

Optimalisasi Pengaturan Fase Sinyal untuk Meningkatkan Kinerja Simpang Bundaran: Studi Kasus di Simpang Lingkaran Brawijaya, Merauke

Optimization of Signal Phase Setting to Improve Roundabout Intersection Performance: Case Study at Brawijaya Circle Intersection, Merauke

Bartolomeus Krismanto Pauta^{*1}, Muh. Akbar¹, Chitra Utary¹

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Musamus, Merauke, Indonesia

Info Artikel

Diserahkan:

27 Juli 2026

Direvisi:

30 Agustus 2026

Diterima:

31 Agustus 2026

ABSTRAK

Simpang Lingkaran Brawijaya di Kabupaten Merauke merupakan salah satu simpang strategis perkotaan yang mengalami peningkatan volume lalu lintas, terutama pada jam puncak, sehingga berpotensi meningkatkan tundaan dan antrean kendaraan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja operasional simpang serta menganalisis alternatif pengaturan fase sinyal guna meningkatkan kinerjanya. Kinerja simpang dievaluasi menggunakan Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) 2023 berdasarkan parameter kapasitas, derajat kejenuhan, tundaan rata-rata, panjang antrean dan Tingkat pelayanan. Optimalisasi pengaturan fase sinyal disusun dan dibandingkan dengan kondisi eksisting untuk menentukan konfigurasi yang paling efektif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa optimalisasi pengaturan fase sinyal meningkatkan kinerja simpang dibandingkan dengan kondisi eksisting. Pada pendekatan dengan kondisi paling kritis, derajat kejenuhan menurun 34,8%, tundaan berkurang 46,6%, dan panjang antrean berkurang 30,9%. Hal tersebut menunjukkan bahwa optimalisasi waktu sinyal efektif meningkatkan Tingkat pelayanan simpang tanpa perubahan geometrik maupun penambahan fase sinyal. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengelolaan simpang bundaran bersinyal serta mendukung penerapan PKJI 2023 pada kondisi lalu lintas dengan karakteristik yang serupa.

Kata Kunci : simpang bundaran, fase sinyal, kinerja simpang, PKJI 2023

ABSTRACT

The Brawijaya Roundabout in Merauke Regency is one of the strategic urban intersections experiencing an increase in traffic volume, particularly during peak hours, thus potentially increasing delays and vehicle queues. This study aims to evaluate the operational performance of the intersection and analyze alternative signal phase arrangements to improve its performance. The intersection's performance is evaluated using the Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) 2023 based on parameters of capacity, degree of saturation, average delay, queue length, and level of service. The optimization of signal phase arrangements is developed and compared with the existing conditions to determine the most effective configuration. The research results indicate that the optimization of signal phase settings improves intersection performance compared to existing conditions. In the approach with the most critical condition, the degree of saturation decreased by 34.8%, delay was reduced by 46.6%, and queue length decreased by 30.9%. This demonstrates that signal timing optimization effectively enhances the level of service at intersections without geometric changes or the addition of signal phases. The research findings are expected to serve as a reference for the management of signalized roundabout intersections and to support the implementation of PKJI 2023 under traffic conditions with similar characteristics.

Keywords : roundabout intersection, signal phase, intersection performance, PKJI 2023

Corresponding author email: pautakris@unmus.ac.id



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan aktivitas perkotaan yang ditandai oleh meningkatnya mobilitas penduduk serta perkembangan kawasan perdagangan, jasa, pendidikan, dan permukiman berkontribusi terhadap peningkatan volume lalu lintas pada jaringan jalan. Kondisi tersebut menyebabkan meningkatnya beban pelayanan pada simpang sebagai titik

pertemuan berbagai arus kendaraan yang berpotensi menimbulkan konflik lalu lintas. Dalam sistem transportasi perkotaan, simpang merupakan salah satu elemen yang paling menentukan kinerja jaringan jalan karena kapasitas dan tingkat pelayanannya sangat dipengaruhi oleh interaksi antar arus kendaraan yang terjadi pada lokasi tersebut [1]. Bundaran merupakan salah satu bentuk pengendalian simpang yang banyak diterapkan untuk meningkatkan keselamatan lalu lintas dan mengurangi jumlah titik konflik dibandingkan simpang konvensional. Selain itu, bundaran mampu menurunkan kecepatan kendaraan pada area konflik sehingga dapat meningkatkan keselamatan pengguna jalan [2], [3].

Namun demikian, pada kondisi volume lalu lintas yang tinggi, distribusi arus yang tidak seimbang, serta tingginya hambatan samping, kinerja bundaran dapat mengalami penurunan yang ditandai dengan meningkatnya derajat kejenuhan, tundaan, dan panjang antrean kendaraan [4],[5]. Kondisi tersebut sering dijumpai pada kawasan perkotaan yang mengalami pertumbuhan aktivitas secara cepat sehingga kapasitas bundaran tidak lagi mampu melayani permintaan lalu lintas secara optimal. Kondisi serupa terjadi pada Simpang Lingkaran Brawijaya di Kabupaten Merauke. Simpang ini merupakan salah satu simpang strategis yang menghubungkan kawasan perdagangan, perkantoran, pendidikan, dan permukiman di wilayah perkotaan Merauke. Berdasarkan pengamatan awal, simpang tersebut mengalami peningkatan volume lalu lintas terutama pada jam puncak sehingga berpotensi menimbulkan tundaan dan antrean kendaraan yang cukup tinggi. Apabila kondisi ini tidak ditangani secara tepat, maka kualitas pelayanan simpang akan terus menurun dan berdampak pada kelancaran pergerakan lalu lintas di kawasan sekitarnya.

