
Rancang Bangun Sinkronisasi Pewaktuan Lampu Lalu Lintas Menggunakan PLC Omron CPM2A Dan Wonderware InTouch

Syukri Hadi Kamil Pasaribu¹, Andi Dharmawan²

¹Program Studi Elektronika dan Instrumentasi, FMIPA UGM, Yogyakarta

²Jurusan Ilmu Komputer dan Elektronika, FMIPA UGM, Yogyakarta

E-Mail: ¹syukri.zurlica@gmail.com, ²dharmawan@ugm.ac.id

Abstrak

Kemacetan lalu lintas telah menjadi permasalahan yang sering ditemui di kota-kota besar. Salah satu cara untuk mengatasi kemacetan adalah melakukan proses sinkronisasi antar persimpangan bersinyal. Sistem ini bertujuan agar kendaraan yang keluar dari suatu persimpangan setelah lampu lalu lintas berwarna hijau menyala, tidak lagi menunggu pada persimpangan berikutnya karena terkena lampu merah. Sebuah sinyal diterima pada suatu persimpangan dari persimpangan sebelumnya sebagai tanda agar persimpangan tersebut menyesuaikan pewaktuan lampu hijaunya agar tujuan tersebut diatas dapat tercapai. Kecepatan kendaraan dan jarak antar persimpangan menjadi faktor utama dalam perhitungan sinkronisasi. Penggunaan sistem sinkronisasi mampu menghindarkan kendaraan terkena lampu merah pada persimpangan yang tersinkronisasi secara aktual pada prototipe sebanyak 24 kali dari 30 kali percobaan (80%) dengan waktu tunggu rata-rata apabila terkena lampu merah adalah 12,02 detik, sedangkan secara simulasi 17 kali dari 30 kali percobaan (56,67%) dengan waktu tunggu rata-rata apabila terkena lampu merah adalah 1,25 detik. Kecepatan maksimal kendaraan yang direkomendasikan secara teori pada simulasi adalah 46,67 km/jam.

Kata kunci—Sinkronisasi, PLC, Omron, Lampu lalu lintas, Wonderware InTouch.

Abstract

Traffic congestion has become a problem that is often encountered in large cities. One way to overcome this problem is the synchronization system among signalized intersections. The system is intended to make vehicles no need to wait for green light at the next intersection after clearing an intersection before. An intersection received a signal from previous intersection in order to adjust the timing of its signal so the objective above can be achieved. Speed of vehicles and the distance between intersections is the main factor for synchronization system. The use of the synchronization system is able to avoid the vehicle hit a red light at the synchronized intersection in real time on a prototype is 24 times out of 30 attempts (80%) with an average waiting time when hitting the red light is 12.02 seconds, while in the simulation is 17 times out of 30 attempts (56.67%) with an average waiting time when hitting the red light is 1.25 seconds. Recommended maximum vehicle speed in theory on simulation is 46.67 km/h.

Keywords—Synchronization, PLC, Omron, Traffic Light, Wonderware InTouch.

1. Pendahuluan

Seiring dengan perkembangan dunia industri yang semakin maju, kebutuhan akan sarana transportasi juga meningkat, salah satunya adalah transportasi darat berupa kendaraan bermotor. Meningkatnya jumlah pemakai kendaraan bermotor mengakibatkan banyak terjadi kemacetan pada persimpangan, seperti simpang tiga dan simpang empat. Untuk mengurangi kemacetan tersebut maka dipasang lampu lalu lintas pada persimpangan-persimpangan tersebut.

Pada kota-kota besar, kemacetan menjadi suatu hal yang sering ditemukan bahkan pada beberapa titik seperti di daerah pusat perbelanjaan, perkantoran, atau sekolahan, tingkat kemacetannya sangat tinggi terutama pada waktu-waktu jam sibuk saat pagi hari akan berangkat kerja atau sekolah, dan sore hari saat pulang kerja atau sekolah. Selain itu, jarak antar persimpangan yang terlalu dekat juga menjadi pemicu terjadinya kemacetan karena kendaraan yang keluar dari persimpangan pertama harus menunggu jika pada persimpangan berikutnya terkena lampu merah, padahal jumlah kendaraan banyak.

Lampu lalu lintas konvensional ternyata tidak mampu mengatasi kemacetan seperti yang dijelaskan diatas. Beberapa metode sudah dicoba untuk mengatasi hal ini, seperti melakukan penyesetan nilai pewaktuan lalu lintas secara manual pada masing-masing sisi. Tetapi hal ini belum dapat benar-benar menyelesaikan masalah apalagi pada jalur yang jarak persimpangannya tidak jauh. Solusi lain yang sudah diteliti adalah pengaturan nilai pewaktuan nyala lampu lalu lintas secara otomatis berdasarkan kepadatan arus lalu lintas [1], dan memakai rumus yang disediakan pada Manual Kapasitas Jalan Indonesia tahun 1997 [2]. Solusi ini memberi keleluasaan pengguna jalan yang lebih padat untuk melewati persimpangan daripada jalan yang lebih sepi. Namun kendaraan tetap harus menunggu karena terkena lampu merah. Untuk itu dibutuhkan suatu prasarana yang dapat secara otomatis membuat suatu persimpangan menyesuaikan nilai pewaktuan lampu lalu lintasnya apabila kendaraan telah melewati persimpangan sebelumnya agar kendaraan-kendaraan yang hendak melintas tidak terkena lampu merah pada persimpangan tersebut.

