

ANALISIS KINERJA SIMPANG EMPAT TRUNOJOYO – KH. SAJAD – DR. WAHIDIN KABUPATEN SUMENEP MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK PTV VISTRO

Nur Aryasatya Nugraha¹, Lydia Novitriana Nur Hidayati² dan Budi Yulianto³

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta

Email: aryaangga824@gmail.com

² Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta

Email: lydia.hidayati@staff.uns.ac.id

³ Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta

Email: budyuliantophd@staff.uns.ac.id

ABSTRACT

Intersection Four Trunojoyo - KH. Sajad - Dr. Wahidin are intersections included in the Trunojoyo road network. Intersection Four Trunojoyo - KH Sajad - Dr. Wahidin is a newly implemented intersection because it was not an intersection five years ago. The research aims to analyse the performance of the signalised intersection at the Trunojoyo - KH Sajad - Dr. Wahidin. The study analysis used PTV Vistro software. The modelling method refers to HCM 2010. Modelling is done with two scenarios: existing and locally optimised conditions. After modelling the existing conditions, validation is carried out through queue length using Microsoft Excel software. There is an increase in performance modelling when a single optimisation scenario and vehicle actuated is carried out compared to existing conditions. In the existing conditions, the Trunojoyo - KH. In the morning peak hour, Sajad - Dr. Wahidin Interchange produces a DS value = 0.39, D = 34.52 seconds /mp, and the afternoon peak hour DS value = 0.41 and D = 38.59. The best optimisation performance is in the vehicle actuated optimisation type scheme 1, with an extension time of 2 seconds. The intersection of Trunojoyo - KH. Sajad - Dr. Wahidin has a degree of saturation (DS) = 0.34 and delay = 19.4 sec/smp in the morning peak hour, while the afternoon peak hour produces a degree of saturation (DS) = 0.41 and delay = 21.18 sec/smp. The use of detectors in PTV Vistro modeling can improve intersection performance, followed by the appropriate setting of other signal parameters.

Keywords: HCM 2010, PTV Vistro, Signalised Intersection Performance, Vehicle Actuated

ABSTRAK

Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin merupakan simpang yang termasuk dalam jaringan ruas Jalan Trunojoyo. Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin merupakan simpang yang baru diberlakukan dikarenakan lima tahun silam bukan merupakan simpang. Sedangkan Penelitian bertujuan untuk menganalisis kinerja simpang bersinyal pada Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin dan Simpang Empat Tugu Kota. Analisis dalam penelitian menggunakan perangkat lunak PTV Vistro. Metode dalam pemodelan yang dilakukan mengacu pada HCM 2010. Pemodelan dilakukan dengan dua skenario, yakni pada kondisi eksisting dan kondisi teroptimasi tunggal. Setelah dilakukan pemodelan eksisting, maka dilakukan validasi melalui panjang antrian menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Terdapat peningkatan pada pemodelan kinerja ketika dilakukan skenario optimasi tunggal dan *vehicle actuated* dibanding kondisi eksisting. Pada kondisi eksisting, Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin pada jam sibuk pagi hari menghasilkan nilai DS = 0,39 dan D = 34,52 detik/smp dan jam sibuk sore nilai DS = 0,41 dan D = 38,59. Kinerja optimasi terbaik dalam tipe optimasi *vehicle actuated* skema 1 dengan extension time 2 detik. Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin nilai derajat kejenuhan (DS) = 0,34 dan tundaan = 19,4 det/smp pada jam sibuk pagi, sedangkan jam sibuk sore menghasilkan nilai derajat kejenuhan (DS) = 0,41 dan tundaan = 21,18 det/smp. Penggunaan detektor dalam pemodelan PTV Vistro dapat meningkatkan kinerja simpang diikuti dengan pengaturan parameter pengaturan sinyal lainnya yang tepat.

Kata kunci: HCM 2010, Kinerja Simpang Bersinyal, PTV Vistro, *Vehicle Actuated*

1. PENDAHULUAN

Simpang memiliki peranan vital dalam sistem jaringan transportasi jalan raya. Peranan penting ini terjadi karena simpang menjadi pertemuan dari ruas – ruas jalan sehingga potensi konflik yang tinggi. Potensi konflik yang tinggi bisa diminimalisir dengan berbagai rekayasa lalu lintas umumnya dengan pemasangan lampu lalu lintas. Namun rekayasa lalu lintas melalui pemasangan lampu lalu lintas tidak serta merta menyelesaikan permasalahan lalu lintas. Apabila pengaturan sinyal lampu lalu lintas Parameter yang mempengaruhi kinerja simpang antara lain kapasitas pendekat simpang (C), derajat kejenuhan (DS), tundaan (D), dan nilai peluang antrian (QP) (Fathoni, 2015). Jalan Trunojoyo merupakan tulang punggung jalan perkotaan karena termasuk dalam kelas jalan nasional sehingga kinerja simpang-simpang yang berada di sepanjang jalan nasional harus dalam kondisi yang terkontrol untuk menyokong

aktivitas masyarakat supaya minim kendala. Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – DR. Wahidin merupakan salah satu simpang yang berada di ruas Jalan Trunojoyo. Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – DR. Wahidin merupakan persimpangan baru yang sebelumnya tidak ada persimpangan akibat adanya median. Terbentuknya persimpangan baru, memberikan dampak pada meningkatnya nilai tundaan. Semakin meningkatnya nilai tundaan yang terjadi pada suatu simpang akan menurunkan kinerja persimpangan (Webster, 1958). Sehingga perlu memperkecil nilai tundaan untuk meningkatkan kinerja persimpangan (Pratama, 2012). Padahal Jalan Trunojoyo merupakan jalan nasional sekaligus memiliki tata guna lahan yang lebih padat dan menjadi arus mayor pada persimpangan tersebut dibandingkan ruas jalan KH. Sajad dan Dr. Wahidin. Namun, waktu siklus antara keduanya tidak memiliki selisih yang berbeda jauh.



