

Sistem Pengatur Lalu-lintas Terjadwal dan Terkoordinasi untuk Persimpangan Gondomanan, Kantor Pos, dan Bintaran

Freddy Kurniawan¹, Denny Dermawan², Okto Dinaryanto³

*Prodi Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto^{1,2}
freddykurniawan@stta.ac.id*

Prodi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto³

Abstrak

Salah satu penyebab kemacetan lalu-lintas di Kota Yogyakarta adalah tidak efektifnya pewaktuan pengaturan lalu-lintas oleh alat pengatur lalu-lintas yang ada. Ketidakefektifan ini disebabkan pengatur lalu lalu-lintas tidak dapat mengikuti perubahan kepadatan kendaraan dan tidak adanya koordinasi pewaktuan antara beberapa pengatur berdekatan. Untuk mengatasi hal tersebut dibentuklah prototipe sistem pengatur lalu-lintas terjadwal dan terkoordinasi berbasis mikrokontroler ATmega128A. Sistem ini terdiri dari sebuah pengatur lalu-lintas master yang mewakili pengatur lalu-lintas di persimpangan Gondomanan, dan dua buah pengatur lokal yang mewakili pengatur di Kantor Pos dan Bintaran. Setiap pengatur lalu-lintas mempunyai basis data yang berisi jadwal pewaktuan isyarat lalu-lintas yang akan digunakan untuk pengaturan lalu-lintas. Pengatur master juga melakukan koordinasi atas kerja kedua pengatur lokal dengan cara mengirim data sinkronisasi secara nirkabel. Ketiga pengatur lalu-lintas telah dapat mengatur sesuai jadwal dan terkoordinasi. Prediksi pergerakan kendaraan telah dibuat menjadi diagram trayektori. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem ini dapat menurunkan waktu tempuh kendaraan hingga 40%.

Kata Kunci: mikrokontroler, pengatur lalu-lintas, terjadwal, terkoordinasi.

Abstract

One of the causes of traffic congestion in the city of Yogyakarta is the ineffectiveness of the current traffic-light timing. The ineffectiveness is caused by the traffic controllers are unable to accommodate the variety of traffic volume and no coordination among any adjacent traffic controllers. To overcome the problem, the prototype of pre-timed and coordinated traffic control system based on an ATmega128A microcontroller is presented. The system consists of a master traffic controller that represents the traffic controller at Gondomanan intersection and two local traffic controllers that represent traffic controllers at the Kantor Pos and Bintaran intersections. Each traffic controller has a database containing signal-timing plans that will be allocated to manage vehicle flows in the lane for the signalized intersection. In order to coordinate both local controllers, the master controller also sends synchronization data to them wirelessly. All controllers have been able to control the traffic flow according to their schedule and in coordinated manner. Prediction of the vehicle's movement has been made based to be a trajectory diagram. The result of the analysis showed that the system could reduce vehicle travel time up to 40%.

Keywords: microcontroller, traffic controller, pre-timed, coordinated.

1. Pendahuluan

Kemacetan lalu-lintas merupakan hal yang biasa terjadi di kota Yogyakarta. Hal ini terutama terjadi pada jam-jam sibuk, yaitu pada saat masyarakat pergi bekerja, siang hari, dan pada saat masyarakat pulang dari tempat pekerjaannya. Kemacetan biasanya berupa antrian panjang di persimpangan yang diatur oleh alat pengatur isyarat lalu-lintas (APILL). Sementara itu, pada tengah malam, beberapa kendaraan harus tetap menunggu di setiap pengatur lalu-lintas meskipun tidak ada kendaraan lain yang melewati persimpangan tersebut.

Terjadinya fenomena kemacetan pada jam-jam sibuk dan adanya waktu terbuang pada malam hari disebabkan tidak dapatnya pengatur lalu-lintas

menyesuaikan dengan volume kendaraan yang datang ke persimpangan tersebut.

Sudah banyak penelitian dilakukan untuk memperbaiki kinerja pengatur lalu-lintas sehingga dapat mengikuti variasi perubahan volume kendaraan. Mansur dkk. (2005) telah mencoba membuat perencanaan waktu hijau efektif untuk persimpangan di Mirota Kampus Yogyakarta. Askerzade (2010) telah membuat implementasi pemrosesan citra dan logika kabur untuk menghitung jumlah kendaraan yang datang, dan mengirim data tersebut ke mikrokontroler. Selanjutnya mikrokontroler inilah yang mengatur isyarat lalu-lintas. Hongjin Zhu (2013) telah membuat sistem pendeteksian kendaraan yang sedang bergerak menggunakan pendeteksian sisi

horisontal dan auto korelasi. Dengan metode ini dimungkinkan terdeteksinya dua kendaraan yang terekam kamera dalam posisi saling tumpang tindih. Meskipun algoritma pendeteksian kendaraan telah dikembangkan, namun tidak ada jaminan hasil pendeteksian kendaraan selalu akurat. Kesalahan tersebut dapat mengakibatkan kesalahan pengaturan lalu-lintas.

Salah satu cara untuk mengantisipasi hal tersebut adalah sistem pengatur lalu-lintas harus mempunyai jadwal pewaktuan pengaturan lalu-lintas. Jadwal ini akan digunakan jika data dari sistem pendeteksi kendaraan dinyatakan tidak sah (*invalid*). Jadwal pewaktuan ini didapat sebagai hasil analisis dari data survei.

Salah satu penyebab lain dari kemacetan lalu-lintas adalah tidak adanya koordinasi antara beberapa pengatur lalu-lintas. Hal ini terutama terjadi pada beberapa pengatur lalu-lintas yang berdekatan. Salah satu kasusnya adalah di Jl. Senopati dan Jl. Sultan Agung, yaitu di pangatur lalu-lintas di persimpangan Gondomanan, Kantor Pos, dan Bintaran. Akibatnya, dari arah barat banyak kendaraan yang sebelumnya telah berhenti di lampu merah di persimpangan Kantor Pos, harus berhenti lagi di lampu merah di Gondomanan, dan kembali berhenti lagi di lampu merah di Bintaran, demikian pula sebaliknya dari arah timur.

