

Perencanaan Koordinasi Sinyal di Ruas Jalan Yogyakarta-Solo (Studi Kasus: Simpang Stasiun Brambanan dan Simpang Taman Wisata Candi)

Raafi Widyaputra Yulianyaha
Program Studi Rekayasa Sipil, Universitas Esa Unggul
Jalan Arjuna Utara No.9 Kebon Jeruk, Jakarta
E-mail: raafi.widyaputra@esaunggul.ac.id

Abstrak — Di sekitar Candi Prambanan (Indonesia) terdapat dua simpang bersinyal yang jaraknya berdekatan dalam jarak 436 meter. Jarak simpang yang berdekatan dan banyaknya volume kendaraan yang melewati ruas jalan Yogyakarta-Solo akan menimbulkan permasalahan lalu lintas karena kedua simpang bersinyal belum terkoordinasi yang akan mengakibatkan kemacetan pada saat jam sibuk. Untuk itu, diperlukan alternatif penyesuaian waktu siklus simpang untuk menciptakan kedua simpang menjadi terkoordinasi sehingga meminimalisir terjadinya kemacetan. Data primer volume dan waktu siklus simpang eksisting dikumpulkan dengan metode survei langsung di lapangan untuk melihat kinerja koordinasi sinyal eksisting. Metode pengolahan data primer yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan pemodelan software Vissim dan juga dilakukan analisis waktu hijau optimum dengan pendekatan Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI, 1997) pada perencanaan koordinasi sinyal. Kondisi eksisting yang didapatkan pada penelitian ini adalah bahwa kedua simpang tersebut belum terkoordinasi, terlihat dari tingkat pelayanan jalan masih masuk dengan kategori E dan perbedaan waktu siklus di kedua simpang tersebut. Alternatif waktu siklus terbaik untuk kedua simpang adalah 117 detik. Nilai waktu tempuh (dari arah Timur-Barat) sebesar 31,73 detik dengan kecepatan perjalanan rata-rata 49,47 km/jam, dan arah sebaliknya (Barat-Timur) nilai waktu tempuh sebesar 50,99 detik dengan kecepatan perjalanan rata-rata 30,78 km/jam.

Kata kunci: waktu siklus; mikrosimulasi; koordinasi sinyal; vissim.

Abstract — Around Prambanan Temple (Indonesia), two interchanges are close, within 436 meters. The proximity of the intersection and the large volume of vehicles passing through the Yogyakarta-Solo road section will cause traffic problems because the two interchanges have yet to be coordinated, resulting in congestion during peak hours. For this reason, an alternative adjustment to the interchange cycle time is needed to create the two intersections to be coordinated to minimize the occurrence of congestion. Primary data on the volume and cycle time of existing intersections were collected by direct survey methods to see the coordination performance of existing signals. The primary data processing method used in this study is by modeling Vissim software and also carried out optimum green time analysis with the Indonesian Highway Capacity Manual approach (IHCM, 1997) on signal coordination planning. Although the existing condition obtained in this study is that the two intersections have not been coordinated, it can be seen from the level of road service that it is still included in category E and the difference in cycle time at the two intersections. The best alternative cycle time for both intersections is 117 seconds. The travel time value (from East-West direction) is 31.73 seconds with an average travel speed of 49.47 km/h, and in the reverse direction (West-East), the travel time value is 50.99 seconds with an average travel speed of 30.78 km/h.

Keywords: cycle time; microsimulation; signal coordination; vissim.

I. PENDAHULUAN

Volume kendaraan akan bertambah setiap tahunnya tetapi tidak diimbangi dengan peningkatan kapasitas ruas jalan mengakibatkan kemacetan dan masalah-masalah lalu lintas lainnya, sedangkan untuk melakukan peningkatan tersebut sulit untuk dilaksanakan karena terkendala keterbatasan lahan. Persimpangan jalan merupakan simpul transportasi yang terbentuk dari beberapa ruas jalan dimana arus kendaraan dari beberapa ruas jalan tersebut bertemu dan berpencar

meninggalkan persimpangan (Hobbs, 1995). Pada saat arus lalu lintas sudah mulai meningkat, maka lampu lalu lintas sudah harus dipasang (Munawar, 2004). Ukuran meningkatnya arus lalu lintas yaitu dari waktu tunggu rata-rata kendaraan saat melintasi simpang, jika waktu tunggu rata-rata tanpa lampu lalu lintas jauh lebih besar dari waktu tunggu rata-rata dengan lampu lalu lintas maka perlu dipasang lampu lalu lintas (Yulianyaha, 2021).