Gambar 1. Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin September 2022 (kiri) dan Agustus 2019 (kanan)

Penggunaan perangkat lunak sebagai media analisis kinerja simpang jamak ditemukan di era modern. *Planung Transport Verhker* (PTV) Group merupakan salah satu perusahaan perangkat lunak yang berfokus di bidang lalu lintas, transportasi dan mobilitas. PTV Group melalui perangkat lunak PTV Vistro dikembangkan di Jerman dan berfungsi untuk membantu analisis lalu lintas termasuk di dalamnya terkait simpang bersinyal (Yulianto et al., 2024). PTV Vistro dipilih karena kemudahan pengoperasionalannya dan salah satu metode analisisnya yakni menggunakan metode *Highway Capacity Manual* (HCM) 2010. HCM 2010 memiliki beberapa parameter analisis kinerja simpang bersinyal seperti derajat kejenuhan dan kapasitas yang sama dengan Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997 (Geladi et al., 2018). Sehingga akurasi dan kecocokan hasil analisa perangkat lunak PTV Vistro cocok dengan kondisi di Indonesia. Hasil yang digunakan dalam analisis simpang menggunakan perangkat lunak PTV Vistro pada Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin yakni derajat kejenuhan (DS) dan tundaan (D). Hasil pemodelan perlu oleh perangkat lunak PTV Vistro perlu dilakukan kalibrasi untuk menyelaraskan dengan kondisi di lapangan. Sementara data yang dapat menjadi tolak ukur dari hasil validasi yakni panjang antrean (Ql) (m). Data – data yang dihasilkan dari hasil analisis perangkat lunak PTV Vistro akan dibandingkan dengan hasil data di lapangan agar didapatkan pemodelan yang merepresentasikan kondisi nyata di lapangan. Metode analisis menggunakan PTV Vistro dapat dilakukan dengan berbagai kondisi atau skenario. Beberapa skenario pemodelan PTV Vistro diantaranya pemodelan kondisi eksisting, skenario optimasi tunggal, dan skenario terkoordinasi (Thahir et al., 2022). Optimasi kinerja simpang pada PTV Vistro tidak hanya optimasi tunggal dan terkoordinasi. PTV Vistro memiliki tiga macam tipe aktuasi yakni *fixed time*, *semi actuated*, dan *fully actuated*. Tipe aktuasi dapat mempengaruhi kinerja persimpangan. Hal ini dikarenakan tipe aktuasi menentukan waktu siklus pada persimpangan. Waktu siklus memiliki pengaruh terhadap tundaan yang terjadi pada persimpangan (Calle-Laguna et al., 2019).

Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin masih belum memiliki detektor yang mampu mengintervensi waktu siklus. Penggunaan detektor pada beberapa kasus berhasil meningkatkan kinerja persimpangan (Yulianto, 2007; Rosyady et al., 2022). Optimasi kinerja simpang juga dapat dilakukan melalui pengaturan waktu siklus, khususnya pada perangkat lunak PTV Vistro (Nurraman et al., 2022; Nugroho et al., 2022; Yulianto et al., 2023; Yulianto & Jaisyurrahman, 2023). Penelitian ini bertujuan untuk mencari kinerja terbaik antara kondisi eksisting dan ketika simpang dimodelkan dengan rekayasa lalu lintas oleh perangkat lunak PTV Vistro. Rekayasa lalu lintas yang dimodelkan yakni optimasi tunggal melalui perubahan waktu siklus dan skenario *vehicle actuated* dengan pemasangan detektor. Skenario optimasi tunggal dilakukan melalui pilihan yang tersedia pada perangkat lunak PTV Vistro yakni *V/C Balancing* dan *Minimum Critical Movement Delay* dengan dua *object function split* dan *split and cycle time*. Skenario *vehicle actuated* terdapat tiga skema yang dibedakan dari waktu hijau minimum dan posisi detektor. Pada masing-masing skema terdapat lima *extension time* mulai dari 2 s, 2,5 s, 3 s, 3,5 s, dan 4s. Variasi dari *extension time* dilakukan karena hal tersebut menjadi salah satu parameter krusial dalam kinerja simpang *vehicle actuated* (Bullen, 1989).

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pengaturan Simpang Bersinyal

Pada simpang bersinyal, arus kendaraan yang masuk – keluar simpang diatur oleh sinyal yang ditunjukkan APILL. Pengaturan simpang menggunakan *traffic control signal* menurut penetapan waktu siklus dibagi menjadi tiga, antara lain:

- a. *Fixed Time Control* adalah tipe *traffic control signal* yang mana fase waktu sinyal sudah ditetapkan berdasarkan studi lalu lintas secara empiris sehingga fase waktu sinyal di suatu simpang menunjukkan fase yang tetap. Di Indonesia, salah satu cara untuk menghitung *green splits* dan *cycle time* digunakan rumus yang telah ditetapkan di MKJI 1997 (Sutandi, 2008).
- b. *Semi Actuated Control* merupakan tipe *traffic control signal* yang menggunakan sensor dari detektor pada pendekat minor, sedangkan pada pendekat mayor digunakan tipe *fixed time*. Detektor berfungsi untuk mengetahui kendaraan dari pendekat minor yang akan memasuki simpang sehingga akan ditambahkan fase untuk pendekat minor. Sehingga apabila tidak ada kendaraan maka fase yang terjadi hanya pada pendekat minor. Tipe aktuasi seperti ini memiliki kerumitan dalam penentuan kombinasi waktu hijau minimum dan maksimum serta *extension time* (Simõesa & Ribeiroa, 2011).
- c. *Fully Actuated Control* adalah tipe *traffic control signal* yang menggunakan sensor dari detektor pada seluruh pendekat. Tipe pengaturan simpang seperti ini umum digunakan pada arus lalu lintas yang berfluktuasi tinggi, akibatnya tipe pengaturan simpang seperti ini tidak memiliki waktu siklus yang jelas. Pada sistem ini, teknologi detektor yang digunakan bermacam-macam seperti *inductive loop*, *microwave radar detector*, *ultrasonic detector*, dan *video image processing* (Yulianto, 2018). Teknologi – teknologi detektor tersebut disesuaikan dengan kebutuhan pengguna terkait pengaturan simpang, karena berbagai jenis teknologi tersebut juga memiliki data masukan parameter lalu lintas yang beragam seperti perhitungan kendaraan, keberadaan kendaraan, *headway* kendaraan, antrean kendaraan serta *occupancy ratio* bergantung pada kemampuan detektor dalam menangkap data masukan. Menurut Musti & Munadi dalam (Rosyady et al., 2022) data masukan ini, nanti akan dikirimkan ke mikrokontroler yang mengolah data masukan kemudian APILL akan menunjukkan waktu hijau secara adaptif yang telah diatur oleh mikrokontroler.