Untuk mengatasi hal tersebut, harus dibuat pengatur isyarat lalu-lintas terkoordinasi. Dengan sistem ini, kerja beberapa pengatur lalu-lintas dapat dikoordinasi sehingga pewaktuan semua pengatur lalu-lintas dapat sinkron. Hal ini bertujuan agar sebagian besar kendaraan yang mendapat isyarat hijau di suatu pengatur lalu-lintas akan kembali mendapat isyarat hijau di pengatur lalu-lintas berikutnya.

Penelitian untuk membentuk sistem pengatur lalu-lintas terkoordinasi telah banyak dilakukan. Shamshirband (2012) telah membuat model koordinasi antara beberapa pengatur lalu-lintas dengan menggunakan jaringan syaraf sebagaimana pada teori permainan. Primantary dan Jatmiko (2010) juga telah membuat model arsitektur desentralisasi untuk membentuk pengatur lalu-lintas pada persimpangan yang tidak terstruktur. Dan pada tahun 2014, Kurniawan juga telah membuat prototipe sistem pengatur isyarat lalu-lintas terkoordinasi untuk simpang empat Gondomanan dan Bintaran (Kurniawan, 2014).

Sistem pengatur lalu-lintas modern di negara maju pada umumnya berbasis prosesor 32 bit dan dikoordinasi oleh sistem komputer yang bertindak sebagai server (FHWA, 2008). Sementara itu, pengatur lalu-lintas di Indonesia saat ini pada umumnya berbasis mikrokontroler MCS-51. Dikarenakan keterbatasan kecepatan CPU dan memori mikrokontroler tersebut, sangat kecil kemungkinan dibentuk sistem pengatur lalu-lintas

terjadwal dan terkoordinasi ini menggunakan mikrokontroler tersebut.

Pada penelitian ini, dibentuklah sistem pengatur lalu-lintas terjadwal dan terkoordinasi berbasis mikrokontroler AVR ATmega128A. Dengan menggunakan jadwal pewaktuan yang disimpan di EEPROM internal mikrokontroler tersebut, diharapkan sistem ini dapat mengatur lalu-lintas secara terjadwal mengikuti volume kendaraan harian dan terkoordinasi. Sistem ini diharapkan dapat secara efektif menurunkan kemacetan kendaraan yang sering terjadi.

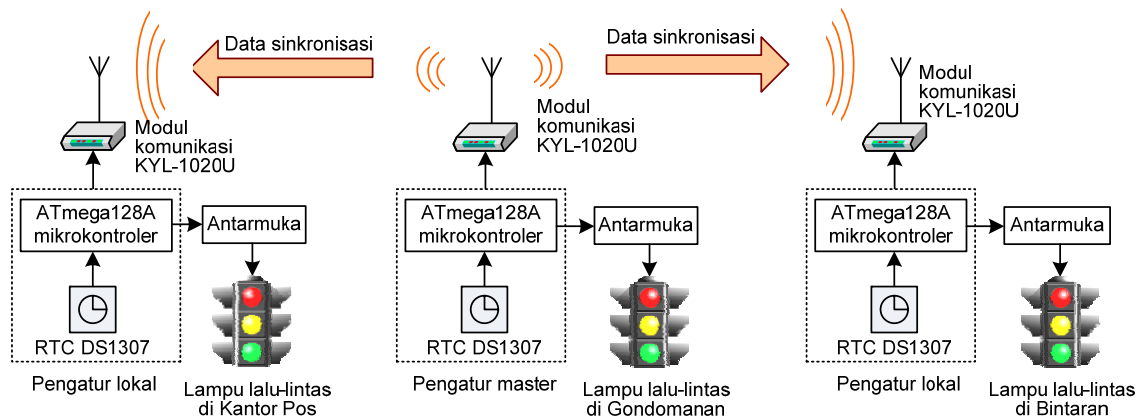
Pada tulisan ini akan dipaparkan hasil penelitian berupa prototipe sistem pengatur lalu-lintas terjadwal dan terkoordinasi berbasis mikrokontroler AVR ATmega128A. Tulisan dibuat dengan urutan: metode penelitian yang meliputi deskripsi perangkat keras dan perangkat lunak, jadwal pewaktuan dan metode sinkronisasi; hasil dan pembahasan yang meliputi diagram trayektori kendaraan, kinerja sistem dan pengembangan pada penelitian selanjutnya; dan kesimpulan.

2. Metode Penelitian

Studi kasus dilakukan untuk persimpangan Gondomanan, Kantor Pos dan Bintaran di Kota Yogyakarta. Sistem terdiri dari tiga buah prototipe pengatur lalu-lintas untuk ketiga persimpangan tersebut sebagaimana Gambar 1. Untuk melakukan koordinasi, pengatur lalu-lintas di Gondomanan bertindak sebagai pengatur master karena persimpangan ini merupakan persimpangan tersibuk di antara persimpangan yang lain; sedangkan pengatur yang lain bertindak sebagai pengatur lokal. Sistem ini menggunakan pendekatan sistem terdistribusi. Setiap pengatur lalu-lintas lokal dapat dioperasikan secara mandiri (*stand-alone*) maupun terkoordinasi. Setiap pengatur lalu-lintas mempunyai komponen utama mikrokontroler ATmega128A, RTC DS1307 sebagai pembangkit waktu dan modul komunikasi nirkabel KYL-1020U.

Mikrokontroler AVR ATmega128A mempunyai memori flash 128 kB yang dapat digunakan untuk menyimpan program pengaturan lalu-lintas beserta subprogram sinkronisasi, SRAM 4 kB yang dapat digunakan untuk menyimpan variabel program sementara, dan EEPROM 4 kB yang dapat digunakan untuk menyimpan basis data yang berisi jadwal pewaktuan pengaturan lalu-lintas.

RTC DS1307 digunakan untuk pembangkit waktu (*clock generator*) presisi yang digunakan untuk data pewaktuan setiap pengatur lalu-lintas. Sedangkan modul komunikasi KYL-1020U digunakan untuk komunikasi data dari pengatur master ke pengatur lokal. Modul ini juga digunakan untuk penyalinan basis data secara nirkabel dari terminal operator ke setiap pengatur lalu-lintas.