2. Metode Penelitian

2.1 Garis Besar Proses Sinkronisasi

Dua persimpangan bersinyal yang berdekatan dapat diterapkan sistem sinkronisasi. Persimpangan pertama (selanjutnya disebut persimpangan A) sebagai persimpangan awal datangnya kendaraan, dan persimpangan kedua (selanjutnya disebut persimpangan B) sebagai persimpangan acuan sinkronisasi yang nilai pewaktuannya disesuaikan secara otomatis.

Kendaraan yang datang dari persimpangan A menuju persimpangan B setelah nyala lampu hijau pada jalur prioritas persimpangan A harus mendapatkan lampu hijau ketika sampai pada persimpangan B. Untuk memenuhi tujuan tersebut maka pada persimpangan B harus dilakukan penyesuaian nilai pewaktuan nyala lampu secara otomatis apabila sinyal sinkronisasi dari persimpangan A diterima.

Langkah-langkah proses sinkronisasi diuraikan sebagai berikut :

1. Penentuan persimpangan awal datangnya kendaraan (persimpangan A) dan persimpangan yang akan disinkronisasi sebagai tujuan kendaraan (persimpangan B).
2. Penentuan jalur prioritas proses sinkronisasi. Pemilihan jalur prioritas dapat bergantung pada beberapa faktor seperti kepadatan arus pada jalur, jalur sebagai jalan utama, kebijakan pemerintah, dan lain sebagainya.
3. Pengiriman sinyal sinkron oleh persimpangan A ke persimpangan B.
4. Otomasi penyesuaian nilai pewaktuan persimpangan B agar kendaraan yang tiba pada persimpangan B langsung mendapatkan lampu hijau.

Gambar 1 merupakan diagram alir garis besar proses sinkronisasi.

Sistem pewaktuan lampu lalu lintas yang digunakan adalah sistem sekuensial yang merupakan kombinasi dari kondisi nyala lampu masing-masing arah pada setiap persimpangan.

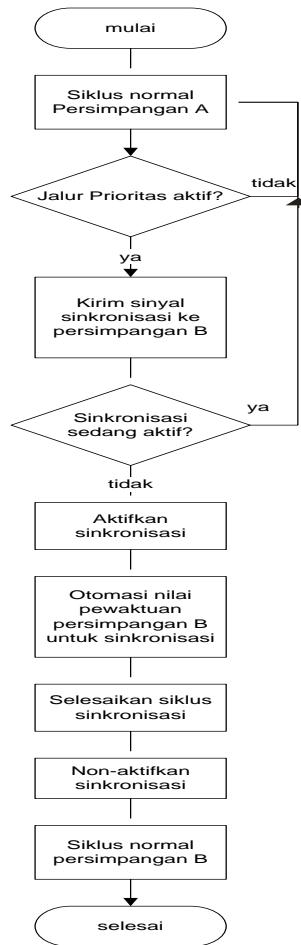
Penelitian ini mengambil studi kasus pada persimpangan lampu lalu lintas di daerah Bumijo yang merupakan pertemuan antara Jalan Magelang dari arah utara, Jalan Diponegoro dari arah Timur, Jalan Tentara Pelajar dari arah selatan, dan Jalan Kyai Mojo dari arah barat (lihat Gambar 2). Lokasi persimpangan ini merupakan salah satu titik kemacetan lalu lintas khususnya pada sore hari. Penelitian ini mengambil jalur dari arah utara yakni dari jalan Magelang yang menuju jalan Kyai Mojo sebagai jalur prioritas karena tingkat kepadatan arus lalu lintas yang tinggi pada jalur tersebut. Jalur prioritas ini akan di-sinkronisasi-kan dengan pertigaan Jalan Tentara Rakyat Mataram yang berlokasi 700 meter ke arah timur dari simpang empat Bumijo. Gambar 2 menunjukkan peta lokasi studi kasus sinkronisasi yang akan dibuat.

Digunakan masing-masing satu buah PLC untuk mengendalikan lampu lalu lintas pada setiap persimpangan yaitu :

1. PLC-A digunakan untuk mengendalikan lampu lalu lintas pada simpang empat.
2. PLC-B digunakan untuk mengendalikan lampu lalu lintas pada simpang tiga.

Berdasarkan Manual Kapasitas Jalan Indonesia tahun 1997, nyala lampu kuning dan nyala lampu merah pada masing-masing persimpangan adalah sama yaitu 3 detik untuk nyala lampu kuning, dan 5 detik untuk nyala lampu merah dari semua arah secara bersamaan sesaat setelah lampu kuning padam. Nyala lampu hijau minimal adalah 10 detik, sehingga satu siklus minimal adalah 54 detik. Hal ini bertujuan agar kendaraan yang melintasi jalur yang dilewatkan tidak bertabrakan dengan jalur yang dilewatkan sebelumnya. Setelah nyala lampu merah dari semua arah selama 5 detik selesai maka arah dari jalur selanjutnya akan menyala lampu hijau [3].

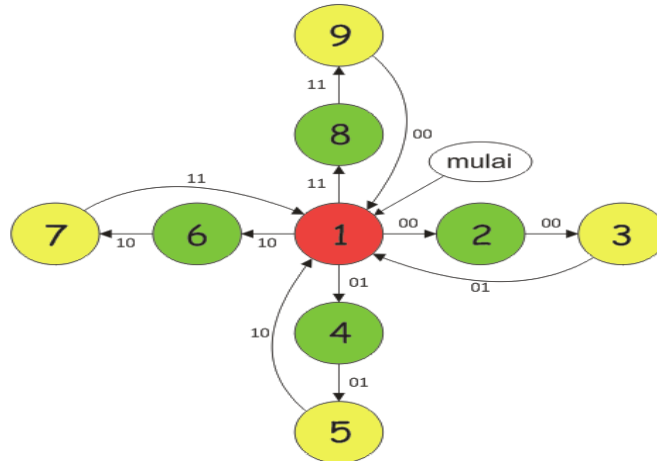
Gambar 3 merupakan diagram *state* tahapan sekuensial pada simpang empat yang dikendalikan oleh PLC-A.



