

Perancangan Sistem Kendali Lampu Lalu Lintas Pada Dua Persimpangan Menggunakan Fuzzy Inference System

Design of Traffic Light Control Systems in Two Intersections Using a Fuzzy Inference System

M Irfan Avianto^{1*}, Dr. Yeffry Handoko Putra MT², Muhammad Aria MT³

^{1,2)} Program Studi Sistem Komputer, ³⁾ Program Studi Teknik Elektro,
^{1,2,3)} Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Komputer Indonesia
Jl. Dipati Ukur No. 112 - 116, Bandung, Indonesia 40132

*email: mirfanavianto@email.unikom.ac.id

ABSTRACT – This research was conducted with the intention of designing a traffic light system controller as a police officer regulating traffic. Taking into account the density in each lane and the length of the waiting time, the system determines whether the green signal is diverted to another line or remains in the current green line. Data processing density and waiting time is done using fuzzy logic. The goal to be achieved by the design of this tool is the waiting time and the number of vehicle lines that are more concise than the current traffic light control system. Both of these parameters become the reference for the success of this system. After simulating and analyzing the vehicle discharge between 1800 to 2300 cars / hour, the results showed that the traffic light control system using fuzzy logic was better compared to the static timing system. The average waiting time generated by fuzzy logic can be > 15 seconds faster than static timing. Not only waiting time, the number of vehicles lining up can also be minimized.

Keywords – Congestion; fuzzy logic; waiting time; artificial intelligence

ABSTRAK – Penelitian ini dilakukan dengan maksud merancang alat pengendali sistem lampu lalu lintas layaknya seorang polisi mengatur lalu lintas. Dengan mempertimbangkan kepadatan di setiap jalur dan lama waktu tunggu, sistem menentukan apakah sinyal hijau dialihkan ke jalur lain atau tetap di jalur hijau saat ini. Pengolahan data kepadatan dan waktu tunggu dilakukan menggunakan logika fuzzy. Tujuan yang hendak dicapai dengan rancangan alat ini adalah waktu tunggu dan jumlah antrian kendaraan yang lebih ringkas dibanding sistem kendali lampu lalu lintas saat ini. Kedua parameter tersebut menjadi acuan keberhasilan sistem ini. Setelah dilakukan simulasi dan analisa dengan debit kendaraan antara 1800 hingga 2300 mobil/jam, diperoleh hasil bahwa sistem kendali lampu lalu lintas menggunakan logika fuzzy lebih baik dibandingkan dengan sistem pewaktuan statis. Waktu tunggu rata-rata yang dihasilkan logika fuzzy dapat >15 detik lebih cepat dibandingkan dengan pewaktuan statis. Tak hanya waktu tunggu, jumlah kendaraan yang mengantre juga dapat diminimalisir.

Kata Kunci – Kemacetan; logika fuzzy; waktu tunggu; kecerdasan buatan

1. PENDAHULUAN

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh sistem manajemen lalu lintas yang dirasa bekerja kurang maksimal. Hal tersebut dibuktikan dengan tetap dibutuhkannya petugas yang mengatur lalu lintas di persimpangan, padahal persimpangan tersebut sudah dilengkapi alat pemberi isyarat lalu lintas (APILL).

Sistem manajemen lalu lintas yang saat ini

beroperasi di Indonesia masih menggunakan sistem pewaktuan statis. Pewaktuan statis bekerja dengan memberikan alokasi sinyal hijau ke setiap jalur dalam satu persimpangan. Ketika alokasi waktu sinyal hijau di suatu jalur habis, barulah sinyal hijau dialihkan ke jalur lainnya sesuai urutan yang telah ditentukan. Dengan sistem ini, kendaraan yang ada di persimpangan menunggu alokasi sinyal hijau di jalur lain habis, bukan menunggu kendaraan di jalur lainnya terurai. Akibatnya, meskipun kendaraan di

jalur sinyal hijau sudah relatif senggang/terurai, alokasi sinyal hijau tetap di jalur tersebut. Tidak dialihkan ke jalur yang lebih padat. Hal ini tentunya membuat waktu tunggu menjadi percuma.

Sistem kendali lampu lalu lintas menggunakan pewaktuan statis sering kali mengakibatkan penumpukan kendaraan di tengah persimpangan. Hal ini disebabkan oleh sistem pewaktuan statis yang tidak dapat mempertimbangkan kepadatan di jalur tujuan.

Sebelumnya, Marzuki Khalid, See Chin Liang dan Rubiyah Yusof dari Universiti Teknologi Malaysia telah melakukan penelitian mengenai kendali lampu lalu lintas menggunakan logika fuzzy. Hasilnya didapatkan beradaptasi dengan kepadatan di setiap jalur dan dapat berinteraksi dengan persimpangan lain yang berdekatan [1].

Muhamamd Aria dari Universitas Komputer Indonesia telah meneliti bagaimana logika fuzzy dapat mengatur lalu lintas dengan 9 persimpangan menggunakan logika fuzzy. Hasilnya diperoleh waktu tunggu rata-rata yang dihasilkan logika fuzzy lebih ringkas dibandingkan dengan pewaktuan statis [2].

Setianto dan kawan-kawan dari Universitas Padjadjaran melakukan penelitian serupa, kemudian didapatkan hasil bahwa logika fuzzy dapat mengurangi waktu tunggu rata-rata hingga 5% dan kinerja sistem mencapai 72% lebih tinggi dibandingkan dengan sistem konvensional [3].