Gambar 1. Blok diagram sistem

2.1 Jadwal Pengaturan Lalu-lintas

Jadwal pewaktuan pengaturan lalu-lintas untuk setiap persimpangan dimasukkan ke EEPROM setiap mikrokontroler di setiap pengatur. Jadwal yang berlaku untuk waktu 7×24 jam tersebut berisi waktu dimulai sebuah slot waktu ($hh_i:mm_i$), waktu hijau setiap fase ($g_{j,i}$), waktu kuning (Y_i), dan waktu pengosongan (R_i) sebagaimana Gambar 2.

Hari kerja: Senin - Jumat									
hh ₁	mm ₁	g _{2,1}	g _{3,1}	g _{4,1}	θ ₁	p ₁			
hh ₂	mm ₂	g _{2,2}	g _{3,2}	g _{4,2}	θ ₂	p ₂			
hh ₃	mm ₃	g _{2,3}	g _{3,3}	g _{4,3}	θ ₃	p ₃			
hh ₄	mm ₄	g _{2,4}	g _{3,4}	g _{4,4}	θ ₄	p ₄			
hh ₅	mm ₅	g _{2,5}	g _{3,5}	g _{4,5}	θ ₅	p ₅			
hh ₆	mm ₆	g _{2,6}	g _{3,6}	g _{4,6}	θ ₆	p ₆			
hh ₇	mm ₇	g _{2,7}	g _{3,7}	g _{4,7}	θ ₇	p ₇			
hh ₈	mm ₈	g _{2,8}	g _{3,8}	g _{4,8}	θ ₈	p ₈			
hh ₉	mm ₉	g _{2,9}	g _{3,9}	g _{4,9}	θ ₉	p ₉			
hh ₁₀	mm ₁₀	g _{2,10}	g _{3,10}	g _{4,10}	θ ₁₀	p ₁₀			

Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
R ₁	R ₂	R ₃	R ₄

Gambar 2 Jadwal pengaturan lalu-lintas

Satu hari dibagi menjadi sepuluh slot waktu; sementara itu dalam satu minggu disediakan tiga jadwal yang dapat digunakan untuk hari-hari kerja (Senin-Jumat), Sabtu dan Minggu. Parameter $g_{j,i}$ merupakan waktu hijau untuk slot waktu j fase i . Nilai $g_{j,i}$ dapat berkisar dari 8 hingga 60 detik atau nol. Jika nilai $g_{j,i} = 0$ untuk $i = 1-4$, maka pada slot waktu j tersebut pengatur lalu-lintas tidak akan mengatur lalu-lintas dan hanya memberikan isyarat kuning berkedip. Nilai Y_i merupakan nilai durasi waktu kuning berlangsung; sedangkan nilai R_i merupakan nilai durasi waktu jeda antara diakhirinya isyarat kuning fase i dengan dimulainya isyarat merah

fase berikutnya. Keduanya bernilai tetap untuk seluruh slot waktu. Nilai siklus pada slot waktu j (C_j) merupakan penjumlahan dari nilai waktu hijau ditambah waktu kuning dan pengosongan untuk semua fase sesuai Persamaan (1).

$$C_j = \sum_{i=1}^4 g_{j,i} + Y_i + R_i \tag{1}$$

Menurut dokumen FHWA, semakin tinggi volume kendaraan, maka nilai siklus juga mestinya semakin tinggi (FHWA, 2008). Nilai C_j maksimal pada sistem ini adalah 255 detik. Agar kedua pengatur lokal dapat bekerja secara sinkron, dalam slot waktu yang sama pengatur master dan lokal dapat mempunyai waktu hijau berbeda, namun harus mempunyai siklus yang sama (FHWA, 2008).

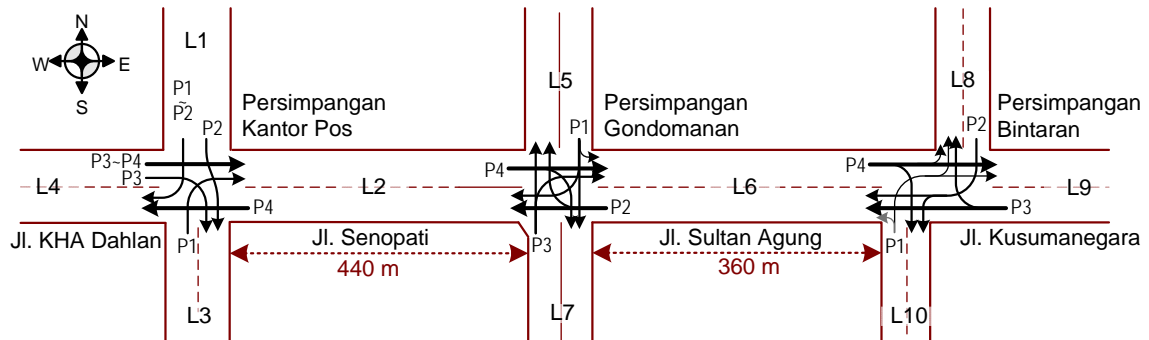
Jadwal pengatur lokal berisi tambahan data offset dan koefisien adaptasi. Offset θ_j adalah perbedaan antara waktu dimulainya isyarat hijau fase 1 di pengatur master dengan waktu dimulainya isyarat hijau fase 1 di pengatur lokal pada slot waktu j . Sedangkan koefisien adaptasi p_j adalah nilai persentasi perubahan maksimal atas total waktu hijau semua fase pengatur lokal pada slot waktu j untuk melakukan sinkronisasi pewaktuan pengatur lokal terhadap pengatur master. Offset dapat bernilai dari nol hingga C_j . Sedangkan koefisien adaptasi dapat bernilai 0 hingga 99. Nilai $p_j = 0$ berarti pada slot waktu j pengatur local tidak disinkronkan dengan pengatur master.

Nilai waktu kuning (Y_i) dan pengosongan (R_i) untuk fase i bernilai tetap untuk seluruh slot waktu. Nilai tersebut dibatasi untuk kisaran 0 hingga 15 detik. Seluruh nilai parameter dalam jadwal menggunakan format bilangan integer 8 bit; dan seluruh perhitungan yang dilakukan pada sistem ini juga menggunakan operasi matematis atas bilangan bulat 8 dan 16 bit (*integer operation*).