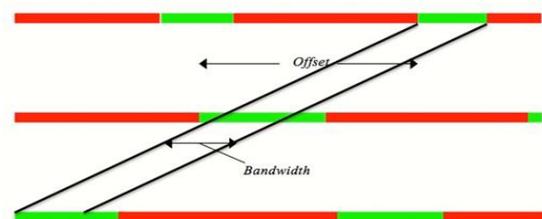
Selama 20 tahun terakhir, banyak penelitian telah mengembangkan prototipe koordinasi sinyal. Dua yang terkenal telah berhasil dikembangkan dan digunakan untuk kondisi lalu lintas yang kurang jenuh, yaitu *Split Cycle and Offset Optimization* (SCOOT) dan *Sydney Coordinated Adapted Traffic System* (SCATS). SCOOT telah menunjukkan hasil kinerja yang baik dalam kondisi lalu lintas sedang tetapi terdapat kekurangan dalam kondisi lalu lintas jenuh yang sangat berfluktuasi (Yagar & Dion, 1996). Selain itu, SCATS terbukti lebih efektif untuk mengurangi penundaan selama periode lalu lintas rendah daripada tinggi (Wolshon & Taylor, 1999). Penerapan koordinasi sinyal pada kondisi jenuh mengarah pada hasil yang kurang optimal. Sedikit informasi tentang jaringan jenuh dapat dibedakan sesuai dengan pilihan skema sinyal (pengaturan waktu sinyal tetap), fungsi objektif (manajemen antrian), dan jaringan (sejumlah sinyal yang saling bergantung) (Benekohal, 2021). Untuk kontrol sinyal waktu tetap, metode untuk mengoptimalkan pengaturan sinyal untuk persimpangan terisolasi dan dua persimpangan jenuh di jalan satu arah yang ditemukan oleh (Gazis, 1964) dan (Gazis & Potts, 1965). Penggunaan waktu sinyal tetap juga dilakukan oleh (Rathi, 1988) dan (Gal-Tzur et al., 1993) namun dengan tujuan yang berbeda dari konsep meminimalisasi tundaan. Metode mereka yaitu dengan memperoleh waktu sinyal optimal yang mendistribusikan antrian melalui jaringan sinyal. Beberapa algoritma waktu nyata berdasarkan manajemen konsep pertumbuhan antrian juga diusulkan (Miller, 1965) dan (Lee et al., 1974), tetapi tidak satupun diterapkan. Pengembangan strategi kontrol terhadap waktu nyata dan menyimpulkan bahwa penggunaan skema waktu nyata relatif lebih unggul terhadap kontrol waktu tetap pada persimpangan volume tinggi (Michalopoulos & Stephanopoulos, 1978). Penelitian dari (Abu-Lebdeh & Benekohal, 1997) dan (Lieberman et al., 2000) memberikan kerangka kerja untuk mengembangkan model koordinasi sinyal pada arus lalu lintas jenuh (arteri tunggal). Konsep koordinasi sinyal yang dikembangkan Abu-Lebdeh diperluas oleh (Girianna & Benekohal, 2002) untuk jaringan arteri satu arah.

Koordinasi sinyal dalam jaringan jalan dua arah lebih rumit daripada jaringan jalan satu arah (Newell, 1989). Untuk itu tujuan dari makalah ini

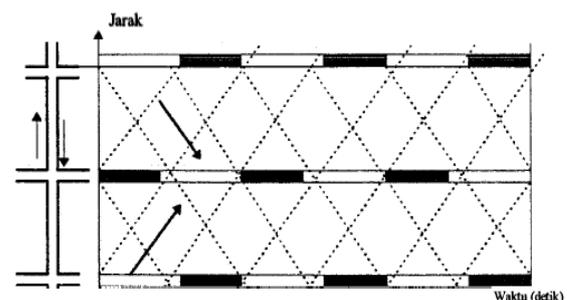
adalah untuk menyajikan koordinasi sinyal pada jalan dua arah dengan pemodelan (PTV Vissim, 2011) pada kondisi jam sibuk lalu lintas dan penentuan waktu hijau optimum.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Persimpangan jalan dapat diartikan sebagai daerah umum dimana dua jalan atau lebih bergabung termasuk jalan dan fasilitas tepi jalan untuk pergerakan lalu lintas di dalamnya (AASHTO, 2001). Menurut (Menteri Perhubungan, 2015), tingkat pelayanan adalah ukuran kuantitatif dan kualitatif yang menggambarkan kondisi operasional lalu lintas. Koordinasi antar simpang bersinyal merupakan salah satu jalan untuk mengurangi tundaan dan antrian (Taylor et al., 1996). Di dalam diagram koordinasi pada Gambar 1, terdapat konsep *offset* dan *bandwidth*. *Offset* merupakan perbedaan waktu antara awal sinyal hijau pada simpang pertama dan awal hijau pada simpang berikutnya, sedangkan *bandwidth* adalah perbedaan waktu dalam lintasan paralel sinyal hijau antara lintasan pertama dan lintasan terakhir, keduanya berada pada kecepatan konstan dan merupakan platoon (iring-iringan) yang tidak terganggu sinyal merah sama sekali (Papacostas & Prevedouros, 1993). Selain itu, diagram koordinasi sinyal pada jalan dua arah dengan jarak persimpangan seragam juga dipopulerkan oleh (Hobbs, 1995) seperti disajikan pada Gambar 2.