Gambar 1 Garis besar proses sinkronisasi



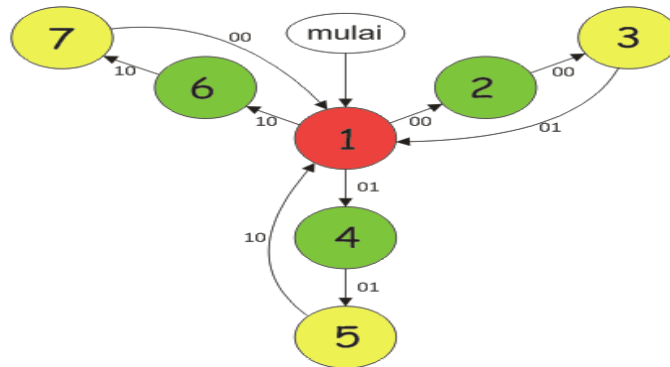
Gambar 2 Lokasi studi kasus



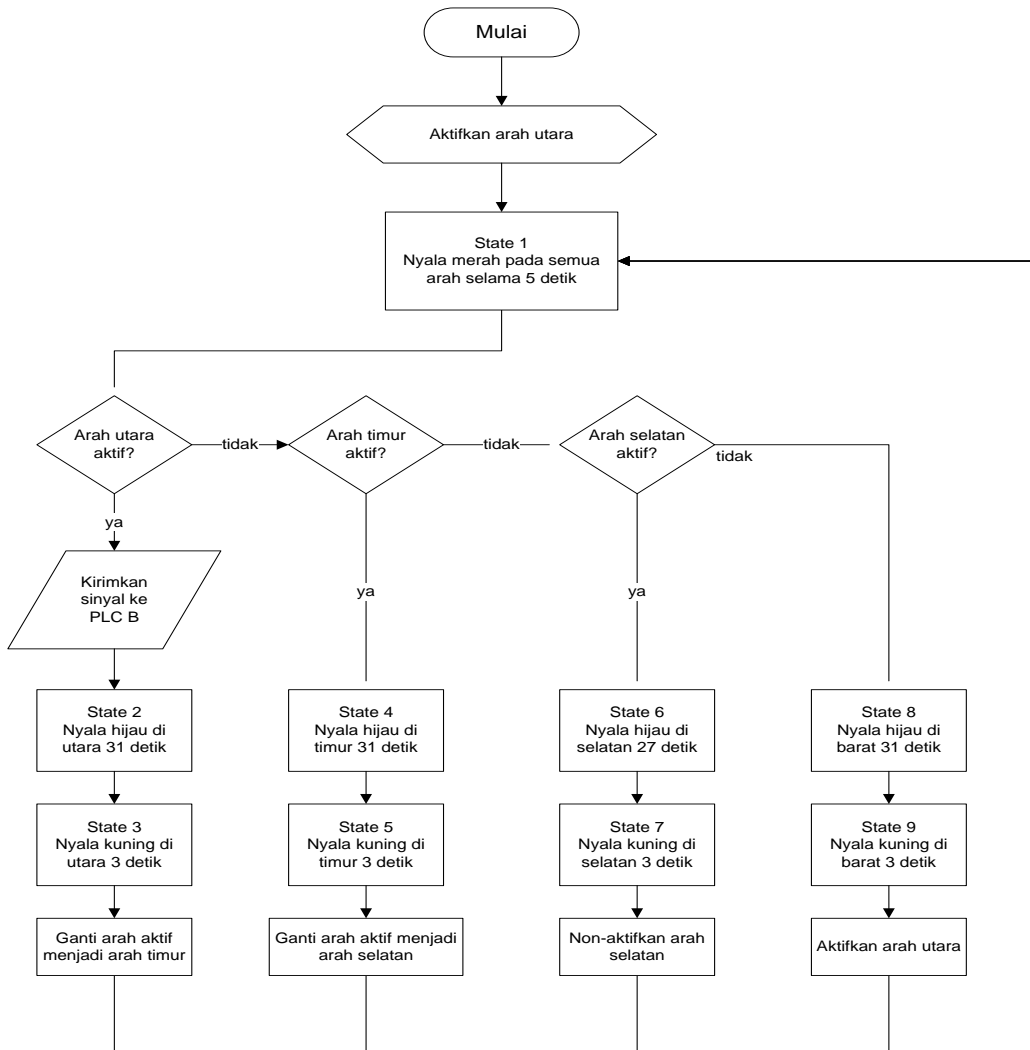
Gambar 3 Diagram *state* nyala lampu pada simpang empat

Berdasarkan survei yang dilakukan di perempatan Bumijo yang dijadikan sebagai lokasi acuan sinkronisasi, perempatan ini memiliki nilai pewaktuan lalu lintas yang selalu sama untuk setiap siklus sekuensialnya. Tabel 1 merupakan tabel sekuensial keadaan nyala lampu pada perempatan Bumijo. Diagram alir pemrograman PLC-A untuk pengendalian simpang empat ditunjukkan oleh Gambar 5.

Gambar 4 adalah diagram *state* tahapan sekuensial pada simpang tiga. Tabel 2 merupakan tabel sekuensial keadaan nyala lampu persimpangan simpang tiga pada keadaan *default*. Diagram alir pemrograman PLC-B untuk pengendalian simpang tiga ditunjukkan pada Gambar 6.