Nilai waktu hijau, kuning, pengosongan, dan offset dimasukkan ke EEPROM mikrokontroler setiap pengatur lalu-lintas melalui sebuah perangkat lunak Traffic Management Centre. Perangkat tersebut dibuat

dalam bahasa pemrograman Pascal menggunakan Borland Delphi 7. Nilai-nilai tersebut merupakan nilai efektif yang didapat dari hasil survei di lapangan.

Nilai efektif waktu hijau suatu fase merupakan nilai durasi hijau pada fase tersebut yang tepat membuat semua kendaraan dapat berjalan karena mendapat isyarat hijau. Sementara itu nilai offset setiap pengatur lokal ditentukan dari diagram trayektori efektif kendaraan pada jam-jam tertentu.



Gambar 3. Urutan fase pada ketiga pengatur lalu-lintas

Titik referensi untuk sinkronisasi adalah di akhir fase 4. Untuk mewujudkan sinkronisasi, di akhir fase 4 ini, pengatur master mengirim data sinkronisasi kepada semua pengatur lokal secara nirkabel. Pengatur lokal menerima data ini dan mencatat waktu saat data diterima sebagai t_M . Selanjutnya di akhir fase 4 siklus pengatur lokal t_L , setiap pengatur lokal mengubah waktu hijau untuk satu siklus berikutnya agar nilai offset berikutnya (θ) yaitu selisih antara t_M dan t_L akan sama dengan nilai offset yang ada di slot waktu saat itu (θ).

Dari gambar 3 tersebut terlihat bahwa fase 4 pengatur lalu-lintas di Kantor Pos (P4.KP) dapat disinkronkan dengan fase 4 pengatur di Gondomanan (P4.G) sehingga kendaraan yang telah mendapat isyarat hijau di fase 4 pengatur di Kantor Pos langsung mendapat isyarat hijau di fase 4 pengatur di Gondomanan.

Untuk mencapai kondisi sinkron, P4.G harus berlangsung sesudah P4.KP sebagaimana Persamaan (2).

$$t_{P4.G} = t_{P4.KP} + t_{KP \rightarrow G} \quad (2)$$

dengan $t_{KP \rightarrow G}$ adalah waktu tempuh kendaraan dari persimpangan Kantor Pos ke Gondomanan.

Dikarenakan pengatur lalu-lintas di persimpangan Gondomanan bertindak master, maka pewaktuan pengatur lalu-lintas di Kantor Pos-lah yang harus mengikuti pewaktuan pengatur di Gondomanan. Persamaan (2) diubah menjadi Persamaan (3) berikut.

2.2 Koordinasi Pengatur Lalu-lintas

Setiap pengatur lalu-lintas mempunyai 4 fase. Urutan fase mengikuti Gambar 3. Urutan fase untuk pengatur lalu-lintas di Gondomanan mengikuti arah jarum jam, sedangkan urutan fase di Kantor Pos mengikuti urutan fase yang digunakan saat ini. Sedangkan urutan fase di pengatur lalu-lintas Bintaran mengalami perubahan agar pewaktuan di pengatur lalu-lintas tersebut dapat disinkronkan dengan pewaktuan pengatur lalu-lintas di Gondomanan.

$$t_{P4.KP} = t_{P4.G} - t_{KP \rightarrow G} \quad (3)$$

Persamaan (3) berarti $t_{P4.KP}$ berlangsung $t_{KP \rightarrow G}$ detik sebelum $t_{P4.G}$. Persamaan tersebut tidak dapat direalisasikan dalam pemrograman karena $t_{P4.KP}$ baru dapat ditentukan pada saat $t_{P4.G}$. Untuk itu, data sinkronisasi yang dikirim pengatur master saat ini digunakan untuk mensinkronkan pewaktuan pada siklus berikutnya. Berlangsungnya fase 4 di Kantor Pos mengikuti persamaan (4)

$$t_{P4.KP} = t_{P4.G} + C_j - t_{KP \rightarrow G} \quad (4)$$

Ketertinggalan P4.KP atas P4.G merupakan offset pewaktuan pengatur lalu-lintas lokal 1 di Kantor Pos atas pengatur master di Gondomanan. Nilai offset (θ) mengikuti Persamaan (5).

$$\theta = C_j - t_{KP \rightarrow G} \quad (5)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasar analisis atas data hasil survei, aliran kendaraan di persimpangan Kantor Pos, Gondomanan, dan Bintaran mempunyai pola tertentu. Dengan jarak antara persimpangan Gondomanan dan Bintaran sekitar 360 meter, kendaraan yang melalui ruas jalan tersebut akan cenderung mempunyai pola. Sementara itu, jarak antara persimpangan Kantor Pos dan Gondomanan sekitar 450 meter. Kendaraan yang melalui ruas tersebut juga mempunyai pola. Namun pola kendaraan di ruas jalan tersebut kadang agak kabur karena terganggu oleh aktifitas penyeberangan jalan di ruas jalan tersebut, terutama penyeberang jalan di depan Taman Pintar.

Berdasar hasil survei kedatangan kendaraan pada ketiga persimpangan mengikuti pola sebagai berikut.