Salah satu pendekatan yang umum diterapkan untuk meningkatkan kinerja simpang pada kondisi lalu lintas padat adalah pengaturan sinyal lalu lintas melalui pengaturan fase yang disesuaikan dengan karakteristik pergerakan kendaraan. Pengaturan fase yang tepat dapat meningkatkan efisiensi pelayanan simpang dengan mengurangi konflik lalu lintas, menekan tundaan, dan memperbaiki kapasitas pendekatan. Penelitian yang dilakukan oleh Halawani [6] menunjukkan bahwa optimasi pengaturan sinyal pada koridor yang melibatkan bundaran mampu menurunkan tundaan kendaraan secara signifikan serta meningkatkan efisiensi operasional lalu lintas secara keseluruhan. Berbagai penelitian terdahulu telah membahas evaluasi kinerja bundaran maupun simpang bersinyal. Nento et al. [4] melaporkan bahwa Bundaran Saronde di Kota Gorontalo telah mengalami kondisi mendekati jenuh dengan nilai derajat kejenuhan sebesar 0,974 dan tundaan rata-rata sebesar 18,06 detik/smp. Penelitian Hardiani dan Ruhaidani [5] juga menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi lengan simpang berpengaruh terhadap tingkat pelayanan bundaran dan dapat digunakan sebagai alternatif manajemen lalu lintas.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih menggunakan acuan Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997 atau berfokus pada evaluasi kinerja bundaran tanpa mempertimbangkan optimasi pengaturan fase sinyal. Di sisi lain, Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) 2023 telah menggantikan MKJI 1997 sebagai pedoman terbaru dalam analisis kapasitas dan kinerja lalu lintas di Indonesia. Namun, hingga saat ini PKJI 2023 belum mengatur secara eksplisit prosedur analisis untuk simpang bundaran yang dikendalikan oleh sinyal lalu lintas. Kondisi tersebut menyebabkan masih terbatasnya penelitian yang mengkaji penerapan PKJI 2023 pada simpang bundaran bersinyal, khususnya dalam mengevaluasi efektivitas alternatif pengaturan fase sinyal terhadap peningkatan kinerja simpang.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) berupa masih terbatasnya kajian mengenai penerapan PKJI 2023 pada simpang bundaran bersinyal serta belum banyaknya penelitian yang mengevaluasi alternatif pengaturan fase sinyal pada bundaran bersinyal di kota-kota berkembang kawasan timur Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja operasional Simpang Lingkaran Brawijaya menggunakan parameter PKJI 2023 serta menganalisis beberapa alternatif pengaturan fase sinyal guna memperoleh konfigurasi yang lebih optimal. Kontribusi ilmiah penelitian ini terletak pada penerapan PKJI 2023 pada simpang bundaran bersinyal melalui penyesuaian parameter analisis yang diperlukan untuk mengakomodasi karakteristik lalu lintas lokal, serta pengembangan dan evaluasi beberapa skenario pengaturan fase sinyal sebagai upaya peningkatan kinerja simpang. Hasil penelitian diharapkan dapat memperkaya kajian manajemen lalu lintas pada simpang bundaran bersinyal serta menjadi referensi bagi pengambil kebijakan dan peneliti dalam pengembangan sistem pengendalian lalu lintas pada kondisi yang serupa.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Rancangan Penelitian

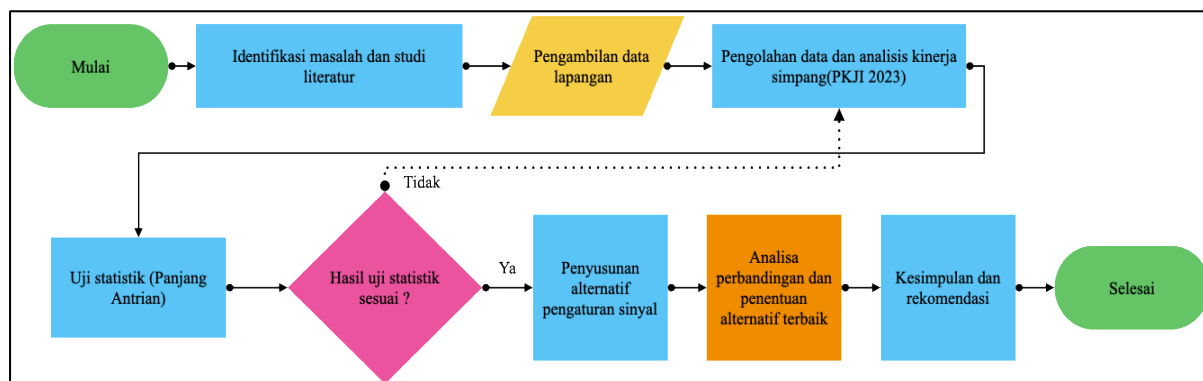
Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan analisis rekayasa lalu lintas yang bertujuan mengevaluasi kinerja operasional simpang bundaran bersinyal serta mengoptimalkan pengaturan fase sinyal untuk meningkatkan kinerja simpang. Analisis dilakukan berdasarkan Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) 2023 dengan objek penelitian berupa Simpang empat bersinyal dengan bundaran yang berlokasi di Jalan Brawijaya, Kabupaten Merauke, Provinsi Papua Selatan [1].

Lingkup penelitian dibatasi pada evaluasi kinerja simpang pada kondisi eksisting dan pengembangan alternatif pengaturan fase sinyal berdasarkan karakteristik lalu lintas aktual. Analisis difokuskan pada parameter kapasitas, derajat kejenuhan, tundaan, panjang antrean, dan tingkat pelayanan simpang [7], [8]. Lokasi penelitian secara geografis ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gbr. 1 Lokasi Penelitian di Simpang Lingkaran Brawijaya, Merauke.
Sumber : Google Earth (2026), diolah oleh penulis.

Rancangan penelitian diawali dengan identifikasi permasalahan melalui observasi lapangan dan studi literatur terkait analisis kinerja simpang bersinyal [8][9][10], simpang bundaran [4][11], serta pengaturan fase sinyal [6][7][10]. Selanjutnya dilakukan survei lalu lintas untuk memperoleh data primer yang digunakan sebagai dasar analisis. Data yang terkumpul kemudian diolah menggunakan metode analisis PKJI 2023 untuk menentukan kinerja simpang pada kondisi eksisting [1][9]. Hasil perhitungan panjang antrean teoritis selanjutnya divalidasi terhadap data antrean aktual melalui uji statistik. Apabila hasil validasi menunjukkan kesesuaian yang memadai, model empiris ini digunakan untuk dan mengevaluasi beberapa alternatif pengaturan fase sinyal [10]. Bagan alir tahapan penelitian secara menyeluruh ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gbr. 2 Bagan alir penelitian

2.2. Jam Puncak

Survei lalu lintas dilakukan pada jam puncak sore di hari kerja karena periode ini merepresentasikan kondisi operasional simpang yang paling kritis. Pada waktu tersebut, volume lalu lintas umumnya mencapai nilai tertinggi sehingga menjadi dasar yang paling representatif dalam mengevaluasi kapasitas, tundaan, dan panjang antrean simpang. Secara umum, jam puncak pagi dan sore mencerminkan sebagian besar beban lalu lintas harian pada jaringan jalan perkotaan, karena arus kendaraan terkonsentrasi pada periode perjalanan komuter dan memiliki korelasi yang kuat terhadap pola lalu lintas harian [12]. Untuk menilai karakteristik arus lalu lintas selama periode jam puncak digunakan *Peak Hour Factor* (PHF), yaitu parameter yang menggambarkan tingkat keseragaman distribusi volume lalu lintas dalam satu jam puncak. Nilai PHF didapatkan dari hasil pembagian antara volume lalu lintas selama 1 jam puncak (V) dibagi dengan 4 kali volume lalu lintas terbesar dalam salah satu interval 15 menit pada jam puncak (V_{15}). Jika nilai hasil perhitungan semakin mendekati 1,0 menunjukkan bahwa distribusi arus lalu lintas selama satu jam relatif merata. Sebaliknya, nilai PHF yang rendah mengindikasikan bahwa volume lalu lintas terkonsentrasi pada interval waktu tertentu di dalam jam puncak sehingga fluktuasi arus menjadi lebih tinggi [13]. Nilai PHF dihitung dengan persamaan berikut.

$$PHF = \frac{V}{4 \times V_{15}} \quad (1)$$

2.3. Kinerja Simpang ber-APILL

Kinerja yang dianalisis meliputi derajat kejenuhan, tundaan rata-rata, dan panjang antrean pada setiap pendekat simpang [1]. Hasil analisis tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*) [13].