Perangkat Lunak PTV Vistro

PTV Vistro merupakan perangkat lunak pemodelan yang menggunakan simulasi makroskopik, sehingga dapat memodelkan simpang pada kawasan perkotaan secara luas dalam waktu yang efisien. Simulasi makroskopik merupakan simulasi dari jaringan transportasi yang dilakukan secara *section-by-section*. Unit dasar dari simulasi makroskopik yaitu hubungan antara arus, kecepatan, dan kepadatan arus lalu lintas. Pada simulasi makroskopik, kendaraan tidak dimodelkan satu persatu namun secara umum. Simulasi mesoskopik merupakan model simulasi yang menggabungkan sifat – sifat dari simulasi makroskopik dan simulasi mikroskopik. Simulasi mikroskopik merupakan simulasi pergerakan kendaraan individu dalam arus lalu lintas (van Wageningen-Kessels et al., 2015). Pada perangkat lunak PTV Vistro, tahapan pemodelan dibagi menjadi tiga bagian yakni *intersection setup*, *volumes*, dan *traffic control*. Bagian *intersection setup* berfungsi untuk mengatur persimpangan seperti geometrik serta keberadaan sarana dan prasarana yang menunjang. Bagian *volumes* berfungsi untuk memasukkan data volume arus lalu lintas pada setiap lajur dan arah pergerakannya. Bagian *traffic control* berfungsi untuk mengatur masukan data pada APILL yang dimodelkan pada simpang (PTV AG, 2017),

Pengaturan Simpang Bersinyal Menggunakan Teknologi Sensor

Sensor dipasang untuk membantu penyelenggara lalu lintas dalam mengatur lalu lintas secara aktual. Tentunya, dengan keberadaan sensor maka tipe simpang tidak lagi menggunakan *fixed time controller* melainkan *vehicle actuated controller*. Performa dari detektor sangat dipengaruhi oleh parameter yang digunakan dalam data masukan sistem *demand responsive traffic signal control* (Yulianto, 2018). Tentunya parameter tersebut juga dipengaruhi oleh jenis sensor yang digunakan dalam mengidentifikasi kendaraan. Posisi detektor juga berpengaruh terhadap sensitivitas data masukan yang diterima. Detektor berjenis loop lebih baik dalam mendeteksi kendaraan yang lewat dibandingkan detektor yang menggunakan radar gelombang. Hal ini dikarenakan detektor loop berada di permukaan perkerasan jalan yang bersentuhan langsung dengan bagian kendaraan yang mana tidak bisa dilakukan oleh radar gelombang (Fitriani et al., 2022).

Validasi Pemodelan

Keakuratan hasil penelitian dengan realita di lapangan menjadi poin penting dalam penelitian. Validasi digunakan untuk meyakinkan bahwa model simulasi merepresentasikan pemodelan secara akurat sesuai dengan kondisi di lapangan (Pattiaapon, 2015). Proses validasi dapat dinyatakan sesuai jika hasil analisis data dari pemodelan sama

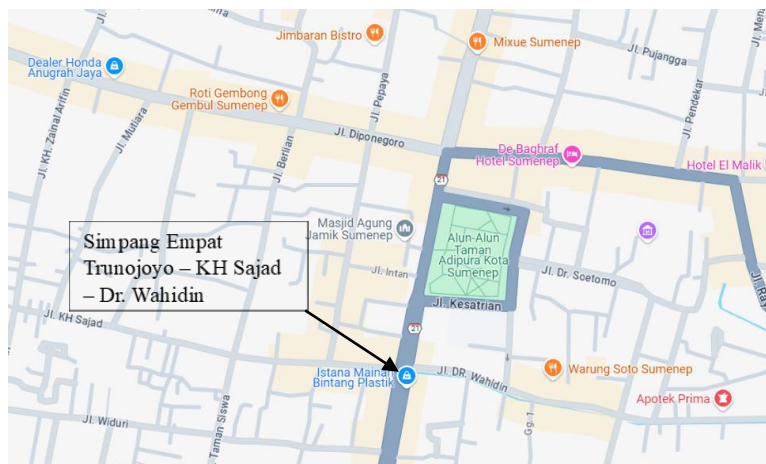
ataupun mendekati data hasil observasi di lapangan. Parameter yang akan digunakan dalam proses kalibrasi dan validasi adalah Q_l kendaraan (m) pada lajur dengan nilai Q_l terpanjang.

3. METODE PENELITIAN

Terdapat dua metode yang akan digunakan pada penelitian kinerja Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin yakni metode survei lalu lintas dan analisis dari keadaan aktual di lapangan terkait pengaturan sinyal lampu lalu lintas di simpang tersebut. Metode survei dilakukan untuk mendapatkan data lalu lintas yang ada di lapangan secara langsung, sedangkan analisis dilakukan melalui perangkat lunak PTV Vistro.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan di Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin dengan waktu penelitian ketika hari kerja dengan jam puncak pagi dan sore hari masing – masing selama 120 menit.



Gambar 2. Lokasi penelitian di Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin, *google maps* diakses pada 2 Juli 2025

Metode Pengumpulan Data Primer dan Sekunder

Pengumpulan data primer dilakukan secara langsung sementara data sekunder diambil dari pihak lain. Data – data yang diambil ketika pengumpulan data yakni diawali dengan survei pendahuluan, survei geometrik, survei arus lalu lintas, dan survei panjang antrian. Jenis kendaraan digolongkan menjadi empat bagian yakni sepeda motor (MC), kendaraan ringan (LV), kendaraan berat (HV) dan kendaraan tidak bermotor (UM). UM tidak menjadi bagian dari penelitian dikarenakan memiliki nilai ekuivalensi mobil penumpang (emp) = 0 (MKJI, 1997) sehingga tidak berpengaruh terhadap total kendaraan pada pemodelan. Data sekunder mengenai Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin didapat dari Dinas Perhubungan Kabupaten Sumenep. Data yang diperlukan dalam penelitian ini yakni data *traffic behavior* melalui rekaman CCTV dan waktu sinyal APILL di Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin.