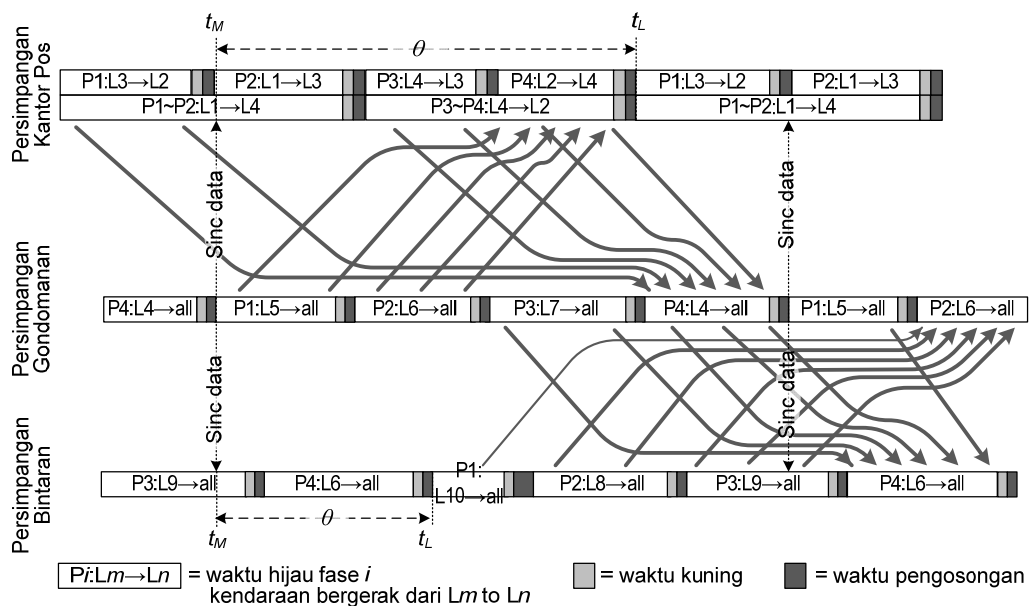
1. Kendaraan yang datang ke mulut barat persimpangan Gondomanan sebagian besar berasal dari isyarat hijau fase 3 (P3) dan sebagian lain dari fase 1 (P1) di persimpangan Kantor Pos. Kendaraan ini akan mendapat isyarat hijau fase 4 (P4) di persimpangan Gondomanan. Kendaraan dari L1 tidak membentuk pola dikarenakan terdapat rambu ke kiri jalan terus.
2. Kendaraan yang datang ke mulut timur persimpangan Kantor Pos sebagian besar berasal dari isyarat hijau fase 2 (P2) dan sebagian lagi dari fase 1 (P1) di persimpangan Gondomanan. Kendaraan ini akan mendapat isyarat hijau fase 4 (P4) di persimpangan Kantor Pos. Kendaraan dari L7 tidak membentuk pola dikarenakan terdapat rambu ke kiri jalan terus.
3. Kendaraan yang datang ke mulut timur persimpangan Gondomanan sebagian besar

berasal dari isyarat hijau fase 3 (P3) dan sebagian lagi dari fase 2 (P2) di persimpangan Bintaran. Kendaraan ini akan mendapat isyarat hijau fase 2 (P2) di persimpangan Gondomanan. Kendaraan dari L10 diabaikan dikarenakan sangat sedikit.

4. Kendaraan yang datang ke mulut barat persimpangan Bintaran sebagian besar berasal dari isyarat hijau fase 4 (P4), sebagian lagi dari fase 3 (P3), dan sebagian kecil dari fase 1 (P1) di persimpangan Gondomanan. Kendaraan ini akan mendapat isyarat hijau fase 4 (P4) di persimpangan Bintaran.

3.1 Diagram Trayektori Kendaraan

Adanya pola kendaraan yang melintas pada kedua ruas jalan tersebut mengakibatkan adanya pola kedatangan kendaraan di mulut barat dan timur persimpangan Kantor Pos, Gondomanan dan Bintaran. Dari pola kedatangan tersebut dapat disusun diagram trayektori kendaraan yang melintas di antara ketiga persimpangan tersebut. Diagram trayektori pada Gambar 4 mengilustrasikan perjalanan kendaraan pada jam-jam sibuk.



Gambar 4. Diagram trayektori kendaraan pada jam-jam sibuk

Di Jalan Senopati, khususnya pada ruas jalan antara persimpangan Kantor Pos dan Gondomanan, kendaraan dapat melaju dengan kecepatan rata-rata 40 ~ 45 km/jam. Pada jam-jam sibuk, kendaraan dapat melaju dengan kecepatan rata-rata 40 km/jam dengan waktu tempuh sekitar 40 detik; sementara itu pada jam-jam tidak sibuk, kendaraan dapat melaju dengan kecepatan rata-rata 45 km/jam dengan waktu tempuh sekitar 35 detik.

Sementara itu di Jalan Sultan Agung, khususnya pada ruas jalan antara persimpangan Gondomanan dan Bintaran, kendaraan dapat melaju dengan kecepatan rata-rata 40 ~ 50

km/jam. Pada jam-jam sibuk, kendaraan dapat melaju dengan kecepatan rata-rata 40 km/jam dengan waktu tempuh sekitar 32 detik; sementara itu pada jam-jam tidak sibuk, kendaraan dapat melaju dengan kecepatan rata-rata 50 km/jam dengan waktu tempuh sekitar 26 detik.

3.2 Jadwal Pengaturan Lalu-lintas

Berdasar hasil analisis atas hasil survei terhadap kondisi lalu-lintas, persimpangan Gondomanan mempunyai volume kendaraan paling tinggi di antara kedua persimpangan yang lain. Pengatur lalu-lintas di Gondomanan mestinya mempunyai siklus pengaturan paling tinggi. Namun dikarenakan agar dapat bekerja

secara sinkron semua pengatur harus mempunyai nilai siklus sama, maka kedua pengatur lokal dibuat mempunyai siklus yang sama dengan master.

Nilai waktu hijau (g), kuning (Y), pengosongan (R), dan juga nilai offset (θ) dan koefisien adaptasi (p) ketiga pengatur lalu-lintas yang berlaku pada hari-hari kerja dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1: Jadwal pewaktuan pengatur lalu-lintas untuk hari kerja

Slot waktu	Waktu mulai	Pengatur master (Gondomanan)				Pengatur Lokal 1 (Kantor Pos)					Pengatur Lokal 2 (Bintaran)						
		g_1	g_2	g_3	g_4	g_1	g_2	g_3	g_4	θ	p	g_1	g_2	g_3	g_4	θ	p
1	00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	04:00	10	10	11	10	10	9	10	10	0	0	8	10	10	10	0	0
3	06:00	13	18	27	20	17	14	25	20	74	20	10	16	25	24	50	20
4	06:30	15	20	35	24	26	18	24	24	74	20	13	19	30	29	50	20
5	07:10	17	21	32	24	24	20	24	24	100	20	13	20	29	29	53	20
6	08:00	21	22	30	24	26	21	23	25	100	20	11	20	30	33	53	20
7	10:00	28	23	32	25	27	25	26	28	100	20	11	28	31	35	55	20
8	15:30	30	23	30	25	25	27	26	28	100	20	11	28	31	35	55	20
9	18:00	25	23	26	25	22	24	24	27	100	20	11	26	28	31	55	20
10	23:00	15	15	15	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Waktu kuning		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4			Y_1	Y_2	Y_3	Y_4		
		3	3	3	3	3	3	3	3			3	3	3	3		
Waktu pengosongan		R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4			R_1	R_2	R_3	R_4		
		5	5	5	5	5	6	5	5			7	5	5	5		