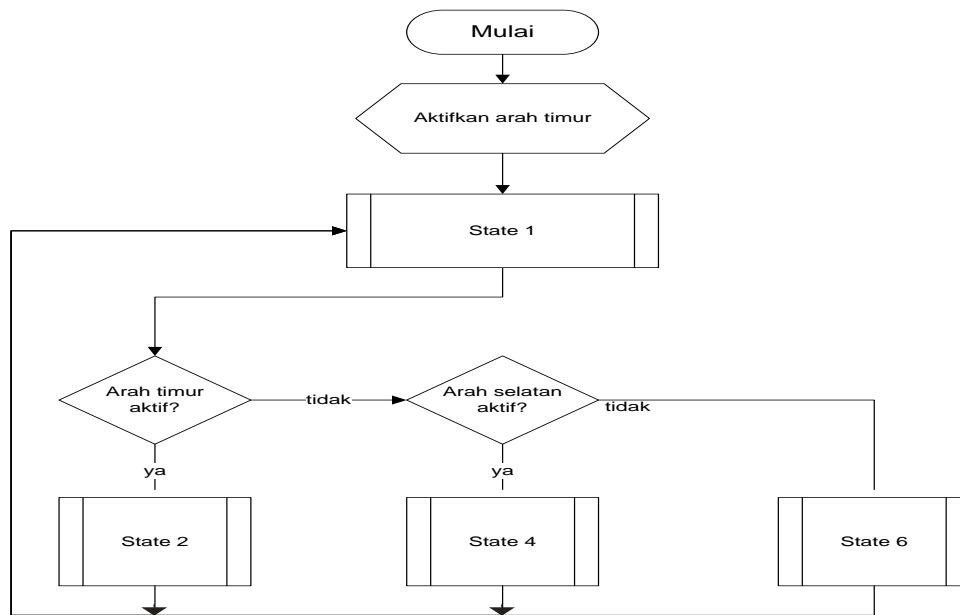
Gambar 4 Diagram *state* nyala lampu pada simpang tiga



Gambar 5 Diagram alir PLC-A

Tabel 1 Nilai pewaktuan lampu pada simpang empat

Fla g	St ate	Utara			Timur			Selatan			Barat			keterangan	
		M	K	H	M	K	H	M	K	H	M	K	H	Nyala lampu	Waktu nyala
00	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	Merah pada semua	5
00	2	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	Hijau di utara	31
00	3	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	Kuning di utara	3
01	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	Merah pada semua	5
01	4	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	Hijau di timur	31
01	5	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	Kuning di timur	3
10	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	Merah pada semua	5
10	6	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	Hijau di selatan	27
10	7	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	Kuning di selatan	3
11	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	Merah pada semua	5
11	8	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	Hijau di barat	31
11	9	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	Kuning di barat	3



Gambar 6 Diagram alir pemrograman ladder pada PLC-B

Tabel 2 Pewaktuan nyala lampu simpang tiga

Fla g	Stat e	Timur			Selatan			Barat			keterangan	
		M	K	H	M	K	H	M	K	H	Nyala lampu	Waktu nyala
00	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	Merah pada semua	5
00	2	0	0	1	1	0	0	1	0	0	Hijau di timur	15
00	3	0	1	0	1	0	0	1	0	0	Kuning di timur	3
01	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	Merah pada semua	5
01	4	1	0	0	0	0	1	1	0	0	Hijau di selatan	15
01	5	1	0	0	0	1	0	1	0	0	Kuning di selatan	3
10	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	Merah pada semua	5
10	6	1	0	0	1	0	0	0	0	1	Hijau di barat	15
10	7	1	0	0	1	0	0	0	1	0	Kuning di barat	3

2.2 Proses Sinkronisasi

Sinyal sinkronisasi dikirimkan oleh PLC-A yang mengendalikan lampu lalu lintas pada perempatan pada saat keadaan lampu lalu lintas dari arah utara akan berubah menjadi hijau, tepatnya saat *state-1* yaitu saat semua lampu sedang merah dan nilai *flag* adalah 00. Tergantung posisi *state* yang aktif saat PLC-B menerima sinyal sinkronisasi maka tipe sinkronisasi dapat dibedakan menjadi enam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7 Tipe-tipe sinkronisasi berdasarkan posisi sinyal sinkronisasi diterima

Jika sebuah tipe aktif pada *state* tertentu maka waktu yang tersisa sejak *state* tersebut sampai dengan akhir dari siklus yang sedang berjalan disebut waktu sisa. Untuk perhitungan nilai waktu sisa menggunakan rumus (1).

$$S = (A - E) + R \quad (1)$$

Dimana :

S = waktu sisa

A = nilai pewaktuan *state* berjalan, saat sinyal sinkronisasi diterima

E = waktu yang telah ditempuh pada *state* berjalan saat sinyal sinkronisasi diterima

R = sisa waktu untuk menyelesaikan siklus setelah *state* penerima sinyal sinkronisasi berakhir

State yang aktif pada PLC-B saat menerima sinyal sinkronisasi dari PLC-A sangat menentukan proses otomasi pewaktuan yang harus diterapkan untuk sinkronisasi. Sisa waktu yang harus diselesaikan pada siklus saat sinyal sinkronisasi diterima dijadikan patokan untuk menentukan perhitungan nilai waktu sinkronisasi.