Gambar 1. *Offset* dan *bandwidth* dalam diagram koordinasi (Papacostas & Prevedouros, 1993)



Gambar 2. Diagram koordinasi sinyal pada jalan dua arah dengan jarak persimpangan seragam (Hobbs, 1995)

Vissim adalah perangkat lunak multi-moda lalu lintas aliran mikroskopis simulasi. Vissim dapat menganalisis lalu lintas dan perpindahan dengan Batasan pemodelan seperti geometrik jalur, komposisi kendaraan, sinyal lalu lintas, stop line, perilaku pengemudi sehingga menjadi suatu alat yang berguna untuk mengevaluasi berbagai alternatif berdasarkan rekayasa transportasi sebagai langkah-langkah pengambilan keputusan yang lebih efektif dan efisien dalam suatu kegiatan perencanaan termasuk simulasi dalam pengembangan model (PTV Vissim, 2011).

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini berlokasi di ruas jalan Yogyakarta-Solo seperti pada Gambar 3, ruas jalan tersebut yang menghubungkan daerah Yogyakarta, Klaten, dan Solo. Sim-pang yang berdekatan yaitu Simpang Stasiun Brambanan dengan Simpang Taman Wisata Candi. Kondisi eksisting di kedua simpang tersebut menunjukkan bahwa belum adanya koordinasi sinyal sehingga mengurangi ken-yamanan pengemudi karena terhenti oleh sinyal merah pada simpang berikutnya.



Gambar 3. Lokasi penelitian

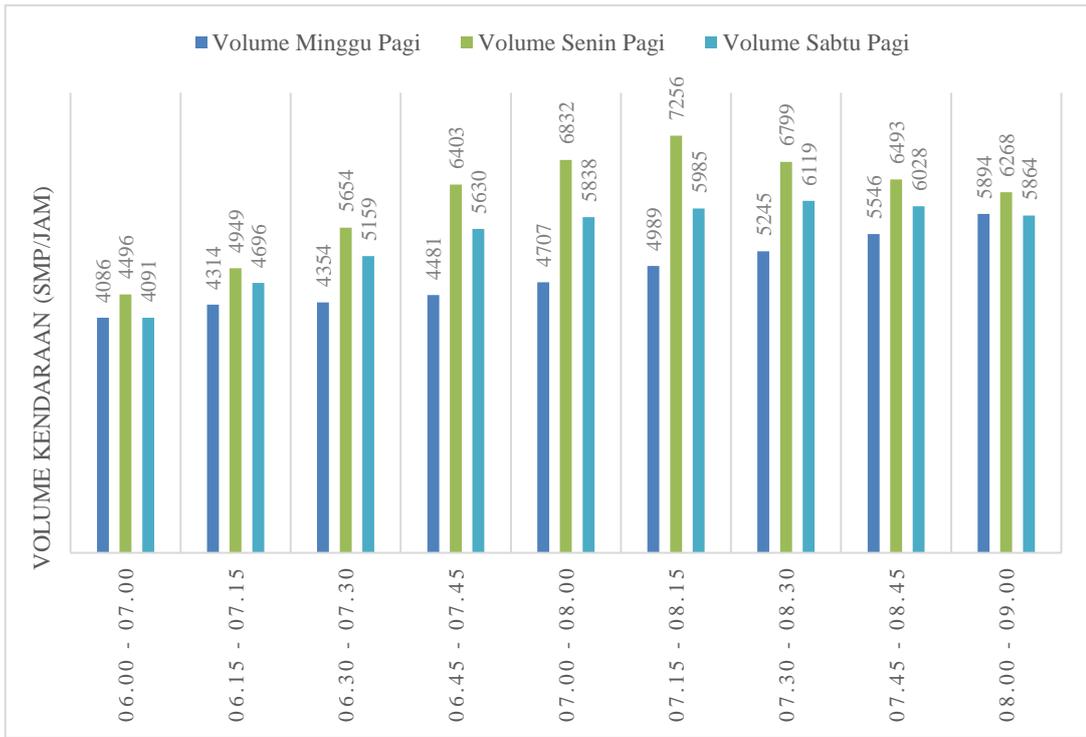
Simpang 1 merupakan Simpang Stasiun Brambanan, sedangkan Simpang 2 merupakan Simpang Taman Wisata Candi. Pemodelan koordinasi sinyal untuk kedua arah dil-akukan pada arus mayor (Jalan Yogyakarta-Solo) yaitu Simpang 1 ke Simpang 2 maupun sebaliknya karena merupakan arus yang ber kriteria volume kendaraan lebih banyak daripada pendekat lainnya (arus minor).