Pengatur master mengatur lalu-lintas mulai pukul 04:00 hingga 23:59; sedangkan pengatur lokal mengatur mulai pukul 04:00 hingga 22:59. Pengatur lokal 1 dan 2 bekerja secara sinkron mulai slot waktu 3 (pukul 06:00) hingga akhir slot waktu 9 (pukul 22:59). Untuk setiap pengatur lalu-lintas, setiap slot waktu dengan nomor sama dapat mempunyai waktu hijau berbeda, namun harus mempunyai siklus sama. Pada slot waktu 7 dan 8, semua pengatur mempunyai siklus $C_{7,8} = 140$ detik. Dengan waktu tempuh dari persimpangan Kantor Pos ke Bintaran (P2.G) 40 detik, maka sesuai Persamaan (5), offset pewaktuan pengatur lalu-lintas di Kantor Pos atas pewaktuan pengatur di Gondomanan adalah $\theta = 100$ detik.

Pada kondisi ini fase 1 pengatur lokal ini tertinggal 100 detik terhadap fase 1 pengatur master. Jika kondisi ini belum tercapai, maka algoritma sinkronisasi di pengatur lokal akan mengubah waktu hijau (g_i) beberapa fase untuk satu siklus berikutnya agar dicapai kondisi sinkron yaitu $\theta = 100$ detik. Jika kondisi sinkron telah tercapai, maka kondisi ini akan bertahan hingga berubahnya nilai θ yaitu dimulainya slot waktu 7.

Sementara itu pada slot waktu 3, kondisi lalu-lintas masih belum terlalu ramai, kendaraan dapat melaju dengan rata-rata 45 km/jam dengan waktu tempuh sekitar 35 detik. Siklus pengaturan saat itu $C_3 = 110$ detik. Sesuai Persamaan (5) offset pewaktuan pengatur di kantor Pos adalah $\theta = 74$ detik.

Dengan cara yang serupa, ditentukanlah offset pewaktuan pengatur lalu-lintas di Bintaran. Sesuai diagram trayektori pada Gambar 4,

kendaraan harus menunggu beberapa detik untuk mendapatkan isyarat hijau di P2.G dan P4.B.

3.3 Waktu Tunggu Kendaraan pada Jam-jam Sibuk

Antrian panjang kendaraan biasanya terjadi pada jam-jam sibuk. Slot waktu 7 merupakan salah satu waktu terjadi kemacetan. Kadang beberapa kendaraan di mulut timur persimpangan Gondomanan dan mulut barat persimpangan Bintaran harus menunggu isyarat hijau hingga dua siklus.

Jika digunakan pengatur tidak terkoordinasi, maka kedatangan kendaraan merupakan fungsi acak. Kendaraan dapat datang kapan saja di suatu mulut persimpangan. Di asumsikan waktu hijau dapat membuat tepat semua kendaraan dalam antrian dapat berjalan. Waktu tunggu kendaraan untuk mendapat isyarat hijau pada fase i dapat menjadi minimum ($\theta_{i, \min}$) yaitu bernilai nol jika kendaraan tersebut datang pada saat tepat pengatur mulai memberikan isyarat hijau. Namun jika kendaraan datang pada saat tepat pengatur mulai memberikan isyarat merah, maka waktu tunggu kendaraan tersebut menjadi maksimal. Waktu tunggu maksimum pada fase i mengikuti dapat dihitung dengan mengurangi waktu siklus dengan waktu hijau fase tersebut sebagaimana Persamaan (6).

$$\theta_{i, \max} = C - g_i \quad (6)$$

Slot waktu 7 dan 8 merupakan jam-jam sibuk. Siklus pengaturan lalu-lintas ketiga persimpangan pada slot waktu tersebut bernilai paling tinggi di antara waktu slot yang lain, $C_i = 140$ detik. Berdasar jadwal pengaturan ketiga pengatur lalu-lintas pada Tabel 1, dibuatlah perkiraan waktu tempuh kendaraan yang melintas di ketiga persimpangan pada slot waktu 7 sebagaimana Tabel 2(a).

Baris kedua pada tabel tersebut memperlihatkan rute kendaraan yang terjadi setelah kendaraan mendapat isyarat hijau fase 1 pengatur di Gondomanan (P1.G) dan menuju ke persimpangan Bintaran. Kendaraan tersebut mendapat isyarat hijau fase 4 pengatur di Bintaran (P4.B) dengan waktu tunggu sekitar 0

detik (langsung mendapat isyarat hijau) hingga 102 detik (kendaraan datang pada saat isyarat merah dimulai). Dengan waktu tempuh kendaraan dari persimpangan Gondomanan ke Bintaran sekitar 32 detik, maka waktu tempuh kendaraan dari mendapat isyarat hijau di P1.G hingga keluar dari persimpangan Bintaran adalah sekitar 32~134 detik.

Tabel 2(a): Perkiraan waktu tempuh kendaraan dengan pengatur lalu-lintas biasa

Rute 1	Waktu tempuh	Waktu tunggu	Rute 2	Waktu tempuh	Waktu tunggu	Waktu tunggu rute 1~2	Waktu tempuh rute 1~2
-	-	-	P1.G → P4.B	32	0~102	0~102	32~134
-	-	-	P3.G → P4.B	32	0~102	0~102	32~134
P1.KP → P4.G	40	0~112	P4.G → P4.B	32	0~102	0~214	72~286
P3.KP → P4.G	40	0~112	P4.G → P4.B	32	0~102	0~214	72~286
P4.KP → P4.G	40	0~112	P4.G → P4.B	32	0~102	0~214	72~286
-	-	-	P1.G → P4.KP	40	0~109	0~109	40~109
P1.B → P2.G	32	0~112	P2.G → P4.KP	40	0~109	0~221	72~293
P2.B → P2.G	32	0~112	P2.G → P4.KP	40	0~109	0~221	72~293
P3.B → P2.G	32	0~112	P2.G → P4.KP	40	0~109	0~221	72~293