Berdasarkan posisi *state* PLC-B saat menerima sinyal sinkron, maka tipe sinkronisasi dapat dipisahkan menjadi enam, yaitu :

1. Tipe-1

Tipe-1 diaktifkan apabila sinyal sinkronisasi diterima saat PLC-B berada pada *state-7* atau *state-1* dengan kondisi *flag* 00. Perhitungan waktu sisa untuk tipe-1 adalah :

$$S = ((\text{Timer Kuning} + \text{Merah}) - E)$$

$$S = (8 - E)$$

2. Tipe-2

Tipe-2 aktif apabila sinyal sinkronisasi diterima saat PLC-B sedang berada pada *state-2*. Waktu sisa tipe-2 adalah :

$$S = ((\text{HijauTimur}) - E)$$

$$+ ((K + M) + \text{HijauSelatan} + (K + M) + \text{HijauBarat} + (K + M))$$

$$S = (15 - E) + (8 + 15 + 8 + 15 + 8) = (15 - E) + 54$$

3. Tipe-3

Tipe-3 diaktifkan apabila sinyal sinkronisasi diterima saat PLC-B berada pada *state-3* atau *state-1* dengan kondisi *flag* 01. Waktu sisa tipe-3 adalah :

$$S = ((K + M) - E) + (\text{HijauSelatan} + (K + M) + \text{HijauBarat} + (K + M))$$

$$S = (8 - E) + (15 + 8 + 15 + 8) = (8 - E) + 46$$

4. Tipe-4

Tipe-4 aktif apabila sinyal sinkronisasi diterima saat PLC-B sedang berada pada *state-4*. Waktu sisa tipe-4 adalah :

$$S = ((\text{HijauSelatan}) - E) + ((K + M) + \text{HijauBarat} + (K + M))$$

$$S = (15 - E) + (8 + 15 + 8) = (15 - E) + 31$$

5. Tipe-5

Tipe-5 diaktifkan apabila sinyal sinkronisasi diterima saat PLC-B berada pada *state 5* atau *state-1* dengan kondisi *flag* 10. Waktu sisa tipe-5 adalah :

$$S = ((K + M) - E) + (\text{HijauBarat} + (K + M))$$

$$S = (8 - E) + (15 + 8) = (8 - E) + 23$$

6. Tipe-6

Tipe-6 aktif apabila sinyal sinkronisasi diterima saat PLC-B berada pada *state-6*. Waktu sisa untuk tipe-6 adalah :

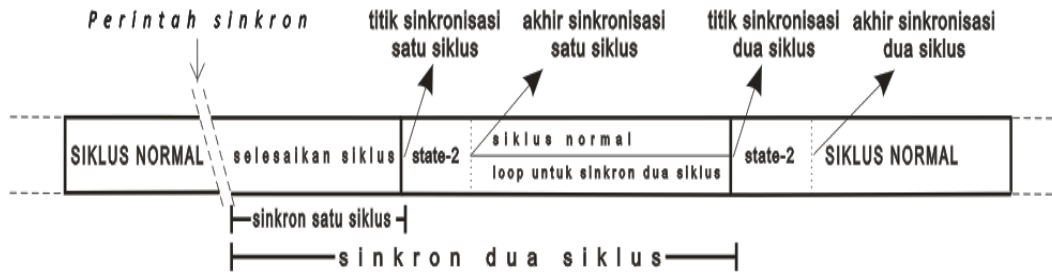
$$S = ((K + M) - E) + (K + M)$$

$$S = (15 - E) + 8 = (15 - E) + 8$$

Nilai waktu sisa yang didapatkan akan digunakan dalam perhitungan proses sinkronisasi oleh komputer. Lampu hijau dari arah timur pada saat baru saja menyala ditetapkan sebagai titik acuan hasil sinkronisasi yang selanjutnya disebut "Titik Sinkronisasi".

Berdasarkan nilai estimasi waktu tempuh kendaraan, titik sinkronisasi dibedakan menjadi dua seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 8, yaitu :

1. Sinkronisasi satu siklus dengan letak titik sinkronisasi berada pada siklus berikutnya setelah siklus yang sedang berjalan selesai. Hal ini terjadi jika waktu tempuh kendaraan cepat.
2. Sinkronisasi dua siklus dengan letak titik sinkronisasi berada pada dua siklus berikutnya setelah siklus yang sedang berjalan selesai ditambah satu siklus lagi. Hal ini terjadi jika nilai variabel selisih besar dari waktu siklus minimal pada simpang tiga yaitu 54 detik.



Gamb

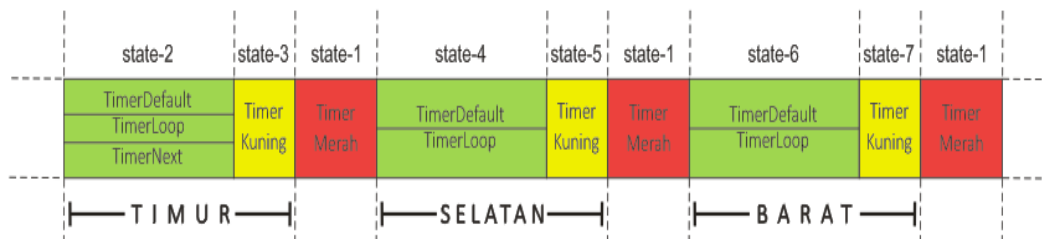
ar 8 Penentuan jenis dan titik sinkronisasi

Setelah PLC-B mendapatkan sinyal dan menentukan tipe sinkronisasi yang dipakai, maka PLC-B mengirim data tersebut ke komputer untuk diproses. Komputer kemudian melakukan perhitungan nilai pewartuan sinkronisasi untuk diberikan kepada masing-masing *timer* pada PLC-B.