Derajat kejenuhan (DJ) merupakan indikator utama yang menunjukkan tingkat pemanfaatan kapasitas suatu pendekat simpang. Nilai derajat kejenuhan diperoleh dari perbandingan antara arus lalu lintas (Q) dengan kapasitas pendekat (C) dan dihitung menggunakan Persamaan berikut.

$$DJ = \frac{Q}{C} \quad (2)$$

Nilai DJ menggambarkan kondisi operasi simpang. Semakin besar nilai DJ, maka kapasitas simpang semakin mendekati kondisi jenuh. Kondisi operasi yang masih dapat diterima umumnya ditunjukkan oleh nilai $DJ \leq 0,85$, sedangkan nilai yang melebihi batas tersebut mengindikasikan bahwa pendekat telah mengalami kejenuhan sehingga berpotensi menimbulkan peningkatan tundaan dan antrean[1][10].

Selain derajat kejenuhan, parameter yang dianalisis adalah tundaan rata-rata kendaraan (*average control delay*). Tundaan merupakan tambahan waktu perjalanan yang dialami kendaraan akibat pengaturan sinyal lalu lintas dan dihitung sebagai kombinasi tundaan lalu lintas (*traffic delay*) dan tundaan geometrik (*geometric delay*). Nilai tundaan mencerminkan efisiensi operasional simpang, di mana semakin besar tundaan menunjukkan semakin rendah kualitas pelayanan yang diberikan kepada pengguna jalan. Parameter berikutnya adalah panjang antrean (*queue length*), yaitu panjang maksimum antrean kendaraan yang terbentuk pada setiap pendekat selama fase merah. Besarnya antrean dipengaruhi oleh volume lalu lintas, kapasitas pendekat, waktu siklus, proporsi waktu hijau efektif, dan derajat kejenuhan. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan pendekat dalam menampung kendaraan yang menunggu giliran melewati simpang sehingga dapat mengidentifikasi potensi terjadinya limpasan antrean (*queue spillback*).

Tingkat pelayanan simpang (*Level of Service/LOS*) ditentukan berdasarkan nilai tundaan rata-rata kendaraan. Klasifikasikan kualitas pelayanan simpang ke dalam enam tingkat, yaitu LOS A hingga LOS F, dengan LOS A menunjukkan kondisi operasi terbaik dan LOS F menunjukkan kondisi operasi terburuk akibat tundaan yang tinggi. Kriteria LOS yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. *Level of Service*

LOS	Tundaan rata-rata (detik/kendaraan)	Karakteristik Operasi
A	≤ 10	Arus bebas dengan tundaan sangat rendah
B	$>10 - 20$	Arus stabil dengan tundaan rendah
C	$>20 - 35$	Arus masih stabil dengan tundaan sedang
D	$>35 - 55$	Arus mendekati tidak stabil
E	$>55 - 80$	Operasi mendekati kapasitas
F	>80	Kondisi jenuh dengan tundaan sangat tinggi

2.4. Penyesuaian Analisis PKJI 2023 pada Simpang Bundaran Bersinyal

Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) 2023 menyediakan prosedur analisis untuk simpang bersinyal dan bundaran secara terpisah. Mengingat pedoman tersebut belum mengatur secara spesifik analisis simpang bundaran yang dikendalikan oleh sinyal lampu lalu lintas (APILL), dilakukan penyesuaian pada parameter geometrik dan karakteristik operasional, seperti pengaruh kecepatan kendaraan pada zona pendekatan dan sirkulasi bundaran yang disesuaikan dengan kondisi lapangan [2][3].

Penyesuaian pertama dilakukan pada representasi geometrik simpang. Area bundaran diperlakukan sebagai titik konflik utama yang menghubungkan empat pendekat bersinyal, sehingga analisis kapasitas dan kinerja dilakukan pada masing-masing pendekat simpang[14]. Peningkatan sudut masuk dari 30 derajat menjadi 60 derajat mengakibatkan penurunan kapasitas sebesar 3%. Sudut masuk yang lebih tinggi menyulitkan kendaraan untuk bergabung dengan lalu lintas yang beredar. [15]. Pendekatan ini dipilih karena proses pelayanan kendaraan pada lokasi penelitian lebih dipengaruhi oleh pengaturan sinyal dibandingkan mekanisme prioritas kendaraan yang umumnya terjadi pada bundaran tidak bersinyal.

Penyesuaian kedua dilakukan pada karakteristik operasional kendaraan di area bundaran. Kendaraan yang memasuki bundaran mengalami penurunan kecepatan akibat pengaruh geometri lingkaran, keberadaan pulau bundaran, dan interaksi dengan kendaraan dari pendekat lain. Penelitian sebelumnya menemukan bahwa model teoretis tidak memperhitungkan pengurangan kecepatan yang signifikan sebelum kendaraan memasuki bundaran dan mengabaikan kecepatan kendaraan yang mendekat dengan kecepatan rendah [16]. Oleh karena itu, asumsi kecepatan kendaraan yang digunakan dalam analisis yaitu 35 km/jam lebih rendah dari asumsi kecepatan dalam

PKJI 2023 (37 km/jam). Penyesuaian ini bertujuan untuk menghasilkan estimasi panjang antrean dan tundaan yang lebih mendekati kondisi aktual.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Geometrik eksisting

Kondisi eksisting simpang diperoleh melalui survei lapangan yang meliputi pengukuran geometri, identifikasi lingkungan jalan, serta pencatatan karakteristik lalu lintas pada masing-masing pendekat. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa simpang memiliki karakteristik yang bervariasi pada setiap pendekat sebagaimana disajikan pada **Tabel 2**. Pendekat utara, selatan, dan barat berada pada kawasan komersial (KOM), sedangkan pendekat timur berada pada kawasan industri dan perdagangan (KIM). Kelas hambatan samping pada pendekat utara dan timur tergolong rendah, sementara pada pendekat selatan dan barat tergolong tinggi. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa aktivitas di sisi jalan pada pendekat selatan dan barat relatif lebih intensif dibandingkan pendekat lainnya, sehingga berpotensi memengaruhi kelancaran arus lalu lintas. Berdasarkan hasil survei geometri, seluruh pendekat memiliki kondisi kelandaian datar (0%) dan tidak terdapat fasilitas belok kiri langsung (BKJT).

