifier for Unstructured Road Detection. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* 34 (10): 8727–38. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.09.020>.
- Bagheri, Mohammad, Ghafourian, Hossein, Kashefiolasl, Morteza, Pour, Mohammad Taghi Sadati, and Rabbani, Mohammad. 2020. Travel Management Optimization Based on Air Pollution Condition Using Markov Decision Process and Genetic Algorithm (Case Study: Shiraz City). *Archives of Transport* 53 (1): 89–102. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.1746>.
- Baniya, Suprabha, Nadia Rocha, and Michele Ruta. 2020. “Trade Effects of the New Silk Road: A Gravity Analysis.” *Journal of Development Economics* 146 (February): 102467. <https://doi.org/10.1016/j.jdevec.2020.102467>.
- Breyer, Nils, Rydergren, Clas, and Gundlegård, David. 2020. Comparative Analysis of Travel Patterns from Cellular Network Data and an Urban Travel Demand Model. *Journal of Advanced Transportation* 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/3267474>.
- Boulos, Maged N. Kamel, Tsouros, Agis D., & Holopaine, Arto. 2015. Social, Innovative and Smart Cities Are Happy and Resilient’: Insights from the WHO EURO 2014 International Healthy Cities Conference. *International Journal of Health Geographics* 14 (1): 1–9. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-14-3>.
- Calderón, Enrique, Valenzuela, Matías, Minatogawa, Vinicius, and Pinto, Hernán. 2023. Development of the Historical Analysis of the Seismic Parameters for Retrofitting Measures in Chilean Bridges. *Buildings* 13 (2): 1–17. <https://doi.org/10.3390/buildings13020274>.
- Direktorat Jenderal Bina Marga (DJB M). 2023. Panduan Kapasitas Jalan Indonesia 2014. *Panduan Kapasitas Jalan Indonesia*, 68.
- Dombalyan, Anzhelika, Kocherga, Viktor, Semchugova, Elena, and Negrov, Nikolai. 2017. Traffic Forecasting Model for a Road Section. *Transportation Research Procedia* 20 (September 2016): 159–65. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.040>.
- Du, Ningrui, Zhang, Ming, Huang, Jingnan, and Wang, Guoen. 2019. A Conflict-Detecting and Early-Warning System for Multi-Plan Integration in Small Cities and Towns Based on Cloud Service Platform. *Smart Cities* 2 (3): 388–401. <https://doi.org/10.3390/smartsities2030024>.
- Duraku, Ramadan K, and Ramadani, Riad. 2019. Development of Traffic Volume Forecasting Using Multiple Regression Analysis and Artificial Neural Network. *Civil Engineering Journal* 5 (8): 1698–1713. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091364>.
- Etinosa, Noma-Osaghae, Okokpujie Kennedy, Daniel Famoroti, and John Samuel. 2022. The Validity of a Decentralised Simulation-Based System for the Resolution of Road Traffic Congestion. *Journal of Applied Engineering Science* 20 (3): 821–30. <https://doi.org/10.5937/jaes0-28642>.
- Hermani, Wahyuningsih Tri, Ary Setyawan, Universitas Sebelas Maret, and Universitas Sebelas Maret. 2023. The Effect of Toll Road Operation On National Road Performance In Central Java Province.
- Hidayat, Rifki dan Niskhi, Aulya. 2021. Pengaruh Proporsi Kendaraan Terhadap Kecepatan Arus Lalu Lintas (Studi Kasus: Jalan Tgk. Chik Ditiro Depan Gedung Keuangan Banda Aceh). *Tameh: Journal of Civil Engineering*. 10. 80-89. 10.37598/tameh.v10i2.155.
- Husin, Albert Eddy, Rahmawati, Diah Ika, Meisaroh, Myrna, and Kussumardianadewi, Bernadette Detty. 2021. Performance Improvement of Box Girder Construction on Toll Road Projects Based on M-PERT and VE. *The Open Civil Engineering Journal* 15 (1): 299–309. <https://doi.org/10.2174/1874149502115010299>.
- Jamail, Nurul Husna Mohd, A. G. Abdul Halim, and Jamail, Nor Shahida Mohd. 2020. “Development of Intelligent Road Maintenance System Mobile Apps for a Highway.” *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* 9 (6): 2350–57. <https://doi.org/10.11591/eei.v9i6.2489>.
- Jamilah, Wardatul, and Handayani, Dewi. 2018. Impact of Freight Transportation on Road Network Performance in Surakarta with Toll Road Scenario Impact of Freight Transportation on Road Network Performance in Surakarta with Toll Road Scenario. 040017 (June).