Untuk memenuhi kebutuhan proses sinkronisasi maka pada PLC-B dirancang sistem pewartuan dengan beberapa pilihan *timer* untuk satu kondisi nyala lampu hijau. Pemakaian *timer* tergantung pada jenis sinkronisasi apakah akan memakai satu siklus atau memakai dua siklus. Nyala lampu hijau pada masing-masing *state* menggunakan dua buah *timer* berbeda, sedangkan untuk *state-2* menggunakan tiga buah *timer*. Lihat Gambar 9.

Penjelasan tentang *timer* yang digunakan :

1. *TimerDefault* digunakan sebagai pewartuan normal dan pewartuan sinkronisasi untuk menghabiskan satu siklus berjalan apabila sinyal sinkron diterima pada *state* sebelumnya.
2. *TimerLoop* digunakan untuk pewartuan hasil perhitungan sinkronisasi yang digunakan pada siklus kedua apabila menggunakan jenis sinkronisasi dua siklus.
3. Khusus nyala lampu hijau dari arah timur menggunakan satu *timer* tambahan yang digunakan sebagai titik sinkronisasi yaitu "*TimerNext*" dengan nilai pewartuan yang disesuaikan dengan nyala lampu hijau pada persimpangan A agar iring-iringan kendaraan yang melewati persimpangan B dapat lewat semua.



Gambar 9 Jenis *timer* yang digunakan dari tiap arah yang aktif

Penggunaan *timer* ditentukan oleh beberapa variabel kondisi, dimana variabel tersebut bergantung pada hasil perhitungan tipe sinkronisasi yang sedang aktif. Variabel yang digunakan adalah :

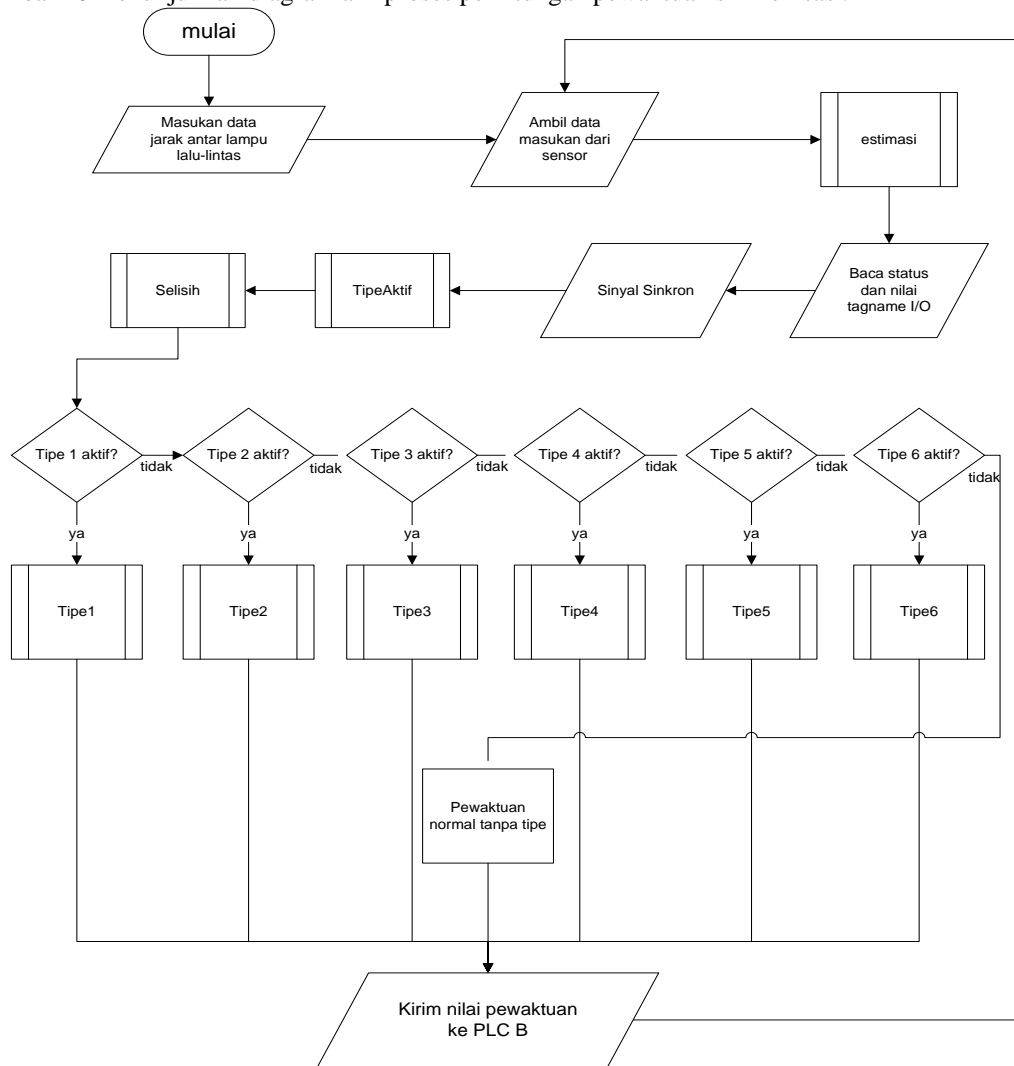
1. *KondisiHabis*,
2. *KondisiLoop*, dan
3. *KondisiNext*.

Tabel 3 adalah tabel kebenaran penggunaan *timer* berdasarkan nilai variabel kondisi.

Tabel 3 Tabel kebenaran pemilihan *timer* pada PLC-B

<i>Kondisi Next</i>	<i>Kondisi Loop</i>	<i>Kondisi Habis</i>	<i>Timer Default</i>	<i>Timer Loop</i>	<i>Timer Next</i>	Keterangan
0	0	X	NYALA	MATI	MATI	Berlaku untuk semua arah. Arah timur tambah <i>TimerNext</i>
0	1	0	MATI	NYALA	MATI	
0	1	1	NYALA	MATI	MATI	
1	X	X	MATI	MATI	NYALA	

Perhitungan pewaktuan sinkronisasi dilakukan oleh *Wonderware InTouch* pada komputer. Gambar 10 menunjukkan diagram alir proses perhitungan pewaktuan sinkronisasi.