Tabel 2. Kondisi eksisting pada Simpang Lingkaran Brawijaya, Merauke

Pendekat	Tipe Lingkungan	Kelas hambatan	Median	Kelandaian (%)	BKJT	Pendekat			
						Lebar awal lajur (m)	Lebar garis henti (m)	Lebar Keluar (m)	Sudut masuk
Utara	Komersil	Rendah	Ya	0	Tidak	9,0	9,0	8,5	30
Timur	Pemukiman	Rendah	Tidak	0	Tidak	3,5	6,5	7,5	30
Selatan	Komersil	Tinggi	Ya	0	Tidak	7,0	9,5	8,5	30
Barat	Komersil	Tinggi	Tidak	0	Tidak	4,0	7,5	3,5	30

3.2. Volume lalu lintas

Volume lalu lintas diperoleh melalui survei pencacahan kendaraan pada periode jam puncak sore hari, yaitu pukul 16.45–17.45 WIT. Pemilihan periode tersebut didasarkan pada hasil survei yang menunjukkan arus lalu lintas tertinggi terjadi pada rentang waktu tersebut yang disajikan pada **Tabel 2**. Volume lalu lintas tertinggi terjadi pada pukul 17.15 dengan total 1900 kend./jam dengan nilai PHF sebesar 0,96 yang artinya volume lalu lintas di waktu tersebut terdistribusi merata. Volume lalu lintas pada masing-masing pendekat jenis kendaraan serta arah pergerakannya disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Volume lalu lintas pada jam puncak

Waktu survei	Total volume (kend./jam)
00.00 - 17.00	1880
17.00 - 17.15	1692
17.15 - 17.30	1900
17.30 - 17.45	1796

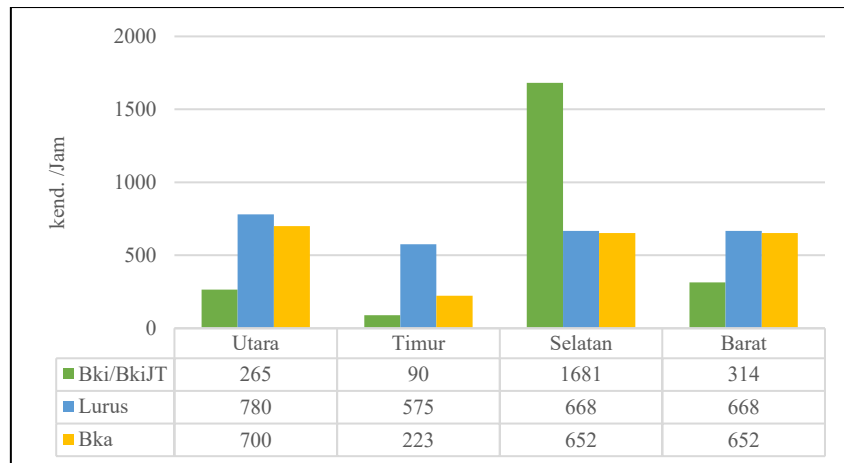
Variasi pola pergerakan antarpendekat menunjukkan bahwa karakteristik lalu lintas pada simpang tidak terdistribusi secara merata sehingga berpotensi menimbulkan perbedaan tingkat pelayanan dan derajat kejenuhan pada masing-masing pendekat (**Gambar 3**). Pendekat selatan memiliki volume lalu lintas tertinggi dengan total arus sebesar 3.001 kend./jam, yang terdiri atas arus belok kanan 1.681 kend./jam, arus lurus 668 kend./jam, dan arus belok kiri 652 kend./jam. Tingginya volume pada pendekat selatan menunjukkan bahwa pendekat ini merupakan lengan simpang yang paling dominan dalam membangkitkan pergerakan kendaraan. Sebaliknya, pendekat timur memiliki volume total terendah sebesar 888 kend./jam. Pada pendekat ini, pergerakan kendaraan didominasi oleh arus lurus (575 kend./jam), sedangkan arus belok kanan (90 kend./jam) dan belok kiri (223 kend./jam) relatif lebih kecil. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kecenderungan distribusi perjalanan yang lebih banyak menuju ruas jalan lain melalui pergerakan lurus.

Tabel 4. Volume lalu lintas pada jam puncak sore hari (16.45 – 17.45 WIT)

Pendekat	Mobil Penumpang	Kendaraan Berat	Sepeda Motor
U	BKi/BKiJT	24	189
	Lurus	105	668
	BKa	145	550
	Total	274	1407
S	BKi/BKiJT	288	1347
	Lurus	63	596
	BKa	70	547
	Total	421	2490
T	BKi/BKiJT	40	46

B	Lurus	105	4	466
	BKa	39	26	158
	Total	184	34	670
	BKi/BKiJT	19	5	290
	Lurus	63	9	596
	BKa	70	35	547
	Total	152	49	1433

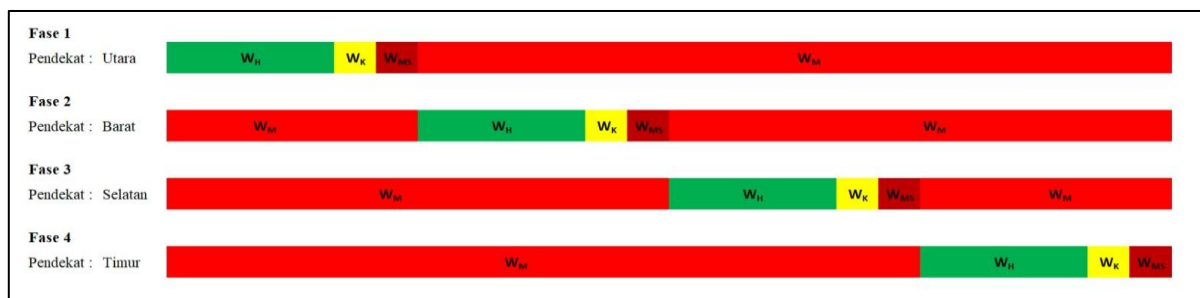
Pada pendekat utara, arus lalu lintas didominasi oleh pergerakan lurus sebesar 780 kend./jam, diikuti belok kiri sebesar 700 kend./jam dan belok kanan sebesar 265 kend./jam. Sementara itu, pada pendekat barat, arus lurus dan belok kiri relatif seimbang dengan volume masing-masing 668 kend./jam dan 652 kend./jam, sedangkan arus belok kanan sebesar 314 kend./jam.



Gbr. 3 Distribusi volume lalu lintas pada simpang

3.3. Kinerja simpang

Analisis kinerja lalu lintas pada simpang eksisting dilakukan dengan merujuk pada Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI 2023). Analisa dihitung berdasarkan data geometri eksisting, volume lalu lintas pada jam puncak dan waktu sinyal eksisting yang disajikan pada **Tabel 5** dengan urutan fase sinyal sesuai dengan **Gambar 4**. Waktu siklus untuk perhitungan kinerja simpang eksisting adalah 91 detik dengan waktu hilang hijau total 20 detik. Berdasarkan hasil perhitungan data yang disajikan pada **Tabel 6**, diketahui bahwa karakteristik operasional pada setiap kaki simpang (pendekat) menunjukkan variasi kinerja yang cukup signifikan, baik dari segi derajat kejenuhan, tundaan, panjang antrian, maupun tingkat pelayanan (*Level of Service/LOS*).