Metode Analisis Menggunakan Perangkat Lunak PTV Vistro

PTV Vistro merupakan perangkat lunak yang memiliki fitur-fitur lengkap serta metode yang beragam dalam menganalisis permasalahan lalu lintas di jalan khususnya *traffic engineering*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini harus disesuaikan dengan kondisi transportasi di Indonesia sehingga metode HCM 2010 dipilih karena parameter kinerja simpang yang dihasilkan adalah Q_L , D , DS , dan tingkat pelayanan (LoS) untuk tiap simpang bersinyal secara keseluruhan. Langkah-langkah yang dilakukan dalam analisis menggunakan perangkat lunak PTV Vistro dimulai dari pengaturan umum, konfigurasi simpang, data masukkan, dan pengolahan data.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Jam Puncak Pagi dan Sore

Data yang digunakan dalam pemodelan PTV Vistro memiliki rentang waktu 60 menit dari 120 menit waktu yang digunakan untuk survei volume lalu lintas. Rentang waktu yang diambil merupakan jam puncak di setiap periodenya. Tabel proporsi dan waktu melintas kendaraan dalam satuan smp/jam ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Distribusi jenis kendaraan yang melintas di Simpang Empat Trunojoyo – KH Sajad – Dr. Wahidin

Simpang	Trunojoyo - KH Sajad - Dr Wahidin (smp/jam)	MC	LV	HV	Total	
Waktu	Pagi	08.00-09.00	349,0	364,0	11,7	724,7
		08.15-09.15	348,4	376,0	9,1	733,5
		08.30-09.30	363,0	380,0	11,7	754,7
		08.45-09.45	367,6	408,0	11,7	787,3
		09.00-10.00	373,2	413,0	13,0	799,2
	Sore	15.30-16.30	448,8	457,0	11,7	917,5
		15.45-16.45	467,2	469,0	13,0	949,2
		16.00-17.00	452,0	485,0	15,6	952,6
		16.15-17.15	417,4	457,0	14,3	888,7
		16.30-17.30	402,2	407,0	9,1	818,3

Tabel 1. menunjukkan bahwa mayoritas kendaraan yang melintasi Simpang Empat Trunojoyo – KH Sajad – Dr. Wahidin adalah sepeda motor. Meski memiliki total nilai smp/jam dengan LV, perlu diingat bahwa emp untuk MC berdasarkan MKJI 1997 adalah 0,2. Proporsi MC yang mendominasi memiliki potensi untuk terjadi *marginal congestion* (Wedagama, 2019). Selain potensi terjadinya marginal congestion, dominansi MC juga dapat mempengaruhi panjang antrean karena pengendara yang berhenti melebihi batas lajur yang ada (Surentu et al., 2025).

Hasil Analisis Kondisi Eksisting

Pada skenario kondisi eksisting, parameter yang diambil adalah nilai DS, D, Ql persentil ke-95, dan LoS yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil analisis skenario eksisting dengan Perangkat Lunak PTV Vistro pada Simpang Empat Trunojoyo – KH Sajad – Dr. Wahidin

Waktu	Pendekat	Parameter Kinerja Simpang Bersinyal			
		Derajat Kejenuhan (DS)	Panjang Antrean (Ql) (m)	Tundaan (D) (det/smp)	Tingkat Pelayanan (LoS)
09.00 - 10.00	Utara	0,48	45	34,93	C
	Timur	0,37	29	34,18	C
	Selatan	0,56	51	34,58	C
	Barat	0,33	26	33,35	C
	Simpang	0,39	38	34,52	C
15.30 - 16.30	Utara	0,43	39	33,67	D
	Timur	0,46	39	35,32	D
	Selatan	0,78	78	43,49	D
	Barat	0,45	37	36,21	D
	Simpang	0,41	49	38,59	D

Tabel 1. menunjukkan kinerja simpang bersinyal pada kondisi eksisting. Kinerja simpang pada jam puncak pagi sedikit lebih baik dibandingkan dengan jam puncak sore. Hal ini selaras dengan data yang menunjukkan terjadi peningkatan volume kendaraan ketika sore hari jika dibandingkan kondisi di pagi hari. Kepadatan yang terjadi pada simpang masih dapat ditolerir karena LoS pada simpang pada jam puncak pagi C dan pada jam puncak sore D. Namun, bukan berarti hal ini aman dari potensi masalah tetap perlu optimasi untuk kembali menyesuaikan kondisi di lapangan dengan pengaturan waktu siklus supaya tundaan yang terjadi tidak meningkat tajam.

Perbandingan Hasil Analisis Kondisi Eksisting dengan Data Lapangan

Untuk mengetahui tingkatan signifikansi data, antara kondisi eksisting PTV Vistro dengan data survei di lapangan maka perlu dilakukan uji t dengan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel dengan parameter panjang antrean. Panjang antrean yang dihasilkan oleh PTV Vistro merupakan panjang antrean untuk setiap lajur. Untuk meminimalisir bias akibat dari proporsi sepeda motor mencapai lebih dari 80% maka panjang antrean yang

digunakan adalah yang terpanjang dari setiap lajur. Perbandingan analisis panjang antrian dilakukan dalam bentuk persentil ke-95 yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan panjang antrian (m) antara pemodelan PTV Vistro dengan data survei lapangan Simpang Empat Trunojoyo – KH Sajad – Dr. Wahidin

Waktu	Pendekat	Hasil Data Panjang Antrian (m)	
		Model	Eksisting
09.00 - 10.00	Utara	45	39
	Timur	29	18
	Selatan	51	44
	Barat	26	19
15.30 - 16.30	Utara	39	47
	Timur	39	20
	Selatan	78	54
	Barat	37	22

Tabel 4. Hasil uji T antara pemodelan PTV Vistro dengan kondisi eksisting pada Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin

No	Parameter	Pagi	Sore
1	Thitung	0,8555	0,9496
2	Ttabel (<i>two-tailed</i>)	1,9430	1,9430
3	Nilai P (<i>two-tailed</i>)	0,4251	0,3790

Berdasarkan Tabel 4 $T_{hitung} < T_{tabel} \text{ (two-tailed)}$ dan $P > 0,05$ pada jam sibuk pagi maupun sore pada Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin sehingga hipotesis panjang antrian hasil pemodelan valid secara uji statistik. Maka dapat disimpulkan bahwa hasil analisis PTV Vistro Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin dengan skenario eksisting dengan data di lapangan tidak signifikan. Dengan hasil ini maka pemodelan dapat dilanjutkan ke pemodelan skenario optimasi tunggal dan *vehicle actuated*.

Hasil Analisis Skenario Optimasi Tunggal

Skenario optimasi tunggal pada perangkat lunak PTV Vistro memiliki beberapa metode, yaitu *V/C Balancing (Split)*, *V/C Balancing (Split and Cycle Time)*, *Minimize Critical Movement Delay (Split)* dan *Minimize Critical Movement Delay (Split and Cycle Time)*. Dari hasil analisis pada skenario optimasi tunggal dengan perangkat lunak PTV Vistro didapatkan hasil analisis parameter kinerja simpang berupa DS, D, QL, dan LoS.