Data yang digunakan dalam analisis adalah data primer. Adapun data sekunder dalam penelitian ini hanyalah sebagai pendukung seperti data lokasi penelitian seperti pada Gambar 3 yang didapatkan dari Citra Satelit *Google Earth*. Data primer yang diperoleh langsung dari pengamatan di lapangan seperti, geometrik simpang, volume lalu lintas, kecepatan kendaraan, data fase, dan waktu siklus sinyal lalu lintas eksisting. Data kecepatan kendaraan didapatkan dengan menggunakan teknik sampel dari populasi ketika kondisi jam puncak lalu lintas, teknik sampel yang digunakan yaitu *sampling purposive* yang mana teknik menentukan sampel dengan pertimbangan tertentu sesuai dengan tujuan yang dikehendaki (Sugiyono, 2012).

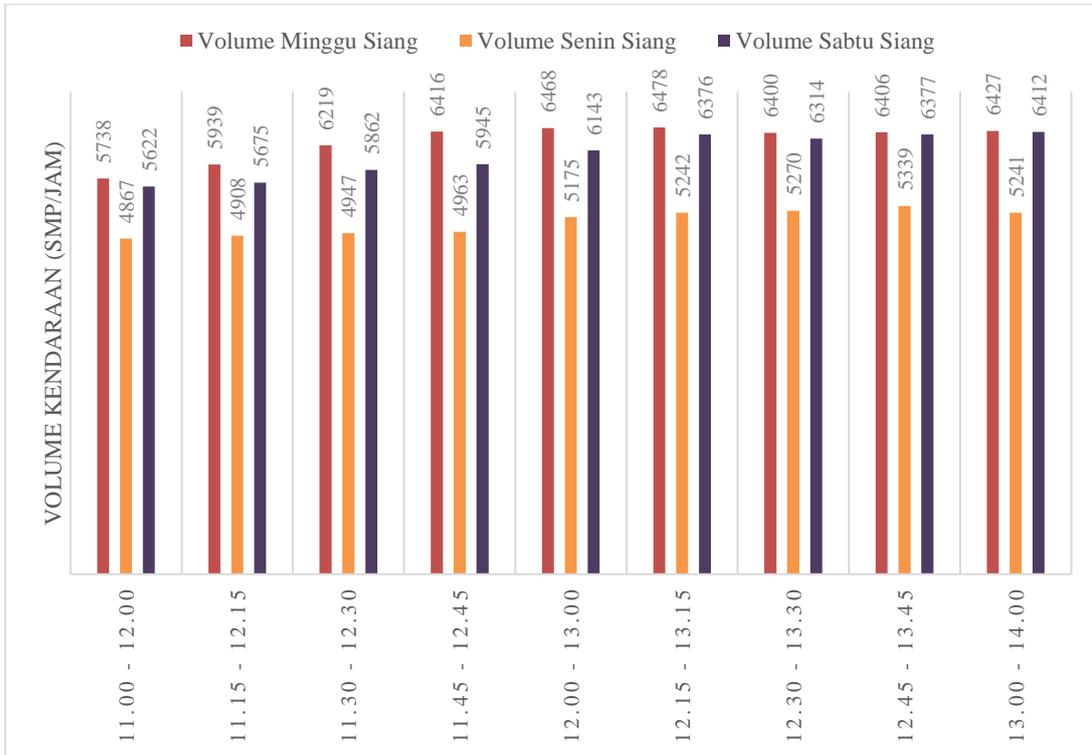
Data primer dikumpulkan dan direkapitulasi kemudian dilakukan analisis kondisi eksisting, sehingga didapatkan jam puncak volume, waktu siklus dan fasenya. Di antara kedua simpang bersinyal tersebut terdapat simpang tak bersinyal, akan tetapi tidak begitu berpengaruh terhadap koordinasi sinyal karena volume kendaraan yang keluar masuk sangat sedikit. Setelah itu dilakukan pembuatan pemodelan kondisi eksisting dengan program bantu Vissim. Analisis kondisi eksisting kemudian dapat disimpulkan bahwa belum adanya koordinasi sinyal antar kedua simpang. Perencanaan koordinasi sinyal dengan bantuan pemodelan Vissim dilakukan dengan penggambaran diagram koordinasi sinyal untuk kedua arah. Bersamaan dengan itu, penentuan waktu hijau optimum juga diupayakan dengan pendekatan (PUPR, 1997) agar sesuai dengan kondisi volume lalu lintas hasil dari rekapitulasi volume jam puncak.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