Gambar 10 Diagram alir pemrograman sinkronisasi pada *Wonderware InTouch*

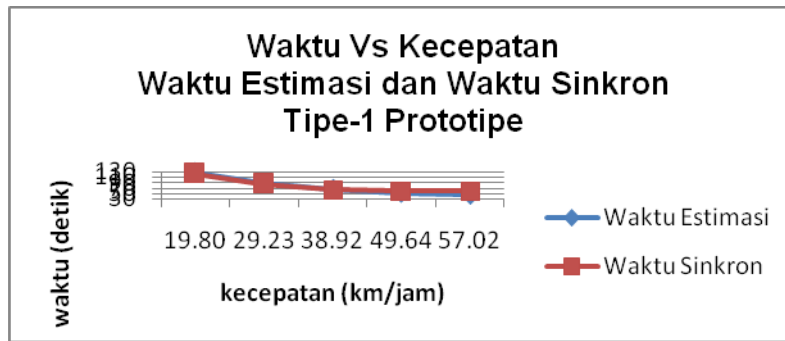
3. Hasil dan Analisis

Pengambilan data dibagi menjadi dua jenis data yaitu pengambilan data secara aktual pada prototipe dan pengambilan data secara simulasi pada *Wonderware InTouch*. Dari enam jenis tipe sinkronisasi diambil data hasil pengujian tipe-1 sebagai pembahasan.

Hasil pengambilan data waktu estimasi dan waktu sinkronisasi secara aktual pada prototipe untuk tipe-1 dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 11.

Tabel 4 Data waktu estimasi dan waktu sinkronisasi pada prototipe untuk tipe-1

Kecepatan (km/jam)	Waktu Estimasi (detik)	Elapsed (detik)	Waktu Sinkron (detik)	Selisih (detik)
19,80	127	2	123,6	-3,4
29,23	86	1	83,2	-2,8
38,92	65	6	63,3	-1,7
49,64	51	3	58,1	7,1
57,02	44	2	58,2	14,2

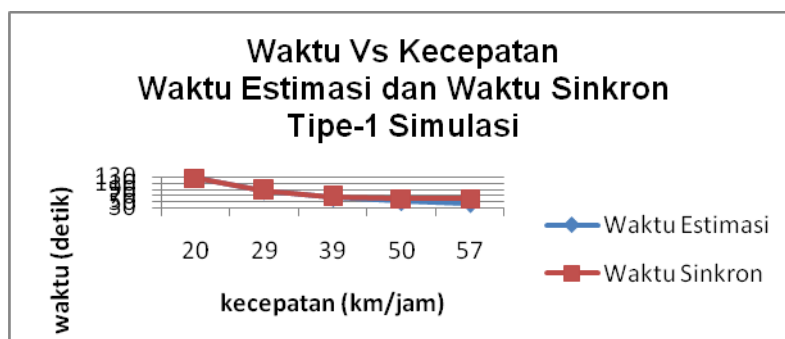


Gambar 11 Grafik perbandingan waktu estimasi dan waktu sinkronisasi pada prototipe untuk tipe-1 terhadap kecepatan kendaraan

Hasil pengambilan data waktu estimasi dan waktu sinkronisasi secara simulasi pada *Wonderware InTouch* untuk tipe-1 ditampilkan pada Tabel 5 dan Gambar 12.

Tabel 5 Data waktu estimasi dan waktu sinkronisasi pada simulasi untuk tipe-1

Kecepatan (km/jam)	Elapsed (detik)	Waktu Estimasi (detik)	Waktu Sinkron (detik)	Selisih (detik)
20	2	126	126	0
29	1	86	85	-1
39	6	64	65	1
50	3	50	59	9
57	2	44	60	16



Gambar 12 Grafik perbandingan waktu estimasi dan waktu sinkronisasi pada simulasi untuk tipe-1 terhadap kecepatan kendaraan

Dari Tabel 4 dan Gambar 11, serta Tabel 5 dan Gambar 12, hasil pengambilan data waktu sinkronisasi secara aktual pada prototipe untuk tipe-1 lebih rendah dari waktu sinkronisasi secara simulasi. Hasil pada simulasi merupakan hasil teoritis sedangkan hasil pada prototipe merupakan hasil perhitungan sebenarnya menggunakan PLC. Perbedaan nilai pewaktuan ini dapat disebabkan oleh beberapa hal yaitu :

1. Proses perhitungan pada *Wonderware* telah selesai tetapi timer pada PLC yang bertugas untuk menghitung waktu sinkronisasi mendapatkan *delay* komunikasi.
2. *Wonderware* membulatkan pembacaan nilai pewaktuan yang disimpan pada memori PLC sehingga bisa menambah atau mengurangi nilai waktu sinkronisasi secara teori sebanyak satu detik.

Pada hasil penelitian untuk tipe-1, kolom selisih pada Tabel 4 dan Tabel 5 adalah selisih waktu antara waktu sinkronisasi terhadap waktu estimasi. Nilai selisih negatif pada kolom ini berarti kendaraan tiba pada persimpangan setelah lampu hijau menyala selama waktu yang tertera, sedangkan nilai selisih

positif berarti kendaraan saat tiba pada persimpangan harus menunggu selama waktu yang tertera untuk mendapatkan lampu hijau. Hal yang sama juga berlaku untuk tipe-tipe sinkronisasi yang lainnya.