Tabel 5. Hasil analisis skenario optimasi tunggal pada Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin

Waktu	Pendekat	Derajat Kejenuhan (DS)		Panjang Antrian (Ql) (m)				Tundaan (D) (det/smp)				Tingkat Pelayanan (LoS)			
		<i>V/C Balancing</i>		<i>Minimize Critical Movement Delay</i>		<i>V/C Balancing</i>		<i>Minimize Critical Movement Delay</i>		<i>V/C Balancing</i>		<i>Minimize Critical Movement Delay</i>		<i>V/C Balancing</i>	
		<i>Split</i>		<i>Split & Cycle Time</i>		<i>Split</i>		<i>Split & Cycle Time</i>		<i>Split</i>		<i>Split & Cycle Time</i>		<i>Split</i>	
		<i>Split</i>	<i>Cycle Time</i>	<i>Split</i>	<i>Cycle Time</i>	<i>Split</i>	<i>Cycle Time</i>	<i>Split</i>	<i>Cycle Time</i>	<i>Split</i>	<i>Cycle Time</i>	<i>Split</i>	<i>Cycle Time</i>	<i>Split</i>	<i>Cycle Time</i>
09.00	Utara	0,43	0,43	0,48	0,49	42,38	50,28	44,90	40,33	31,76	36,57	34,90	32,10	C	D
	Timur	0,43	0,41	0,37	0,41	30,38	35,45	28,50	26,80	37,72	42,89	34,80	33,45	D	C
	Selatan	0,46	0,42	0,53	0,54	44,98	51,59	49,20	44,15	28,79	31,58	32,90	29,94	C	C
	Barat	0,45	0,43	0,36	0,37	29,58	33,85	26,60	24,19	41,00	45,37	34,20	32,38	D	C
10.00	Simpang	0,34	0,34	0,34	0,34	36,83	42,79	37,29	33,87	32,44	36,47	34,00	31,48	C	C
	Utara	0,53	0,52	0,49	0,57	43,25	50,65	41,70	35,80	39,66	45,00	37,30	35,42	D	D
	Timur	0,56	0,51	0,49	0,57	43,43	48,60	40,00	34,52	42,53	44,94	37,30	35,34	D	D
	Selatan	0,55	0,53	0,66	0,69	61,28	68,78	68,30	57,41	28,07	31,09	34,40	29,36	C	C
16.30	Barat	0,52	0,51	0,49	0,53	39,59	45,89	38,00	31,32	40,82	45,78	38,30	33,64	D	C
	Simpang	0,41	0,41	0,41	0,41	41,30	47,54	41,61	36,49	35,08	38,93	36,20	32,49	D	C

Berdasarkan Tabel 4 menunjukkan bahwa metode *Minimize Critical Movement Delay* dengan object function split and cycle time memiliki nilai tundaan yang lebih baik jika dibandingkan dengan optimasi tunggal lainnya. Hal ini dikarenakan metode *Minimize Critical Movement Delay*, PTV Vistro berfokus untuk menekan tundaan yang besar pada setiap pendekat. Melalui object function split and cycle time juga direncanakan waktu siklus yang lebih fleksibel dan memenuhi kebutuhan simpang menurut perangkat lunak PTV Vistro. Tipe optimasi seperti ini juga menjadi yang terbaik pada penelitian sejenis sebelumnya (Yulianto & Jaisyurrahman, 2023; Nurraman et al., 2022; Yulianto et al., 2024; Yulianto et al., 2023; Thahir et al., 2022). Dari lokasi penelitian ditemukan persamaan pada karakteristik simpang yang diteliti yakni pola pergerakan arus yang terjadi mayor dan minor. Simpang dengan pola

seperti ini lebih optimal jika digunakan optimasi *minimize critical movement delay* karena arus mayor merupakan arus yang kritis sehingga perlu ditekan untuk mengurangi tundaan kendaraan.

Hasil Analisis Skenario *Vehicle Actuated*

Skenario *vehicle actuated* dilakukan dengan menambahkan pengaruh detektor pada traffic control. Pada penelitian ini direncanakan menggunakan 3 skema dengan variasi pada waktu minimum hijau, posisi detektor, dan *extension time*. Pada masing – masing skema digunakan *extension time* yang sama yakni 2 detik, 2,5 detik, 3 detik, 3,5 detik, dan 4 detik. Dari hasil analisis pada skenario optimasi tunggal dengan perangkat lunak PTV Vistro didapatkan hasil analisis parameter kinerja simpang berupa DS, D, QL, dan LoS.

Tabel 6. Hasil analisis skenario *vehicle actuated* skema 1 pada Simpang Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin

Waktu	Pendekat	Derajat Kejenuhan (DS)					Panjang Antrean (Ql) (m)					Tundaan (D) (det/smp)					Tingkat Pelayanan (LoS)				
		Skema 1 (DL = 12 m; MG = 8 s)					Skema 1 (DL = 12 m; MG = 8 s)					Skema 1 (DL = 12 m; MG = 8 s)					Skema 1 (DL = 12 m; MG = 8 s)				
		ET = 2 s	ET = 2.5 s	ET = 3 s	ET = 3.5 s	ET = 4 s	ET = 2 s	ET = 2.5 s	ET = 3 s	ET = 3.5 s	ET = 4 s	ET = 2 s	ET = 2.5 s	ET = 3 s	ET = 3.5 s	ET = 4 s	ET = 2 s	ET = 2.5 s	ET = 3 s	ET = 3.5 s	ET = 4 s
09.00 - 10.00	Utara	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	20,96	21,76	22,28	22,95	23,68	19,21	20,03	20,55	21,21	21,92	B	C	C	C	C
	Timur	0,52	0,52	0,52	0,53	0,53	12,67	14,39	14,81	15,28	15,78	20,31	21,13	21,73	22,36	23,05	C	C	C	C	C
	Selatan	0,68	0,68	0,68	0,66	0,66	23,25	24,43	25,13	25,52	25,58	19,02	19,83	20,26	20,39	20,47	B	B	C	C	C
	Barat	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	13,78	13,20	13,58	13,99	14,44	20,31	21,05	21,58	22,16	22,79	C	C	C	C	C
	Simpang	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	17,67	18,45	18,95	19,44	19,87	19,40	20,21	20,71	21,15	21,61	B	C	C	C	C
15.30 - 16.30	Utara	0,58	0,59	0,59	0,59	0,60	21,23	22,19	22,96	23,66	24,41	21,48	22,53	23,37	24,14	24,97	C	C	C	C	C
	Timur	0,66	0,66	0,66	0,67	0,67	21,10	22,34	23,31	24,17	25,10	22,84	24,38	25,57	26,62	27,77	C	C	C	C	C
	Selatan	0,78	0,76	0,75	0,73	0,71	36,08	37,71	38,56	39,05	39,49	20,02	20,79	21,10	21,19	21,24	C	C	C	C	C
	Barat	0,62	0,63	0,63	0,63	0,64	19,58	20,66	21,50	22,25	23,07	22,68	24,05	25,11	26,05	27,08	C	C	C	C	C
	Simpang	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	24,50	25,73	26,58	27,28	28,02	21,18	22,22	22,90	23,44	23,99	C	C	C	C	C