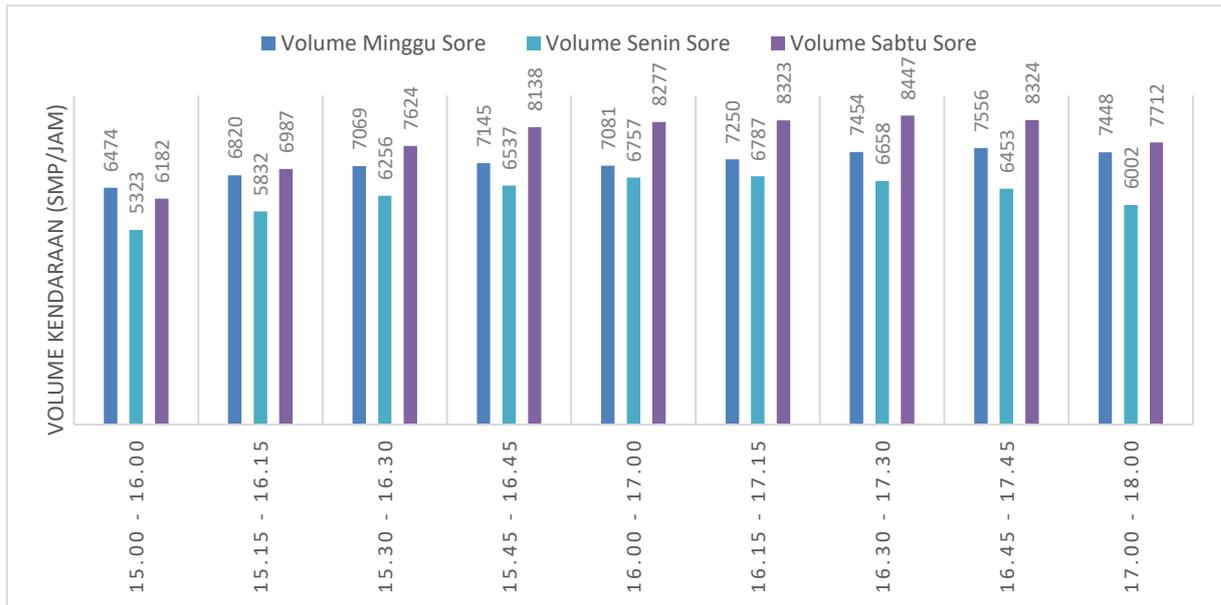
Survei dilakukan pada periode pagi, siang, dan sore hari. Periode pagi hari dilakukan pada pukul 06.00-09.00, siang hari pada pukul 11.00-14.00, dan sore hari pada pukul 15.00-18.00. Hasil rekapitulasi survei periode pagi, siang, dan sore hari disajikan pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 6.



Gambar 4. Grafik volume lalu lintas periode pagi



Gambar 5. Grafik volume lalu lintas periode siang



Gambar 6. Grafik volume lalu lintas periode sore

Terlihat grafik volume lalu lintas seperti pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 6, maka didapatkan kondisi jam puncak volume lalu lintas pada periode Sabtu sore hari pukul 16.30-17.30 dengan volume sebesar 8447 smp/jam. Volume puncak ini yang digunakan sebagai pemodelan koordinasi sinyal. Dalam memodelkan kondisi jam puncak kedalam *software* Vissim, diperlukan kalibrasi dan validasi agar hasil pemodelan mendekati kondisi di lapangan. Validasi tidak

memenuhi persyaratan apabila perbandingan data di lapangan dan di simulasi mengalami simpangan melebihi 15% (Roads & of NSW, 2009), kalibrasi dilakukan apabila ternyata hasil validasi belum memenuhi kriteria tersebut. Perubahan komponen *driving behaviour* Vissim sebagai upaya untuk mencapai validasi yang dipersyaratkan disajikan pada Tabel 1 dan hasil persentase sebelum dan sesudah kalibrasi pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 1. Parameter *driving behaviour* vissim

No.	Parameter yang Diubah	Komponen yang diubah	Nilai	
			Sebelum	Sesudah
1.		<i>Average Standstill Distance</i>	2 m	0,5 m
2.	<i>Car Following</i>	<i>Additive Part of Safety Distance</i>	2 m	0,8 m
3.		<i>Multiplicative Part of Safety Distance</i>	3 m	1 m
4.		<i>Desired Position at Free Flow</i>	<i>Middle of Lane</i>	<i>Any</i>
5.	<i>Lateral</i>	<i>Minimum Distance Standing</i>	1 m	0,5 m
6.		<i>Minimum Distance Driving</i>	1 m	0,8 m