Gbr. 4. Urutan sinyal APILL simpang Libra

Tabel 5. Waktu sinyal eksisting pada simpang lingkaran brawijaya, Merauke

Pendekat	Waktu Hijau (dtk.)	Waktu Kuning (dtk.)	Waktu Antar Hijau (dtk.)
Utara	18	2	5
Barat	20	2	5
Selatan	19	2	5
Timur	14	2	5

Tabel 6. Kinerja simpang eksisting

Pendekat	Volume (SMP/jam)	Kapasitas (SMP/Jam)	Dj	Tundaan rata - rata (detik/SMP)	Antrean (m)	LOS
Utara	543	1055	0,51	36,13	29	D
Barat	915	998	0,92	49,04	55	D
Selatan	370	500	0,74	43,74	31	D
Timur	434	593	0,73	54,36	32	D

Hasil analisis menunjukkan bahwa pendekat Utara memiliki volume lalu lintas sebesar 543 smp/jam dengan kapasitas 1.055 smp/jam, sehingga diperoleh nilai DJ sebesar 0,51. Pendekat Timur memiliki nilai DJ sebesar 0,73, diikuti pendekat Selatan sebesar 0,74, sedangkan pendekat Barat memiliki nilai DJ tertinggi yaitu 0,92. Kondisi ini menunjukkan bahwa pendekat Barat merupakan titik paling kritis karena telah melampaui batas kejenuhan yang direkomendasikan dalam PKJI 2023, sehingga berpotensi mengalami penurunan kinerja lalu lintas terutama pada periode jam puncak.

Tingginya nilai derajat kejenuhan berpengaruh terhadap peningkatan tundaan dan panjang antrean kendaraan pada pendekat tersebut. Pendekat Barat mengalami tundaan rata-rata terbesar, yaitu 49,04 detik/kendaraan, dengan panjang antrean mencapai 55 m, yang mengindikasikan tingginya waktu tunggu kendaraan selama fase merah. Sebaliknya, pendekat Utara memiliki kondisi operasional yang relatif lebih baik dengan tundaan rata-rata sebesar 36,13 detik/kendaraan dan panjang antrean sekitar 29 m. Meskipun pendekat Timur memiliki nilai DJ yang sedikit lebih rendah dibandingkan pendekat Selatan, tundaan rata-ratanya merupakan yang tertinggi, yaitu 54,36 detik/kendaraan, dengan panjang antrean 32 m. Perbedaan nilai tundaan antarpendekat menunjukkan bahwa tundaan tidak hanya dipengaruhi oleh derajat kejenuhan, tetapi juga oleh pengaturan waktu sinyal dan kapasitas pelayanan masing-masing pendekat. Pendekat Timur memiliki derajat kejenuhan sebesar 0,73, lebih rendah dibandingkan pendekat Barat sebesar 0,92, tetapi menghasilkan tundaan rata-rata yang lebih tinggi, yaitu 54,36 detik/SMP dibandingkan 49,04 detik/SMP. Kondisi tersebut berkaitan dengan waktu hijau pendekat Timur yang hanya 14 detik dalam siklus 91 detik, sedangkan pendekat Barat memperoleh waktu hijau 20 detik. Waktu hijau yang lebih singkat menyebabkan kesempatan kendaraan pada pendekat Timur untuk melewati simpang dalam setiap siklus menjadi lebih terbatas. Hal ini juga tercermin pada kapasitas pendekat Timur yang hanya sebesar 593 SMP/jam, lebih rendah dibandingkan pendekat Barat sebesar 998 SMP/jam. Dengan demikian, meskipun volume lalu lintas pada pendekat Timur hanya 434 SMP/jam, kendaraan yang datang memiliki peluang pelayanan yang lebih terbatas sehingga waktu tunggu rata-rata menjadi lebih besar. Sebaliknya, pendekat Barat memiliki derajat kejenuhan lebih tinggi karena volume lalu lintas mencapai 915 SMP/jam, tetapi memperoleh waktu hijau yang lebih besar sehingga kapasitas pelayanannya juga lebih tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa evaluasi tundaan pada simpang bersinyal perlu mempertimbangkan hubungan antara volume lalu lintas, kapasitas, dan alokasi waktu hijau, bukan hanya nilai derajat kejenuhan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja simpang dipengaruhi oleh interaksi antara volume lalu lintas, kapasitas, derajat kejenuhan, dan pengaturan waktu sinyal. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian Nento et al. [4] pada Bundaran Saronde Kota Gorontalo yang menunjukkan bahwa kondisi bundaran dengan derajat kejenuhan sebesar 0,974 telah melampaui kapasitas pelayanan dan menghasilkan tundaan rata-rata sebesar 18,06 detik/smp. Meskipun nilai parameter pada penelitian ini berbeda, pola hubungan antara peningkatan derajat kejenuhan dan penurunan kinerja operasional menunjukkan kecenderungan yang serupa. Perbedaan nilai kinerja dapat disebabkan oleh karakteristik geometrik, distribusi arus, komposisi kendaraan, serta sistem pengendalian lalu lintas yang berbeda. Penelitian Gare dan Kota[11] pada Bundaran Simpang Lima Kabupaten Ende juga menunjukkan kondisi yang relatif lebih rendah, dengan derajat kejenuhan sebesar 0,67 dan tundaan sebesar 4,04 detik, yang menunjukkan bahwa tingkat kinerja bundaran sangat bergantung pada karakteristik lalu lintas dan kapasitas masing-masing lokasi. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat temuan terdahulu bahwa evaluasi kinerja bundaran perlu mempertimbangkan karakteristik spesifik lokasi, sementara pada bundaran yang dikendalikan APILL, alokasi waktu hijau menjadi faktor tambahan yang memengaruhi kapasitas dan tundaan.

Dari sisi metode analisis, hasil penelitian ini juga dapat dibandingkan dengan penelitian Muttaqin dan Ariandi [9] yang menerapkan PKJI 2023 pada Simpang Tobek Godang, Kota Pekanbaru. Penelitian tersebut menunjukkan derajat kejenuhan sebesar 1,04 pada pendekat utara, 1,22 pada pendekat timur, dan 1,28 pada pendekat barat, sehingga seluruh pendekat berada pada kondisi jenuh. Hasil tersebut memiliki kecenderungan yang sama dengan penelitian ini, khususnya pada pendekat Barat yang memiliki derajat kejenuhan tertinggi sebesar 0,92 dan telah melampaui batas 0,85 yang digunakan sebagai indikator kondisi jenuh. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa PKJI 2023 dapat digunakan untuk mengidentifikasi pendekat kritis berdasarkan hubungan antara arus dan kapasitas. Namun, penelitian Muttaqin dan Ariandi [9] dilakukan pada simpang tiga bersinyal konvensional, sedangkan penelitian ini menerapkan PKJI 2023 pada simpang empat berbentuk bundaran yang dikendalikan APILL. Oleh karena itu, penelitian ini memperluas penerapan PKJI 2023 pada karakteristik simpang yang berbeda melalui penyesuaian parameter geometrik dan operasional sesuai kondisi lapangan.

Tingkat pelayanan simpang (*Level of Service/LOS*) ditentukan berdasarkan nilai tundaan rata-rata kendaraan[13]. Hasil analisis menunjukkan bahwa semua pendekat memperoleh LOS D, yang mengindikasikan

kondisi arus lalu lintas masih relatif stabil, tetapi pengendara mengalami tundaan yang cukup tinggi serta keterbatasan dalam memilih kecepatan dan melakukan manuver, terutama pada periode jam puncak.