Tabel 2(b): Perkiraan waktu tempuh kendaraan dengan pengatur lalu-lintas terkoordinasi

Rute 1	Waktu tempuh	Waktu tunggu	Rute 2	Waktu tempuh	Waktu tunggu	Waktu tunggu rute 1~2	Waktu tempuh rute 1~2
-	-	-	P1.G → P4.B	32	0~10	0~10	32~42
-	-	-	P3.G → P4.B	32	25~50	25~50	57~87
P1.KP → P4.G	40	85~105	P4.G → P4.B	32	10~45	95~150	167~222
P3.KP → P4.G	40	20~45	P4.G → P4.B	32	10~45	30~90	102~162
P4.KP → P4.G	40	0~10	P4.G → P4.B	32	10~45	10~55	82~127
-	-	-	P1.G → P4.KP	40	10~30	10~30	50~70
P1.B → P2.G	32	75~85	P2.G → P4.KP	40	10~25	85~110	157~182
P2.B → P2.G	32	40~65	P2.G → P4.KP	40	0~5	40~70	112~142
P3.B → P2.G	32	15~35	P2.G → P4.KP	40	0~5	15~35	87~107

Keterangan: KP = Kantor Pos G = Gondomanan B = Bintaran

Ketiga persimpangan didominasi oleh kendaraan yang melintas dari mulut barat persimpangan Kantor Pos (L4) menuju Gondomanan (L2) dan Bintaran (L6-L9), dan sebaliknya (L9-L6-L2-L4). Khusus untuk persimpangan Gondomanan, kendaraan dari mulut selatan persimpangan tersebut dan juga cukup mendominasi.

Baris kelima pada Tabel 2(a) memperlihatkan perkiraan waktu tempuh kendaraan dengan rute L4-L2-L6-L9. Kendaraan-kendaraan tersebut mendapat isyarat hijau pada fase 3 pengatur lalu-lintas Kantor Pos (P3.KP) dan bergerak ke Gondomanan dengan waktu tempuh 40 detik. Kemudian kendaraan tersebut mendapat isyarat hijau di fase 4 pengatur Gondomanan (P4.G) dengan waktu tunggu 0~112 detik. Selanjutnya kendaraan-kendaraan tersebut bergerak ke persimpangan Bintaran dengan waktu tempuh 32 detik untuk selanjutnya mendapat isyarat hijau fase 4 pengatur Bintaran (P4.B) dengan waktu tunggu 0~112 detik.

Pada studi kasus ini, pewaktuan isyarat hijau ruas jalan L4-L2-L6-L9 disinkronkan. Usaha ini dilakukan agar kendaraan yang mendapat isyarat hijau di fase 3 dan 4 pengatur Kantor Pos (P3.KP

dan P4.KP) akan langsung mendapat isyarat hijau di fase 4 pengatur Gondomanan (P4.G) dan kembali mendapat isyarat hijau di fase 4 pengatur Bintaran (P4.B). Untuk itu pengatur lokal 1 (Kantor Pos) dikoordinasi agar pewaktuan P3.KP dan P4.KP sinkron dengan pewaktuan P4.G di pengatur master. Demikian pula untuk pengatur lokal 2 (Bintaran), P4.B harus sinkron dengan P4.G.

Usaha tersebut juga harus memperhatikan kendaraan yang bergerak sepanjang L9-L6-L2-L4. Sehingga usaha tersebut juga harus dapat mensinkronkan P3.B dengan P2.G, dan P4.KP dengan P2.G.

Salah satu trayektori kendaraan sebagai hasil usaha sinkronisasi dapat dilihat pada Gambar 3. Pengatur lokal 1 mempunyai offset 100 detik, dengan kata lain P1.KP tertinggal 100 detik dari P1.G. Dari diagram trayektori kendaraan didapat bahwa waktu tunggu untuk mendapat isyarat hijau di P4.G sekitar 0 hingga 20 detik. Kendaraan yang mulai berjalan pada saat dimulainya isyarat hijau P3.KP akan menunggu 20 detik untuk mendapat isyarat hijau di P4.G; sedangkan kendaraan terakhir yang mulai berjalan pada saat isyarat hijau P4.KP berakhir akan langsung mendapat isyarat hijau di P4.G.

Sebagian besar kendaraan yang mendapat isyarat hijau di P4.G tersebut menuju ke P4.B. Dari diagram trayektori kendaraan terlihat bahwa waktu tunggu untuk mendapat isyarat hijau di P4.B sekitar 10 hingga 45 detik.

Dengan mengasumsikan waktu tempuh kendaraan dari persimpangan Kantor Pos hingga Gondomanan sekitar 40 detik dan dari Gondomanan hingga Bintaran sekitar 32 detik, maka total waktu tempuh kendaraan dari mulut barat persimpangan Kantor Pos (yang mendapat isyarat hijau pada P3.KP dan P4.KP) hingga keluar dari persimpangan Bintaran (karena mendapat isyarat hijau pada P4.B) adalah 82~127 detik. Dengan digunakannya pengatur lalu-lintas terkoordinasi, nilai total waktu tempuh ini mengalami penurunan sekitar 26% hingga 42 %. Sementara itu waktu tempuh kendaraan dari mulut timur persimpangan Bintaran (yang mendapat isyarat hijau pada P3.B) hingga keluar dari persimpangan Kantor Pos (karena mendapat isyarat hijau pada P4.KP) adalah 87~107 detik atau mengalami penurunan hingga sekitar 47 %. Penurunan waktu tempuh pada slot waktu 7 untuk rute yang lain dapat dilihat pada Tabel 3. Dengan digunakannya pengatur lalu-lintas sikron, hampir semua rute mengalami penurunan waktu tempuh cukup berarti. Hal ini disebabkan adanya penurunan waktu tunggu untuk menanti isyarat hijau pada suatu pengatur lalu-lintas di semua persimpangan.