Tabel 7. Hasil analisis skenario *vehicle actuated* skema 2 pada Simpang Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin

Waktu	Pendekat	Derajat Kejenuhan (DS)					Panjang Antrean (Ql) (m)					Tundaan (D) (det/smp)					Tingkat Pelayanan (LoS)				
		Skema 2 (DL = 18 m; MG = 10 s)					Skema 2 (DL = 18 m; MG = 10 s)					Skema 2 (DL = 18 m; MG = 10 s)					Skema 2 (DL = 18 m; MG = 10 s)				
		ET = 2 s	ET = 2.5 s	ET = 3 s	ET = 3.5 s	ET = 4 s	ET = 2 s	ET = 2.5 s	ET = 3 s	ET = 3.5 s	ET = 4 s	ET = 2 s	ET = 2.5 s	ET = 3 s	ET = 3.5 s	ET = 4 s	ET = 2 s	ET = 2.5 s	ET = 3 s	ET = 3.5 s	ET = 4 s
09.00 - 10.00	Utara	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	24,92	25,58	26,05	26,42	26,82	21,54	22,17	22,61	22,97	23,36	C	C	C	C	C
	Timur	0,46	0,46	0,46	0,46	0,45	16,15	16,61	16,94	17,19	17,47	22,43	22,98	23,36	23,67	24,00	C	C	C	C	C
	Selatan	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	27,50	28,46	29,13	29,67	30,23	21,34	21,97	22,41	22,76	23,13	C	C	C	C	C
	Barat	0,43	0,43	0,42	0,42	0,42	14,86	15,27	15,55	15,78	16,03	22,47	22,96	23,31	23,58	23,88	C	C	C	C	C
	Simpang	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	20,86	21,48	21,92	22,27	22,64	21,68	22,29	22,71	23,05	23,41	C	C	C	C	C
15.30 - 16.30	Utara	0,53	0,53	0,53	0,53	0,54	24,15	25,01	25,65	26,63	26,86	23,21	24,10	24,72	25,33	25,96	C	C	C	C	C
	Timur	0,58	0,58	0,58	0,58	0,59	23,73	24,70	25,43	26,08	26,77	24,29	25,37	26,16	26,86	27,63	C	C	C	C	C
	Selatan	0,80	0,78	0,77	0,75	0,74	42,90	44,75	45,71	46,27	46,77	23,14	24,03	24,42	24,56	24,66	C	C	C	C	C
	Barat	0,55	0,55	0,55	0,55	0,56	22,05	22,91	23,56	24,14	24,75	24,20	25,17	25,89	26,53	27,23	C	C	C	C	C
	Simpang	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	28,21	29,34	30,09	30,78	31,29	23,46	24,39	24,95	25,36	25,79	C	C	C	C	C

Tabel 8. Hasil analisis skenario *vehicle actuated* skema 3 pada Simpang Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin

Waktu	Pendekat	Derajat Kejenuhan (DS)					Panjang Antrean (Ql) (m)					Tundaan (D) (det/smp)					Tingkat Pelayanan (LoS)				
		Skema 3 (DL = 24 m; MG = 12 s)					Skema 3 (DL = 24 m; MG = 12 s)					Skema 3 (DL = 24 m; MG = 12 s)					Skema 3 (DL = 24 m; MG = 12 s)				
		ET = 2 s	ET = 2.5 s	ET = 3 s	ET = 3.5 s	ET = 4 s	ET = 2 s	ET = 2.5 s	ET = 3 s	ET = 3.5 s	ET = 4 s	ET = 2 s	ET = 2.5 s	ET = 3 s	ET = 3.5 s	ET = 4 s	ET = 2 s	ET = 2.5 s	ET = 3 s	ET = 3.5 s	ET = 4 s
09.00 - 10.00	Utara	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	28,97	29,56	29,98	30,31	30,66	23,96	24,50	24,88	25,18	25,50	C	C	C	C	C
	Timur	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	18,60	18,99	19,26	19,48	19,71	24,68	25,11	25,40	25,63	25,88	C	C	C	C	C
	Selatan	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	31,90	32,75	33,35	33,82	34,32	23,76	24,30	24,67	24,97	25,28	C	C	C	C	C
	Barat	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	17,11	17,45	17,69	17,89	18,09	24,74	25,12	25,38	25,59	25,82	C	C	C	C	C
	Simpang	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	24,15	24,69	25,07	25,38	25,70	24,07	24,57	24,92	25,21	25,50	C	C	C	C	C
15.30 - 16.30	Utara	0,49	0,49	0,50	0,50	0,50	27,28	27,98	28,54	29,06	29,61	25,23	25,89	26,43	26,92	27,44	C	C	C	C	C
	Timur	0,53	0,53	0,53	0,53	0,54	26,60	27,37	27,98	28,53	29,12	26,13	26,90	27,52	28,07	28,67	C	C	C	C	C
	Selatan	0,82	0,81	0,79	0,78	0,76	49,83	51,91	53,00	53,64	54,22	26,30	27,36	27,83	28,03	28,18	C	C	C	C	C
	Barat	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	24,72	25,41	25,96	26,45	26,97	26,04	26,75	27,32	27,82	28,37	C	C	C	C	C
	Simpang	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	32,11	33,17	33,87	34,42	34,98	25,94	26,80	27,32	27,69	28,07	C	C	C	C	C

Catatan:

DL = *Detector Length* (m)
MG = *Minimum Green* (s)
ET = *Extension Time* (s)