Oleh karena itu, diperlukan evaluasi terhadap pengaturan waktu sinyal maupun alternatif rekayasa lalu lintas untuk menurunkan tingkat kejenuhan pada pendekat Barat sehingga kinerja simpang secara keseluruhan dapat ditingkatkan.

3.4. Uji Statistik data

Perhitungan panjang antrean menggunakan PKJI merupakan hasil analisis berdasarkan model matematis dan parameter lalu lintas yang telah distandarkan. Meskipun demikian, hasil perhitungan tersebut belum tentu sama dengan kondisi operasional di lapangan yang dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti perilaku pengemudi, hambatan samping, komposisi kendaraan, serta karakteristik geometrik simpang. Oleh karena itu, diperlukan pengujian statistik untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara panjang antrean hasil survei lapangan dengan hasil perhitungan menggunakan PKJI. Pengujian statistik dilakukan agar keputusan dalam penelitian tidak hanya didasarkan pada perbedaan nilai rata-rata secara deskriptif, tetapi juga mempertimbangkan apakah perbedaan tersebut signifikan secara statistik. Data panjang antrean di lapangan disajikan pada **Tabel 6**.

Tabel 7. Hasil survei panjang antrean di lapangan

Pendekat	PKJI (m)	n	Rata – rata (m)	SD (m)	Min. (m)	Maks. (m)
Utara	29	40	32,51	4,22	27,30	42,00
Barat	55	40	55,01	3,94	47,50	62,50
Selatan	31	40	32,11	2,88	27,30	42,30
Timur	32	40	32,96	3,33	21,50	38,20

Pada periode puncak selama 1 jam dengan waktu siklus sinyal sebesar 91 detik, diperoleh sekitar 40 siklus sinyal. Setiap siklus digunakan sebagai satu observasi, sehingga diperoleh 40 observasi pada masing-masing pendekat. Data tersebut diuji normalitas menggunakan Shapiro–Wilk karena jumlah sampel pada masing-masing pendekat sebanyak 40 observasi ($n < 50$). Berdasarkan hasil Analisa pada **Tabel 7** diperoleh bahwa Pendekat Utara memiliki nilai signifikansi sebesar 0,426, sehingga data berdistribusi normal. Namun untuk Pendekat Barat, Selatan, dan Timur memiliki nilai signifikansi masing-masing sebesar 0,002, 0,046, dan 0,029, yang lebih kecil dari 0,05 sehingga data tidak berdistribusi normal. Dengan demikian, asumsi normalitas tidak terpenuhi pada sebagian besar pendekat sehingga pengujian hipotesis menggunakan metode nonparametrik Wilcoxon Signed-Rank Test.

Tabel 8. Hasil uji normalitas data

Pendekat	Statistik shapiro-Wilk	Sig	Keputusan
Utara	0,972	0,426	Normal
Barat	0,903	0,002	Tidak normal
Selatan	0,944	0,046	Tidak Normal
Timur	0,938	0,029	Tidak Normal

Berdasarkan hasil uji One-Sample Wilcoxon Signed-Rank Test pada **Tabel 9** diperoleh bahwa pendekat Utara, Selatan, dan Timur memiliki nilai signifikansi masing-masing sebesar $<0,001$, 0,032, dan $<0,001$, yang lebih kecil dari taraf signifikansi 0,05. Hasil tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara panjang antrean hasil survei lapangan dengan hasil perhitungan menggunakan PKJI pada ketiga pendekat tersebut. Sebaliknya, pendekat Barat memiliki nilai signifikansi sebesar 0,577 ($>0,05$), sehingga tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara hasil survei dan hasil perhitungan PKJI.

Tabel 9. Hasil uji one-sample Wilcoxon signed rank test

Pendekat	Test Value (PKJI)	Sig. (2-tailed)	Keputusan
Utara	29	$<0,001$	Terdapat perbedaan signifikan
Barat	55	0,577	Tidak berbeda signifikan
Selatan	31	0,032	Terdapat perbedaan signifikan
Timur	32	$<0,001$	Terdapat perbedaan signifikan

3.5. Penyusunan fase alternatif

Berdasarkan **Tabel 5**, seluruh pendekat simpang berada pada LOS D, dengan nilai derajat kejenuhan (D_j) berkisar 0,51–0,92. Pendekat barat memiliki kinerja terburuk dengan D_j sebesar 0,92, volume 915 SMP/jam, serta panjang antrean 55 m. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kapasitas pada pendekat barat telah mendekati jenuh sehingga diperlukan alternatif pengaturan sinyal untuk meningkatkan kinerja simpang.

Optimalisasi fase lalu lintas disusun tanpa mengubah jumlah fase, yaitu dengan menambah waktu siklus dan mengoptimalkan pembagian waktu hijau. Penambahan waktu hijau pada pendekat dengan volume lalu lintas terbesar diharapkan dapat meningkatkan kapasitas pelayanan, sehingga derajat kejenuhan, tundaan, dan panjang antrean dapat berkurang tanpa mengubah konfigurasi fase eksisting. Hasil optimalisasi tersebut selanjutnya

dievaluasi menggunakan parameter derajat kejenuhan (Dj), tundaan, panjang antrean, dan tingkat pelayanan (LOS) sesuai dengan metode PKJI 2023.

Tabel 10. Hasil perhitungan eksisting dan alternatif

Pendekat	Parameter	Eksisting	Hasil optimalisasi
Utara	Dj	0,51	0,6
	Tundaan	36,13	35,82
	Antrean	29	27
	LOS	D	D
Barat	Dj	0,92	0,6
	Tundaan	49,04	26,18
	Antrean	55	38
	LOS	D	C
Selatan	Dj	0,74	0,6
	Tundaan	43,74	40,13
	Antrean	31	28
	LOS	D	D
Timur	Dj	0,73	0,6
	Tundaan	54,36	46,15
	Antrean	32	30
	LOS	D	D

Hasil perhitungan perhitungan pada **Tabel 10** menunjukkan nilai derajat kejenuhan (Dj) pada seluruh pendekat pada hasil optimalisasi menjadi relatif merata, yaitu sekitar 0,6, dibandingkan kondisi eksisting yang berkisar antara 0,51–0,92. Penyesuaian ini mampu meningkatkan kinerja pendekat barat, selatan, dan timur yang ditunjukkan oleh penurunan tundaan dan panjang antrean. Pendekat barat mengalami perbaikan terbesar, dengan tundaan turun dari 49,04 menjadi 26,18 detik/kendaraan dan antrean berkurang dari 55 m menjadi 38 m. Hal tersebut membuat tingkat pelayanan pada pendekat barat naik menjadi C, sehingga alternatif ini lebih berperan dalam menyeimbangkan kinerja antarpendekat daripada meningkatkan tingkat pelayanan simpang secara keseluruhan.