Dari 5 kali percobaan untuk tipe-1 secara aktual didapatkan 3 kali kesempatan kendaraan terhindar dari lampu merah dan 2 kali kesempatan kendaraan terkena lampu merah dengan waktu tunggu apabila terkena lampu merah adalah 7,1 detik dan 14,2 detik. Untuk percobaan secara simulasi didapatkan 2 kali kesempatan terhindar dari lampu merah dan 3 kali kesempatan kendaraan terkena lampu merah dari 5 kali percobaan dengan waktu tunggu apabila terkena lampu merah adalah 1 detik, 9 detik, dan 16 detik.

Kesempatan terhindar dari lampu merah untuk tipe-1 sistem sinkronisasi secara aktual adalah 3 kali dari 5 kali, sedangkan secara simulasi adalah 2 kali dari 5 kali. Maka perbandingan sistem sinkronisasi secara aktual dengan simulasi untuk kesempatan terhindar dari lampu merah adalah 3 : 2.

Nilai rata-rata waktu tunggu kendaraan jika terkena lampu merah dihitung dengan menjumlahkan nilai-nilai positif pada kolom selisih lalu dibagi sesuai jumlah percobaan yang terkena lampu merah. Dengan demikian pada sistem sinkronisasi secara aktual untuk tipe-1 sesuai dengan Tabel 4, nilai rata-rata waktu tunggu saat terkena lampu merah adalah 10,65 detik. Nilai rata-rata waktu tunggu secara simulasi jika terkena lampu merah untuk tipe-1 sesuai Tabel 5 adalah 8,67 detik.

Secara keseluruhan untuk tipe-1 sampai dengan tipe-6, hasil penelitian dirangkum dalam Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 6 Perbandingan kesempatan terhindar dari lampu merah antara sistem sinkronisasi secara aktual dan secara simulasi

Tipe Aktif	Terhindar dari Lampu Merah (kali)	
	Aktual	Simulasi
Tipe-1	3	2
Tipe-2	4	3
Tipe-3	5	2
Tipe-4	5	5
Tipe-5	5	3
Tipe-6	2	2
Total	24	17
Persentase	80%	56,67%

Untuk mendapatkan batas kecepatan maksimal yang direkomendasikan, kendaraan harus menghindari nilai variabel selisih yang kecil dari satu siklus minimal yaitu 54 detik. Nilai waktu sisa terkecil terdapat pada tipe-1 yaitu (8 - E) detik. Dengan mengambil nilai variabel *elapsed* maksimum didapatkan waktu_sisa 8 - 8 = 0 detik. Karena nilai selisih = estimasi - waktu_sisa maka untuk mendapatkan kecepatan maksimal yang direkomendasikan adalah dengan memiliki nilai waktu estimasi tidak kurang dari 54 detik.

$$kecepatan = \frac{jarak}{waktu} = \frac{700\text{ m}}{54\text{ detik}} = 12,96\text{ m/det}$$

$$kecepatan = 46,67\text{ km/jam}$$

Tabel 7 Perbandingan kesempatan terkena lampu merah dan waktu tunggu rata-rata jika terkena lampu merah antara sistem sinkronisasi secara aktual dan secara simulasi

Tipe Aktif	Terkena Lampu Merah (kali)		Waktu Tunggu Total (detik)	
	Aktual	Simulasi	Aktual	Simulasi
Tipe-1	2	3	21,3	26
Tipe-2	1	2	9,2	13
Tipe-3	0	3	0	3
Tipe-4	0	0	0	0

Tipe-5	0	2	0	2
Tipe-6	3	3	41,6	46
Total	6	13	72,1	90
Rata-rata Waktu Tunggu			12,02	1,25

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada sistem sinkronisasi secara aktual pada prototipe kesempatan kendaraan terhindar dari lampu merah adalah 24 kali dari 30 kali percobaan (80%). Pada sistem sinkronisasi secara simulasi, kesempatan kendaraan terhindar lampu merah adalah 17 kali dari 30 kali percobaan (56,67%).
2. Waktu tunggu rata-rata kendaraan jika terkena lampu merah pada sistem sinkronisasi secara aktual pada prototipe adalah 12,02 detik, sedangkan pada sistem sinkronisasi secara simulasi adalah 1,25 detik.
3. Semakin tinggi kecepatan kendaraan, semakin lama menunggu lampu hijau jika terkena lampu merah pada persimpangan yang tersinkronisasi. Kecepatan maksimal kendaraan yang direkomendasikan secara simulasi adalah 46,67 km/jam.

Adapun pengembangan yang bisadilakukan adalah:

1. Sebaiknya digunakan pengontrolan data yang berdiri sendiri pada masing-masing persimpangan dimana data dapat dikirimkan oleh pengontrol secara nirkabel ke pusat kontrol.
2. Penerapan sinkronisasi harus dapat mengendalikan lebih banyak persimpangan dalam satu jalur prioritas.

Daftar Pustaka

- [1] Dharmawan, A., 2006, Prototipe Pengaturan Lampu Lalu Lintas Berdasarkan Tingkat Kepadatan Arus. Skripsi, Prodi Elektronika dan Instrumentasi, Fakultas MIPA, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [2] Agung, I.R., 2009, Simulator Pengatur Lampu Lalu Lintas Berdasarkan Waktu Dan Kepadatan Kendaraan Berbasis Mikrokontroller AT89S52. Fakultas Teknik Elektro, Universitas Udayana, Bali.
- [3] Manual Kapasitas Jalan Indonesia, Jakarta : PT. Bina Karya Persero., 1997.