Berdasarkan Tabel 6. – Tabel 8. kinerja simpang pada skenario *vehicle actuated* terdapat pola data yang konstan setiap terdapat kenaikan parameter masukan data. Skenario *vehicle actuated* terbaik terdapat pada skema 1 dengan *extension time* 2 detik dengan DS = 0,39 dan D = 19,40 det/smp pada jam puncak pagi dan DS = 0,41 dan D = 21,18 det/smp di jam puncak sore. Pola data yang terbentuk meningkat seiring peningkatan nilai *extension time* dan parameter pada skema. Hasil ini mendukung pendapat Bullen (1989) yang mana penentuan *extension time* berpengaruh terhadap kinerja simpang secara keseluruhan. Waktu hijau minimum dan maksimum juga berperan penting dalam menentukan kinerja simpang *vehicle actuated* (Nie et al., 2021). Terdapat perbedaan hasil antara PTV Vistro dengan pendapat Bullen (1989) terkait waktu hijau minimum. Bullen (1989) menyatakan bahwa untuk letak

detektor minimal dari jarak 60 ft (18,29 m) dan direkomendasikan pada 80 ft (24,39 m). Namun, pada PTV Vistro kinerja pada jarak tersebut yang terdapat pada skema 2 dan 3 tidak lebih baik dari skema 1 dengan jarak 12 m (40 ft). Tentunya hal ini juga diikuti pada kenaikan waktu hijau minimum, sehingga perlu diteliti lebih lanjut untuk pengaruh posisi detektor terhadap kinerja simpang. Perbedaan antara PTV Vistro dan PTV Vissim juga terlihat pada pola hasil tundaan. Hasil pada PTV Vissim terkait tundaan cenderung acak (Yulianto, 2007) berbeda halnya dengan PTV Vistro yang cenderung konstan. Hasil tersebut tidak terlepas dari skala pemodelan yang lebih mendetail pada PTV Vissim yakni pemodelan mikroskopik, sementara PTV Vistro pemodelan skala makroskopik.

Perbandingan Kinerja Simpang

Hasil analisis PTV Vistro dengan tiga skenario yang disajikan dalam Tabel 8 merupakan skenario eksisting, skenario optimasi tunggal, skenario vehicle actuated yang terbaik dari masing – masing skenario. Hasil skenario akan dibandingkan satu sama lain guna mendapatkan hasil optimasi terbaik berdasarkan skenario yang telah dilakukan. Parameter yang digunakan dalam perbandingan tiga skenario yaitu DS dan D.

Tabel 9. Perbandingan analisis kondisi eksisting dengan skenario terbaik dari optimasi tunggal dan *vehicle actuated* pada Simpang Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin

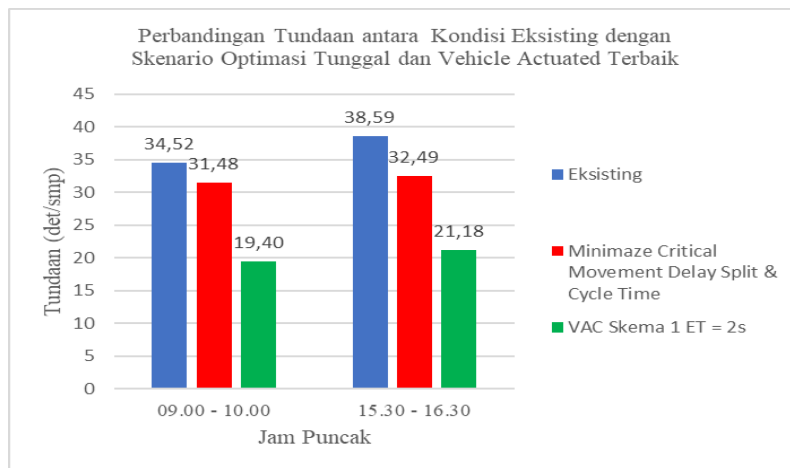
Waktu	Pendekat	Eksisting	Tundaan (D) (det/smp)	
			<i>Minimize Critical Movement Delay</i>	Skema 1
			<i>Split & Cycle Time</i>	(DL = 12 m; MG = 8 s; ET = 2 s)
09.00 - 10.00	Utara	34,93	32,10	19,21
	Timur	34,18	33,45	20,31
	Selatan	34,58	29,94	19,02
	Barat	33,35	32,38	20,31
	Simpang	34,52	31,48	19,40
15.30 - 16.30	Utara	33,67	35,42	21,48
	Timur	35,32	35,34	22,84
	Selatan	43,49	29,36	20,02
	Barat	36,21	33,64	22,68
	Simpang	34,52	32,49	21,18

Catatan:

DL = *Detector Length* (m)

MG = *Minimum Green* (s)

ET = *Extension Time* (s)



Gambar 3. Grafik perbandingan analisis kondisi eksisting dengan skenario terbaik dari optimasi tunggal dan vehicle actuated pada Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin

Berdasarkan hasil Gambar 3, hasil kinerja terbaik didapatkan dari skenario *vehicle actuated* dengan skema 1 pada *extension time* 2 detik. Terjadi penurunan nilai tundaan sebesar 8,80% di jam puncak pagi dan 15,80% di sore hari antara kondisi eksisting dengan skenario optimasi tunggal terbaik. Skenario *vehicle actuated* terbaik memiliki selisih 38,37% di jam puncak pagi dan 34,81% di jam puncak sore dari skenario optimasi tunggal terbaik. Hasil tersebut menyatakan bahwa melalui pemodelan perangkat lunak PTV Vistro, skenario vehicle actuated menjadi skenario paling optimal ditinjau dari nilai tundaan dibandingkan dengan skenario optimasi tunggal dan kondisi eksisting. Hal ini juga menegaskan melalui pemasangan detektor pada pemodelan PTV Vistro kinerja persimpangan dapat

ditingkatkan. Namun, perlu diperhatikan bahwa dalam penelitian ini tidak dilakukan uji variasi arus atau uji stress karena keterbatasan perangkat lunak.

5. KESIMPULAN

Kinerja Simpang Empat Trunojoyo – KH. Sajad – Dr. Wahidin pada kondisi eksisting berada dalam kondisi arus yang cukup stabil di jam puncak pagi dan padat di jam puncak sore. Optimasi tunggal simpang melalui *V/C balancing* dan *minimize critical movement delay* pada kondisi tertentu meningkatkan kinerja simpang. Hasil optimasi tunggal terbaik ditinjau dari nilai tundaan yakni *minimize critical movement delay* dengan *object function split and cycle time* dengan nilai DS = 0,34 dan D = 31,48 det/smp di jam puncak pagi dan DS = 0,41 dan D = 32,49 di jam puncak sore. Peningkatan kinerja simpang pada skenario *vehicle actuated* cukup drastis pada semua skenario jika dibandingkan dengan skenario optimasi tunggal. Skenario teroptimasi tunggal terbaik terjadi pada skema 1 dengan *extension time* 2 detik dengan nilai DS = 0,34 dan D = 19,40 det/smp di jam puncak pagi dan DS = 0,41 dan D = 21,18 di jam puncak sore. Penurunan yang terjadi pada nilai D menunjukkan bahwa dengan bantuan detektor, maka kinerja simpang akan meningkat. Pada pemodelan PTV Vistro peningkatan kinerja simpang ketika diberi detektor akan jauh lebih baik daripada optimasi melalui pengaturan waktu siklus pada simpang.