Tabel 3 Penurunan waktu tempuh kendaraan

Rute 1	Rute 2	Penurunan waktu tempuh
-	P1.G → P4.B	55%
-	P3.G → P4.B	13%
P1.KP → P4.G	P4.G → P4.B	-9%
P3.KP → P4.G	P4.G → P4.B	26%
P4.KP → P4.G	P4.G → P4.B	42%
-	P1.G → P4.KP	19%
P1.B → P2.G	P2.G → P4.KP	7%
P2.B → P2.G	P2.G → P4.KP	30%
P3.B → P2.G	P2.G → P4.KP	47%

Satu-satunya waktu tempuh yang justru mengalami kenaikan adalah rute dari mulut selatan persimpangan Kantor Pos (P1.KP) yang menuju persimpangan Bintaran. Namun jumlah kendaraan pada rute tersebut relatif sedikit jika dibandingkan dengan jumlah kendaraan di rute-rute lain.

3.4 Penggunaan Memori dan Sumber Daya CPU Mikrokontroler

Program pengatur isyarat lalu-lintas di APILL master hanya menggunakan 8574 byte (6,5 %) dari ruang memori flash dan 271 byte (6,2 %) dari ruang SRAM. Sedangkan penggunaan ruang memori flash dan SRAM di APILL lokal sedikit lebih besar karena terdapat

algoritma sinkronisasi. Namun sesungguhnya, program pengatur isyarat lalu-lintas ini hanya menggunakan sekitar 1,5 % ruang SRAM. Ruang sebesar 4,7 % SRAM hanya digunakan pada saat terjadi penyalinan data dari basis data ke terminal dan sebaliknya. Sementara itu, basis data yang berisi jadwal pengaturan isyarat lalu-lintas untuk 7×24 jam di APILL master hanya menempati 4,8 % ruang EEPROM. Basis data di APILL lokal menempati ruang sedikit lebih tinggi dikarenakan adanya tambahan data pembatas p dan nilai offset.

Tabel 4 Penggunaan memori dan sumber daya mikrokontroler

Jenis Memori	Kapasitas (Byte)	Memori yang digunakan	
		Master (Byte) (%)	Lokal (Byte) (%)
Flash	131072	8574 6.5	10914 8.3
SRAM	4351	271 6.2	337 7.7
EEPROM	4096	192 4.7	252 6.2

Secara umum, pada saat CPU hanya membutuhkan waktu 10 milidetik untuk mengeksekusi algoritma pengaturan isyarat lalu-lintas. Algoritma ini dieksekusi setiap satu detik. Dengan demikian, siklus kerja CPU hanya seditar $\frac{10}{1} \times 100 \% = 1\%$.

3.5 Pengembangan Sistem

Dengan melihat penurunan waktu tempuh dan penggunaan sumber daya mikrokontroler, sistem dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai berikut.

1. Sistem dapat dikembangkan dengan menambah pengatur lalu-lintas terjadwal dan sinkron lain di sepanjang Jl. KHA Dahlan dan Jl. Kusumanegara.
2. Sistem dapat ditambah dengan pengatur lalu-lintas sinkron untuk penyeberang jalan di antara persimpangan Kantor Pos dan Gondomanan. Dengan memberi kesempatan aktifitas penyeberangan pada saat ruas jalan tersebut kosong, penambahan ini tidak akan menambah waktu tempuh kendaraan yang melintas di kedua persimpangan tersebut.
3. Sistem dapat dikembangkan di tempat lain dengan menyesuaikan kembali jadwal pengaturan dan offset pengatur lalu-lintas.
4. Dari masih kecilnya penggunaan sumber daya di mikrokontroler, sistem ini dapat dikembangkan secara lebih leluasa dengan menambah algoritma lain untuk melengkapi fasilitas pada pengatur isyarat lalu-lintas ini.

4. Kesimpulan

Dari pembahasan yang telah dipaparkan di muka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Sistem pengatur isyarat lalu-lintas terjadwal dan terkoordinasi dapat menurunkan waktu tunggu kendaraan untuk mendapatkan isyarat hijau sehingga dapat menurunkan waktu tempuh kendaraan hingga 40 %.
2. Sistem ini dapat dibentuk berbasis mikrokontroler ATmega128A.

3. Sistem ini masih dapat dikembangkan secara lebih leluasa.

5. Daftar Pustaka

- Askerzade IN, Mahmood M., (2010). *Control the Extension Time of Traffic Light in Single Junction by Using Fuzzy Logic*. International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS – IJENS, 10(2): p. 48-55
- Federal Highway Administration, (2008). *Traffic Signal-timing Manual*. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation, p. 6-1-6-49.
- Jatmiko W, Azurat A, Wibowo AH, Marihot H, Wicaksana M, Takagawa I, Sekiyama K, Fukuda T., (2010). *Self-Organizing Urban Traffic Control Architecture with Swarm-Self Organizing Map in Jakarta: Signal Control System and Simulator*, International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 3(3): p. 443-465.
- Kurniawan F., (2014). *Prototipe Sistem Pengatur Isyarat Lalu-Lintas Terkoordinasi untuk Simpang Empat Gondomanan dan Bintaran*, Jurnal Teknologi, (7)1: hal. 64-72.
- Mansur, Agus, Rilo Purnawan, Agung, Nugraha, 2005, Penentuan Durasi Lampu Lalu-lintas di Perempatan Mirota Kampus Jogjakarta yang Optimal dengan Menggunakan Software Arena 5.0, *Proceeding Seminar Nasional Teknologi Simulasi dan Aplikasinya untuk Optimasi Industri*, Auditorium Pasca Sarjana UGM, 1 – 2 Juni, hal. 108 – 114.
- Primantari LFA., (2010). *Koordinasi Pengaturan Lampu Lalu Lintas (Studi kasus: Ruas Jalan Prof. Dr. Sorharso - Adi Sucipto - A.Yani - Adi Soemarmo)*. Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur, 8(12): hal. 13-30.
- Xie XF, Smith S, Barlow G., (2012). Schedule-Driven Coordination for Real-Time Traffic Network Control. *Proceedings 22nd International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*. Atibaia, Sao Paulo, Brazil, p. 323-331.
- Zhu H, Fan H, Guo S., (2013). *Moving Vehicle Detection and Tracking in Traffic Images based on Horizontal Edges*. TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, 11(11): p. 6477-6483.