Hasil optimalisasi pada penelitian ini menunjukkan bahwa redistribusi waktu hijau dan penyesuaian waktu siklus dapat meningkatkan kinerja simpang tanpa mengubah jumlah fase maupun geometrik. Pendekatan tersebut memiliki kesamaan dengan penelitian Halawani [6] yang menunjukkan bahwa pengaturan sinyal pada sistem yang melibatkan bundaran dapat digunakan untuk mengurangi tundaan dan meningkatkan efisiensi operasional. Halawani [6] melalui simulasi PTV VISSIM melaporkan penurunan tundaan rata-rata tingkat koridor sebesar 17% dan penurunan tundaan yang berkaitan dengan berhenti kendaraan sebesar 28% setelah penerapan strategi koordinasi sinyal. Pada penelitian ini, pendekatan berbasis perhitungan PKJI 2023 menghasilkan penurunan tundaan pada pendekat Barat sebesar 46,6%, dari 49,04 menjadi 26,18 detik/kendaraan, disertai penurunan panjang antrean sebesar 30,9%, dari 55 menjadi 38 m. Perbedaan besarnya peningkatan tersebut tidak dapat dibandingkan secara langsung karena Halawani menggunakan simulasi mikroskopik dan strategi koordinasi offset pada koridor, sedangkan penelitian ini mengoptimalkan distribusi waktu hijau pada satu simpang. Meskipun demikian, kedua penelitian menunjukkan kecenderungan yang konsisten bahwa pengaturan sinyal yang disesuaikan dengan karakteristik arus lalu lintas dapat mengurangi tundaan dan meningkatkan efisiensi operasional.

Perbedaan pendekatan tersebut menunjukkan posisi penelitian ini dalam pengembangan kajian kinerja simpang. Penelitian terdahulu mengenai bundaran di Indonesia umumnya mengevaluasi kapasitas dan tingkat kejenuhan menggunakan pendekatan MKJI, seperti pada Bundaran Saronde [4] dan Bundaran Simpang Lima Kabupaten Ende [11], sedangkan penelitian PKJI 2023 yang telah dilakukan sebelumnya berfokus pada simpang bersinyal konvensional [9]. Sementara itu, penelitian Halawani [6] mengembangkan strategi koordinasi sinyal pada sistem bundaran menggunakan simulasi mikroskopik. Penelitian ini menggabungkan evaluasi kinerja berbasis PKJI 2023 dengan optimasi distribusi waktu hijau pada simpang bundaran bersinyal, sehingga memberikan pendekatan alternatif yang lebih sederhana untuk mengevaluasi peningkatan kinerja berdasarkan kondisi lalu lintas aktual. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kinerja dapat dicapai terutama melalui penyesuaian alokasi waktu hijau pada pendekat kritis, tanpa memerlukan perubahan geometrik maupun penambahan fase sinyal.

3.6. Evaluasi Kinerja Simpang pada kondisi eksisting dan hasil optimalisasi

Berdasarkan **Tabel 9**, optimalisasi pengaturan sinyal melalui penyesuaian waktu siklus dan redistribusi waktu hijau memberikan peningkatan kinerja pada seluruh pendekat simpang. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa derajat kejenuhan (Dj) yang pada kondisi eksisting berada pada rentang 0,51–0,92 berhasil diturunkan menjadi sekitar 0,60, sehingga kapasitas pelayanan simpang menjadi lebih seimbang. Perbaikan tersebut diikuti dengan penurunan tundaan dan panjang antrean pada seluruh pendekat, terutama pada pendekat Barat yang mengalami penurunan tundaan dari 49,04 detik/kendaraan menjadi 26,18 detik/kendaraan serta penurunan panjang antrean dari 55 m menjadi 38 m. Dampak dari peningkatan tersebut juga terlihat pada tingkat pelayanan, di mana pendekat

Barat meningkat dari LOS D menjadi LOS C, sedangkan pendekat lainnya tetap berada pada LOS D namun dengan nilai derajat kejenuhan, tundaan, dan panjang antrean yang lebih rendah dibandingkan kondisi eksisting. Hasil ini menunjukkan bahwa penyesuaian waktu hijau sesuai dengan distribusi volume lalu lintas mampu meningkatkan efisiensi pelayanan tanpa mengubah jumlah fase maupun geometrik simpang.

Hasil perhitungan PKJI pada kondisi eksisting telah dibandingkan dengan data survei lapangan melalui pengujian statistik. Uji normalitas menunjukkan bahwa data pada pendekat Barat, Selatan, dan Timur tidak memenuhi asumsi distribusi normal, sehingga pengujian hipotesis dilanjutkan menggunakan One-Sample Wilcoxon Signed-Rank Test. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pendekat Utara, Selatan, dan Timur memiliki perbedaan yang signifikan terhadap hasil perhitungan PKJI, sedangkan pendekat Barat tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan ($\text{Sig.} = 0,577 > 0,05$). Kondisi ini mengindikasikan bahwa model PKJI mampu merepresentasikan kondisi antrean pada pendekat Barat dengan baik, sedangkan pada pendekat lainnya masih terdapat selisih yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh kondisi operasional aktual, seperti variasi perilaku pengemudi, komposisi kendaraan, distribusi kedatangan kendaraan yang tidak seragam, hambatan samping, serta karakteristik geometrik simpang. Dengan demikian, hasil uji statistik tidak menunjukkan bahwa PKJI belum dapat digunakan untuk menganalisa kinerja simpang ber-APILL dengan bundaran, tetapi dapat menginformasikan bahwa terdapat perbedaan antara model analitis dan kondisi lapangan yang perlu dipertimbangkan dalam proses evaluasi.