DAFTAR PUSTAKA

- Bullen, A. G. R. (1989). Effects of actuated signal settings and detector placement on vehicle delay. *Transportation Research Record*, 1244, 32–38.
- Calle-Laguna, A. J., Du, J., & Rakha, H. A. (2019). Computing optimum traffic signal cycle length considering vehicle delay and fuel consumption. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 3(x), 100021. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100021>
- Direktorat Jenderal Bina Marga, 1997, Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI), Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Geladi, E. G., Yulianto, B., & Purwanto, E. (2018). Perhitungan Kinerja Simpang Bersinyal Menggunakan Metode MKJI 1997 dan Perangkat Lunak PTV Vistro (Studi Kasus Simpang Empat Ngemplak dan Simpang Tiga Gilingan Kota Surakarta). *E-Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 495–501.
- Fathoni, A. I., 2015, Evaluasi Kinerja Pada Simpang Tiga Popongan Popongan Tegalondo Kabupaten Klaten, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Fitriani, N., Purwanto, E., Tsani, M. R., Mardikawati, B., & Hidayat, D. W. (2022). Performance Evaluation of Significant Intersections (Apill Adaptive Radar and Loop Detector). *Jurnal Teknologi Transportasi Dan Logistik*, 3(2), 89–96.
- Nie, C., Wei, H., Shi, J., & Zhang, M. (2021). Optimizing actuated traffic signal control using license plate recognition data: Methods for modeling and algorithm development. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9(February), 100319. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100319>
- Nugroho, F. S., Yulianto, B., & Setiono, S. (2022). Analisis Kinerja Simpang Empat Staggered Kleco dan Simpang Tiga Faroka Kota Surakarta Menggunakan Perangkat Lunak PTV Vistro. *Matriks Teknik Sipil*, 10(3), 238. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v10i3.64443>
- Nurraman, M. F., Yulianto, B., & Setiono, S. (2022). Analisis Kinerja Simpang Bersinyal Pada Jalur Flyover Purwosari Kota Surakarta Dengan Menggunakan Perangkat Lunak Ptv Vistro. *Matriks Teknik Sipil*, 10(3), 247. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v10i3.64445>
- Pattiaon, M. L. (2015). Studi kasus : PT. Nisso Bahari Surabaya. *Arika*, 09(1). <http://mba.tuck.dartmouth.edu>
- Pratama, A. A. (2012). *Analisis Tundaan Pada Simpang Bersinyal Studi Kasus : Simpang Dago*.
- PTV AG. (2017). *PTV User Manual*. Jerman: PTV Group
- Rosyady, P. A., Ikhsan, Z. A., & Feter, M. R. (2022). Prototype Lampu Lalu Lintas Adaptif Berdasarkan Panjang Antrian Kendaraan Berbasis Arduino Uno. *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 6(2), 173–186.
- Simões, M. L., & Ribeiro, I. M. (2011). Global optimization and complementarity for solving a semiactuated traffic control problem. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.045>
- Surentu, R. V., Yacob, S., Rompis, R., Ingrid, L., & Lefrandt, R. (2024). Pengaruh Proporsi Sepeda Motor Terhadap Panjang Antrian Kendaraan Pada Simpang Bersinyal Jalan Yos Sudarso Paal 2. 6(2), 66–77.
- Sutandi, A. C. (2008). *Comparative Analysis of Advanced and Fixed Time Traffic Control Systems in Increasing Traffic Performance*. 51–58.
- Thahir, A. B., Yulianto, B., & Setiono, S. (2022). Analisis Kinerja Simpang Bersinyal Pada Simpang Empat Tugu Wisnu dan Simpang Empat Girimulyo Kota Surakarta Dengan Menggunakan Perangkat Lunak PTV Vistro. *Matriks Teknik Sipil*, 10(4), 341. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v10i4.64483>
- Transportation Research Board, (2010). *HCM 2010 : highway capacity manual*. Washington, D.C.

- van Wageningen-Kessels, F., van Lint, H., Vuik, K., & Hoogendoorn, S. (2015). Genealogy of traffic flow models. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(4), 445–473. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0045-5>
- Webster, F. V. 1958. *Traffic Signal Setting Road Research Technique Paper No. 39*, Road Research Laboratory, London.
- Wedagama, D. M. P. (2019). The influence of mixed traffic on congestion level and marginal road congestion. *International Journal of GEOMATE*, 18(69), 18–25. <https://doi.org/10.21660/2019.64.15106>
- Yulianto, B., Setiono, S & Jaisyurrahman, M. L. (2023). *Analisis Kinerja Simpang Bersinyal Pada Pusat Perdagangan Kota Surakarta Menggunakan Perangkat Lunak PTV Vistro*. 11(1), 88–95.
- Yulianto, B., Setiono, S., & Fajar, B. A. K. (2023). *Analisis Kinerja Simpang Bersinyal Pada Pusat Perdagangan Kota Surakarta Menggunakan Perangkat Lunak Ptv Vistro (Studi Kasus Simpang Empat Gemblegan Dan Simpang Empat Sraten Kota Surakarta)*. *Matriks Teknik Sipil*, 11(1), 113. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v11i1.64881>
- Yulianto, B., (2018). Detector technology for demand responsive traffic signal control under mixed traffic conditions. *AIP Conference Proceedings*, 1977(June). <https://doi.org/10.1063/1.5042991>
- Yulianto, B., (2007). *Performance of Vehicle Actuated Control under Mixed Traffic Conditions*, Jurnal Gema Teknik, Majalah Ilmiah Teknik, Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret, Indonesia, Nomor 2/Tahun X, pp. 7-15.
- Yulianto, B., Atras, U. N., & Setiono, S. (2024). Analisis Kinerja Simpang Bersinyal Pada Simpang Empat Ketandan Dan Simpang Empat Sangkrah Kota Surakarta Dengan Perangkat Lunak Ptv Vistro. *Matriks Teknik Sipil*, 12(1), 1. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v12i1.77259>