Tabel 2. Hasil volume pemodelan vissim sebelum kalibrasi

Lokasi	Lengan	Volume Lapangan (kend/jam)	Volume Vissim (kend/jam)	Selisih (kend/jam)	Selisih (%)
Simpang 1	Barat	4788	2002	2786	58,19
	Utara	709	407	302	42,60
	Timur	2217	1284	933	42,08
	Selatan	640	220	420	65,63
Simpang 2	Barat	5045	2038	3007	59,60
	Utara	461	157	304	64,94
	Timur	2556	920	1636	64,01
	Keluar Gang	146	78	68	46,58
	Masuk Gang	191	130	61	31,94

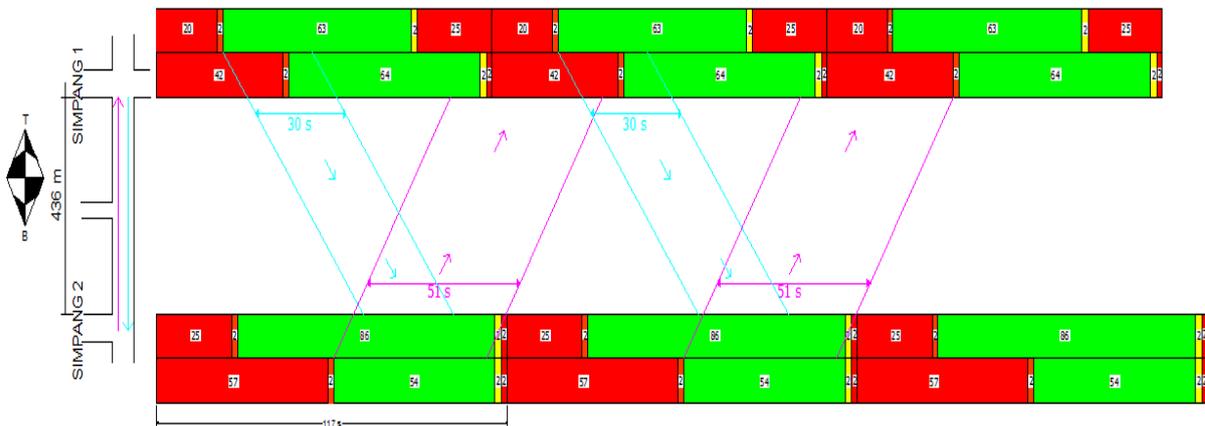
Tabel 3. Hasil volume pemodelan vissim sesudah kalibrasi

Lokasi	Lengan	Volume Lapangan (kend/jam)	Volume Vissim (kend/jam)	Selisih (kend/jam)	Selisih (%)
Simpang 1	Barat	4788	4102	686	14,33
	Utara	709	707	2	0,28
	Timur	2217	2281	64	2,89
	Selatan	640	668	28	4,38
Simpang 2	Barat	5045	5039	6	0,12
	Utara	461	457	4	0,87
	Timur	2556	2195	361	14,12
	Keluar Gang	146	147	1	0,68
	Masuk Gang	191	163	28	14,66

Terlihat perbandingan Tabel 2 dengan Tabel 3 sesudah dilakukan kalibrasi, kemudian setelah di validasi mendapatkan selisih persentase tidak melebihi persyaratan 15%. Dari hasil ini, maka dapat disimpulkan bahwa pemodelan Vissim dapat mewakili kondisi di lapangan. Selanjutnya adalah melakukan penggambaran diagram sinyal pada kondisi volume puncak disajikan di Gambar 7. Pada diagram sinyal tersebut menerangkan bahwa dari Simpang 2 (Sp. Taman Wisata Candi)

ke Simpang 1 (Sp. Stasiun Brambanan) maupun sebaliknya belum adanya koordinasi sinyal.

Hal ini diakibatkan perbedaan perbedaan waktu siklus, Simpang 1 (Sp. Stasiun Brambanan) dengan waktu siklus 112 detik sedangkan Simpang 2 (Sp. Taman Wisata Candi) dengan waktu siklus 117 detik. Dari diagram sinyal tersebut didapatkan *output* nilai kinerja kedua simpang (arus mayor) dari pemodelan Vissim yang disajikan pada Tabel 4.