Meskipun sebagian pendekat menunjukkan perbedaan yang signifikan terhadap hasil survei lapangan, PKJI tetap digunakan sebagai dasar evaluasi alternatif karena merupakan pedoman nasional yang menyediakan prosedur analisis kapasitas, derajat kejenuhan, tundaan, dan panjang antrean secara konsisten. Hasil optimalisasi pada **Tabel 9** membuktikan bahwa perubahan pengaturan waktu sinyal mampu meningkatkan kinerja simpang menurut parameter PKJI, sehingga alternatif yang diusulkan tetap dapat digunakan sebagai dasar rekomendasi teknis. Implikasi dari hasil penelitian ini adalah bahwa proses optimalisasi fase sinyal tidak harus diawali dengan kesesuaian sempurna antara model dan kondisi lapangan, melainkan lebih diarahkan pada peningkatan kinerja relatif terhadap kondisi eksisting menggunakan metode evaluasi yang sama. Oleh karena itu, alternatif yang menghasilkan penurunan derajat kejenuhan, tundaan, dan panjang antrean dapat dipertimbangkan sebagai solusi yang lebih efektif untuk meningkatkan kinerja operasional simpang, dengan tetap mempertimbangkan bahwa validasi implementasi di lapangan diperlukan untuk mengakomodasi faktor-faktor operasional yang tidak sepenuhnya dimodelkan oleh PKJI.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, kondisi eksisting simpang menunjukkan kinerja yang belum optimal, dengan seluruh pendekat berada pada *Level of Service* (LOS) D dan nilai derajat kejenuhan berkisar antara 0,51–0,92. Pendekat Barat merupakan pendekat paling kritis dengan derajat kejenuhan sebesar 0,92, tundaan 49,04 detik/kendaraan, dan panjang antrean 55 m. Hasil pengujian statistik menunjukkan bahwa model PKJI 2023 belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi lapangan, ditunjukkan oleh adanya perbedaan signifikan pada 75% pendekat berdasarkan uji One-Sample Wilcoxon Signed-Rank, sedangkan 25% pendekat tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Meskipun demikian, PKJI 2023 tetap dapat digunakan sebagai dasar evaluasi alternatif karena menyediakan prosedur analisis yang konsisten. Optimalisasi pengaturan fase sinyal tanpa mengubah jumlah fase mampu meningkatkan kinerja simpang, terutama pada pendekat Barat, dengan menurunkan derajat kejenuhan dari 0,92 menjadi 0,60 (34,8%), tundaan dari 49,04 menjadi 26,18 detik/kendaraan (46,6%), dan panjang antrean dari 55 menjadi 38 m (30,9%). Perbaikan tersebut meningkatkan tingkat pelayanan pendekat Barat dari LOS D menjadi LOS C, sementara pendekat lainnya tetap berada pada LOS D dengan nilai derajat kejenuhan, tundaan, dan panjang antrean yang lebih rendah dibandingkan kondisi eksisting. Dengan demikian, optimalisasi waktu siklus dan redistribusi waktu hijau terbukti efektif meningkatkan efisiensi operasional simpang tanpa memerlukan perubahan geometrik maupun penambahan jumlah fase sinyal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan Terima Kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan nyata terhadap penelitian hingga proses analisa data serta penyusunan artikel.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Direktorat Jendral Bina Marga, *Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023.
- [2] M. Klobučar, A. Deluka-Tibljaj, S. Šurdonja, T. Campisi, dan R. Maršanić, "Roundabout approaching speed analyses," dalam *CETRA International Conference on Road and Rail Infrastructure*, Mei 2022, hlm. 43–49. doi: 10.5592/CO/CETRA.2022.1444.
- [3] E. D. Saldivar-Carranza, M. W. Overall, dan D. M. Bullock, "An Update on Passenger Vehicle Speeds at Roundabouts," *Smart Cities*, vol. 7, no. 2, hlm. 932–945, Apr 2024, doi: 10.3390/smartcities7020039.
- [4] S. Nento, R. A. Djau, dan Muh. M. M. Ibrahim, "ANALISIS DAN EVALUASI KINERJA BUNDRAN SARONDE KOTA GORONTALO," *RADIAL: Jurnal Peradaban Sains, Rekayasa dan Teknologi*, vol. 10, no. 1, hlm. 132–143, Jul 2022, doi: 10.37971/radial.v10i1.259.

- [5] D. P. Hardiani dan E. Ruhaidani, "PENGARUH PENUTUPAN SATU LENGAN SIMPANGAN TERHADAP KINERJA BUNDARAN KAYUTANGI BANJARMASIN," *Jurnal Kacapuri : Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, vol. 8, no. 1, hlm. 83, Jun 2025, doi: 10.31602/jk.v8i1.16185.
- [6] A. T. M. Halawani, "Smart Roundabout Coordination Systems for Sustainable Urban Mobility," *Civil Engineering Journal*, vol. 11, no. 2, hlm. 623–634, Feb 2025, doi: 10.28991/CEJ-2025-011-02-013.
- [7] S. A. Arfian, T. Tuhu Prasetyo, dan P. Wahyu Nariendra, "Analisis Fase Dan Waktu Siklus Simpang Apill Dalam Upaya Peningkatan Keselamatan Lalu Lintas Menggunakan Simulasi PTV Vissim dan Software Surrogate Safety Assessment Model," *Jurnal Keselamatan Transportasi Jalan (Indonesian Journal of Road Safety)*, vol. 11, no. 2, Des 2024, doi: 10.46447/kjt.v11i2.628.
- [8] A. Yakob Elu Ado, A. T. Handayani, dan H. P. Astutik, "ANALISIS KINERJA SIMPANG BERSINYAL MENGGUNAKAN SOFTWARE PTV VISSIM (STUDI KASUS: SIMPANG PROLIMAN, PRAMBANAN) TAMANMARTANI, KABUPATEN SLEMAN, DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA," *Spektrum Sipil*, vol. 11, no. 2, hlm. 97–108, Sep 2024, doi: 10.29303/spektrum.v11i2.361.
- [9] M. Z. Muttaqin dan Wahyuda Ariandi, "ANALISIS KINERJA LALU LINTAS SIMPANG TIGA BERSINYAL BERDASARKAN METODE PKJI 2023(STUDI KASUS: SIMPANG TOBEK GODANG, KOTA PEKANBARU)," *Jurnal Transportasi*, vol. 25, no. 3, hlm. 235–246, Des 2025, doi: 10.26593/jtrans.v25i3.9934.235-246.
- [10] O. S. Pribadi, R. Fajri, dan R. Simanjuntak, "Koordinasi Empat Simpang Bersinyal Untuk Kelancaran Arus Lalu Lintas Di Kota Banjarmasin," *Jurnal Penelitian Sekolah Tinggi Transportasi Darat*, vol. 11, no. 1, hlm. 44–51, Jan 2020, doi: 10.55511/jpsttd.v11i1.547.
- [11] M. Gare dan I. Kota, "Evaluasi Kinerja Bundaran Simpang Lima Kabupaten Ende," *TEKNOSIAR*, vol. 14, no. 2, hlm. 72–79, Okt 2020, doi: 10.37478/teknosiar.v14i2.3443.
- [12] S. Wang, D. Yu, X. Ma, dan X. Xing, "Analyzing urban traffic demand distribution and the correlation between traffic flow and the built environment based on detector data and POIs," *European Transport Research Review*, vol. 10, no. 2, hlm. 50, Jun 2018, doi: 10.1186/s12544-018-0325-5.
- [13] Transportation Research Board, *Highway Capacity Manual: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*, 7th ed. National Academies Press, 2022.
- [14] K. Jalil, Y. Xia, M. N. Zahid, dan M. A. S. Kamal, "Two Stop-Line Method for Modern T-Shape Roundabout: Evaluation of Capacity and Optimal Signal Cycle," *J. Adv. Transp.*, vol. 2022, hlm. 1–14, Mei 2022, doi: 10.1155/2022/7679496.
- [15] A. B. Zacharia, H. Madhavan, dan M. V. L. R. Anjaneyulu, "Geometric factors influencing entry capacity of roundabouts under heterogeneous traffic conditions," *Archives of Transport*, vol. 49, no. 1, hlm. 87–101, Mar 2019, doi: 10.5604/01.3001.0013.2778.
- [16] E. D. Saldivar-Carranza, M. W. Overall, dan D. M. Bullock, "An Update on Passenger Vehicle Speeds at Roundabouts," *Smart Cities*, vol. 7, no. 2, hlm. 932–945, Apr 2024, doi: 10.3390/smartcities7020039.