- Khan, Zawar Hussain, Gulliver, Thomas Aaron, and Imran, Waheed. 2021. *Transitions* 7 (06): 1060–69.
- Liu, Chang. 2021. Infrastructure Public–Private Partnership (PPP) Investment and Government Fiscal Expenditure on Science and Technology from the Perspective of Sustainability. *Sustainability (Switzerland)* 13 (11). <https://doi.org/10.3390/su13116193>.

- Martinez, Oscar, Garcia, Jose-Manuel, and Kumar, Narender. 2021. The Gravity Model as a Tool for Decision Making. Some Highlights for Indian Roads. *Transportation Research Procedia* 58 (2019): 333–39. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.045>.
- Morlok, Edward K.; Johan Kelanaputra Hainim. *Pengantar teknik dan perencanaan transportasi* / Edward K. Morlok ; diterjemahkan oleh Johan Kelanaputra Hainim. Jakarta : Erlangga, 1985.
- Mu, Weiguang, and Gong, Chengzhu. 2023. A Data-Driven Approach to W-Beam Barrier Monitoring Data Processing: A Case Study of Highway Congestion Mitigation Strategy. *Sustainability (Switzerland)* 15 (5). <https://doi.org/10.3390/su15054078>.
- Nurjaman, Hari Nugraha, Faizal, Lutfi, Suaryana, Nyoman, Dharmawan, Yudhi, and Suwito. 2020. The Experimental Study of Precast Concrete Panel Connection System for Rigid Pavement in Indonesia. *AIP Conference Proceedings* 2227 (May). <https://doi.org/10.1063/5.0004195>.
- Pokharel, Ramesh, Bertolini, Luca, Brömmelstroet, Marco te, and Acharya, Surya Raj. 2021. Spatio-Temporal Evolution of Cities and Regional Economic Development in Nepal: Does Transport Infrastructure Matter? *Journal of Transport Geography* 90 (November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102904>.
- Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). 1997. “Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI).”
- Putra, I. Nyoman Dita Pahang, Amalia, Yuni Sari, dan Dewi, Gusti Ayu Mayani Kristina. 2019. Framework of Construction Procedure Manual of the Project Management Unit and Other Stakeholders in the Surabaya City Government. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology* 10 (6): 174–82. <https://doi.org/10.34218/IJARET.10.6.2019.021>.
- Shatanawi, Mohamad, Alatawneh, Anas, and Mészáros, Ferenc. 2022. Implications of Static and Dynamic Road Pricing Strategies in the Era of Autonomous and Shared Autonomous Vehicles Using Simulation-Based Dynamic Traffic Assignment: The Case of Budapest. *Research in Transportation Economics* 95 (August). <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2022.101231>.
- Simini, Filippo, Barlacchi, Gianni, Luca, Massimiliano, and Pappalardo, Luca. 2021. “A Deep Gravity Model for Mobility Flows Generation.” *Nature Communications* 12 (1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26752-4>.
- Suryani, Fitrika Mita, Mutiawati, Cut, and Faisal, Ruhdi. 2023. The Influence of Service Performance And Passenger Satisfaction On Public Transport Loyalty In A Small City In A Developing Country, 644–55.
- Tamin. 2000. *Transportation Planning and Modeling*. ITB.
- Wang, Qian, Chen, Yang, Guan, Heshan, Lyulyov, Oleksii, and Pimonenko, Tetyana. 2022. “Technological Innovation Efficiency in China: Dynamic Evaluation and Driving Factors.” *Sustainability (Switzerland)* 14 (14). <https://doi.org/10.3390/su14148321>.
- Wu, Zhizhu, Huang, Mingxia, Zhao, Aiping, and Lan, Zhixun. 2021. Urban Traffic Planning and Traffic Flow Prediction Based on Ulchis Gravity Model and Dijkstra Algorithm. *Journal of Physics: Conference Series* 1972 (1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1972/1/012080>.
- Zhang, Ran, Zhao, Liya, Qiu, Xiaojun, Zhang, Hui, and Wang, Xu. 2020. A Comprehensive Comparison of the Vehicle Vibration Energy Harvesting Abilities of the Regenerative Shock Absorbers Predicted by the Quarter, Half and Full Vehicle Suspension System Models. *Applied Energy* 272 (February): 115180. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115180>.
- Zhou, Chuhao, Lin, Peiqun, Lin, Xukun, and Cheng, Yang. 2021. A Method for Traffic Flow Forecasting in a Large-Scale Road Network Using Multifeatures. *Promet - Traffic - Traffico* 33 (4): 593–608. <https://doi.org/10.7307/ptt.v33i4.3709>.