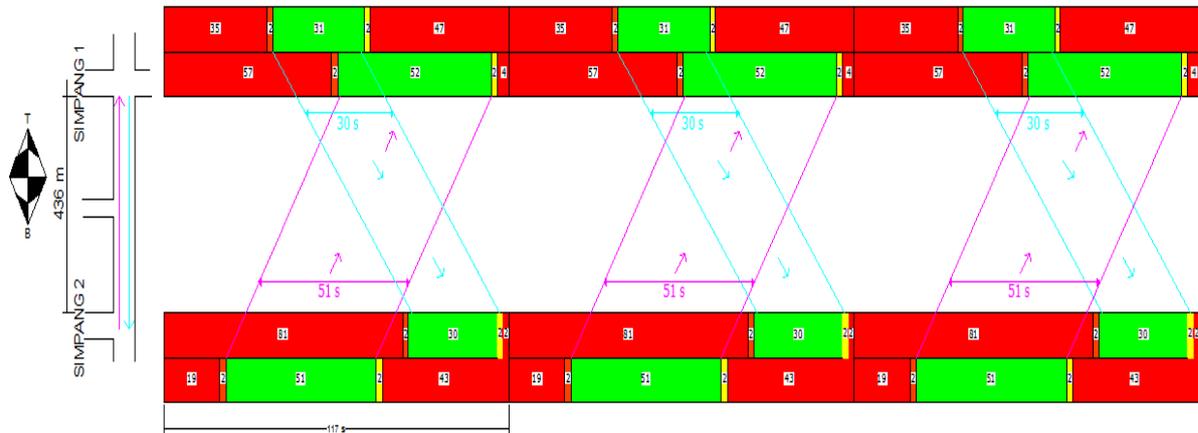
Gambar 7. Diagram sinyal kondisi jam puncak sebelum dikoordinasikan

Tabel 4. Kinerja arus mayor kedua simpang hasil evaluasi *vissim* sebelum adanya koordinasi sinyal kondisi jam puncak (*on peak*)

Rute	Avg. Delay (s)	Vehicle Travel Time (s)	Periode On Peak	
			Avg. Travel Speed (km/h)	Level of Services
Simpang 1 ke Simpang 2	19,55	34,03	46,12	E
Simpang 2 ke Simpang 1	31,96	57,24	27,42	E

Dari Tabel 4 menunjukkan kinerja jalan menunjukkan kategori E untuk kedua arahnya dilihat dari persyaratan teknis (Menteri Perhubungan, 2015). Untuk itu perlu dilakukan

penggambaran diagram koordinasi sinyal untuk kedua simpang tersebut seperti disajikan Gambar 8.



Gambar 8. Diagram sinyal kondisi jam puncak sesudah dikoordinasikan

Dari Gambar 8 terkait dengan diagram koordinasi sinyal, dilakukan dengan penggunaan waktu siklus yang sama untuk kedua simpang, yaitu menggunakan waktu siklus Simpang 2 (Sp. Taman Wisata Candi) sebesar 117 detik dan

mencari waktu hijau optimum dengan MKJI, 1997. Sehingga hasil dari kinerja kedua simpang setelah dilakukan koordinasi sinyal disajikan pada Tabel 5 berikut ini.

Tabel 5. Kinerja arus mayor kedua simpang hasil evaluasi *vissim* setelah dilakukan koordinasi sinyal kondisi jam puncak (*on peak*)

Rute	Avg. Delay (s)	Periode On Peak		
		Vehicle Travel Time (s)	Avg. Travel Speed (km/h)	Level of Services
Simpang 1 ke Simpang 2	15,57	31,73	49,47	E
Simpang 2 ke Simpang 1	17,65	50,99	30,78	E

V. KESIMPULAN

- Melakukan penyesuaian waktu siklus yang sama untuk kedua simpang yaitu 117 detik dapat dijadikan solusi perencanaan koordinasi sinyal.
- Berdasarkan kinerja arus mayor kedua simpang hasil koordinasi sinyal, nilai tundaan rata-rata Simpang 1 (Sp. Stasiun Brambanan) ke Simpang 2 (Sp. Taman Wisata Candi) mengalami penurunan sebesar 20,36%, kemudian arah sebaliknya mengalami penurunan nilai tundaan rata-rata sebesar 44,77%.

- Nilai waktu tempuh Simpang 1 (Sp. Stasiun Brambanan) ke Simpang 2 (Sp. Taman Wisata Candi) mengalami penurunan sebesar 8,82%, kemudian arah sebaliknya mengalami penurunan nilai waktu tempuh sebesar 5,14%.
- Meskipun tingkat pelayanan jalan masih dalam kategori E sesuai dengan persyaratan teknis (Menteri Perhubungan, 2015), namun pada perencanaan koordinasi sinyal ini terbukti bisa menjadi solusi karena kecepatan Simpang 1 (Sp. Stasiun Brambanan) ke Simpang 2 (Sp. Taman Wisata Candi) mengalami peningkatan sebesar 7,25% dan

arah sebaliknya juga mengalami peningkatan kecepatan sebesar 12,26%.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2001). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. American Association of State Highways and Transportation Officials. Washington DC.
- Abu-Lebdeh, G., & Benekohal, R. F. (1997). Development of Traffic Control and Queue Management Procedures for Oversaturated Arterials. *Transportation Research Record*, 1603(1), pp.119-127. <https://doi.org/10.3141/1603-16>
- Benekohal, R. F. (2021). *Signal Coordination*. pp.213-220. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102671-7.10310-0>
- Gal-Tzur, A., Mahalel, D., & Prashker, J. (1993). Signal Design for Congested Networks Based on Metering. *Transportation Research Record No. 1398, TRB 1993*, pp.111-118.
- Gazis, D. C. (1964). Optimum Control of a System of Oversaturated Intersections. *Operations Research*, 12(6), pp.815-831. <http://www.jstor.org/stable/168170>
- Gazis, D. C., & Potts, R. B. (1965). *The Oversaturated Intersection, Proc., 2nd Int. Symp. On the Theory of Road Traffic Flow, (J. Almond, editor), pp. 221-237, OECD, Paris, France*. pp.221-237.
- Girianna, M., & Benekohal, R. F. (2002). Dynamic Signal Coordination for Networks with Oversaturated Intersections. *Transportation Research Record*, 1811(1), 122-130. <https://doi.org/10.3141/1811-15>
- Hobbs, F. D. (1995). *Perencanaan dan teknik lalu lintas*. Gadjah Mada University Press.
- Lee, B., Crowley, K. W., & Pignataro, L. J. (1974). Better Use of Signals Under Oversaturated Flows. *Special Report - National Research Council, Transportation Research Board*, 15, pp.60-72.
- Lieberman, E. B., Chang, J., & Prassas, E. S. (2000). Formulation of a Real-time Control Policy for Oversaturated Arterial. *Transportation Research Record*, (1727), pp.77-78. <https://doi.org/https://doi.org/10.3141/1727-10>
- Menteri Perhubungan, R. I. (2015). *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 96 Tahun 2015 Tentang Pedoman Pelaksanaan Kegiatan Manajemen dan Rekayasa Lalu Lintas (No. 96)*.
- Michalopoulos, P. G., & Stephanopoulos, G. (1978). Optimal Control of Oversaturated Intersections: Theoretical and Practical Considerations. *Traffic Engineering and Control*, 19(5), pp.216-221.
- Miller, A. J. (1965). A Computer Control System for Traffic Networks. *Proceeding 2nd Int. Symposium Theory of Road Traffic Flow*, pp.200-220.
- Munawar, A. (2004). *Manajemen Lalu Lintas Perkotaan*. Beta Offset.
- Newell, G. F. (1989). *Theory of Highway Traffic Signals*. Institute of Transportation Studies, University of California. <https://books.google.co.id/books?id=tncsAQAAMA>
- Papacostas, C. S., & Prevedouros, P. D. (1993). *Transportation Engineering and Planning*. Prentice Hall. <https://books.google.co.id/books?id=GghsQgAACA>
- PTV Vissim. (2011). *VISSIM 5.30-05 User Manual*. 130-132.
- PUPR, K. (1997). Highway Capacity Manual Project (HCM). *Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI)*, 1(1), 564.
- Rathi, A. K. (1988). A control scheme for high traffic density sectors. *Transportation Research Part B: Methodological*, 22(2), pp.81-101. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0191-2615\(88\)90008-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0191-2615(88)90008-2)
- Roads, & of NSW, T. A. (2009). *Paramics microsimulation modelling - RTA handbook*. [Haymarket, N.S.W.]: RTA. <http://www.rta.nsw.gov.au>
- Sugiyono. (2012). *Metode penelitian bisnis*. Alfabeta.
- Taylor, M. A. P., Bonsall, P. W., & Young, W. (1996). *Understanding Traffic Systems*. Avebury Technical. <https://books.google.co.id/books?id=oERPAAMAAJ>
- Wolshon, B., & Taylor, W. C. (1999). Analysis of intersection delay under real-time adaptive signal control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 7(1), pp.53-72. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(99\)00011-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0968-090X(99)00011-X)
- Yagar, S., & Dion, F. (1996). Distributed Approach to Real-Time Control of Complex Signalized Networks. *Transportation Research Record*, 1554(1), pp.1-8. <https://doi.org/10.1177/0361198196155400101>
- Yulianyaha, R. W. (2021). *Pengaruh Pelanggaran Marka Jalan Terhadap Kinerja Simpang Bersinyal*. 19, 177-186. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.12962/j2579-891X.v19i2.8646>