Penelitian yang dilakukan Penulis terfokus pada 2 persimpangan. Simulator yang dibuat juga memiliki 3 mode kerja, yaitu logika fuzzy, prioritas, dan mode *maintenance*. Mode *maintenance* adalah mode pengaturan lampu lalu lintas menggunakan pewaktuan statis. Tujuan tetap diadakannya sistem pewaktuan statis adalah sebagai redundansi jika terjadi masalah pada sensor yang mendeteksi kepadatan jalur. Kemudian mode kerja prioritas digunakan untuk memaksa sistem memberikan sinyal hijau ke jalur dimana kendaraan berprioritas berada. Jenis-jenis kendaraan yang termasuk dalam kendaraan prioritas dapat dilihat di Pasal 134 UU RI, Nomor 22 Tahun 2009.

Kinerja sistem kendali lampu lalu lintas menggunakan logika fuzzy diuji dengan 2 cara. Cara pertama adalah dengan membandingkan kinerja logika fuzzy dengan kinerja pewaktuan statis. Cara kedua adalah dengan memberikan gangguan berupa kendaraan prioritas. Parameter yang menjadi acuan keberhasilan sistem adalah jika lama waktu tunggu rata-rata dan jumlah antrean kendaraan lebih ringkas dibandingkan dengan pewaktuan statis. Pergantian sinyal di simulator ini sudah disesuaikan dengan kondisi *real* saat ini, yaitu terdapat kondisi dimana

semua jalur berada dalam kondisi sinyal merah selama 2 detik

2. METODE DAN BAHAN

2.1. Area Traffic Control Station (ATCS)

Sejak bulan November tahun 2016, Departemen Perhubungan Kota Bandung bekerja sama dengan PT Marktel memiliki suatu sistem untuk mengatur lalu lintas di Kota Bandung. Sistem ini dinamakan *Area Traffic Control station* atau yang lebih dikenal dengan istilah ATCS. ATCS adalah suatu sistem pengendalian lalu lintas berbasis teknologi informasi pada suatu kawasan yang bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja jaringan jalan melalui optimasi dan koordinasi pengaturan lampu lalu lintas di setiap persimpangan [4]. Dengan adanya ATCS saat ini, Dinas Perhubungan dapat mengendalikan dan menentukan pewaktuan statis pada lampu lalu lintas, memberikan himbauan/teguran pada pengendara yang kurang disiplin di persimpangan, serta dapat mengetahui rekaman data lalu lintas yang terjadi (kecelakaan/pelanggaran/ kondisi lalu lintas, dsb).

2.2. Logika Fuzzy

Fuzzy dalam Bahasa Indonesia memiliki arti kabur/samar atau tidak jelas [5]. Sedangkan Logika *Fuzzy* dalam ilmu computer adalah suatu teori himpunan *fuzzy* yang menghimpun nilai-nilai yang memiliki unsur ketidakpastian (*uncertainty*) dan ketidaktepatan (*imprecise*) [6], seperti panas, tinggi, jauh, cepat dan sebagainya. Logika *Fuzzy* pertama kali diperkenalkan oleh Lotfi Zadeh, seorang Profesor dan Kepala Departemen Teknik Elektro di Universitas California di Berkeley pada tahun 1965 [7]. Logika *Fuzzy* juga merupakan kelanjutan dari logika Boolean, dimana logika Boolean hanya memiliki 2 keadaan antara 0 atau 1, Ya atau Tidak, Benar atau Salah, dan sejenisnya. Sementara Logika *Fuzzy* memiliki rentang nilai riil antara 0 hingga 1 seperti terlihat pada **Error! Reference source not found..** Logika fuzzy dapat menjembatani bahasa manusia yang menekankan pada makna/arti dengan bahasa mesin yang presisi.

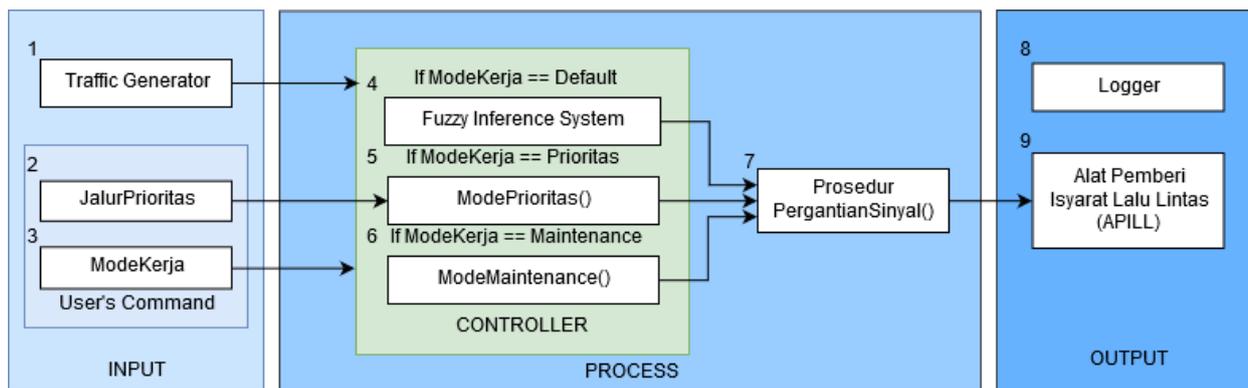


Gambar 1. Logika Boolean dan Logika Fuzzy

2.3. Arsitektur Sistem

Sistem ini terdiri dari 4 (empat) komponen utama, yaitu *Traffic Generator*, Perintah User untuk mengatur mode kerja, Controller, dan APILL sebagai

keluaran. Arsitektur keseluruhan sistem dapat dilihat di Gambar 2.

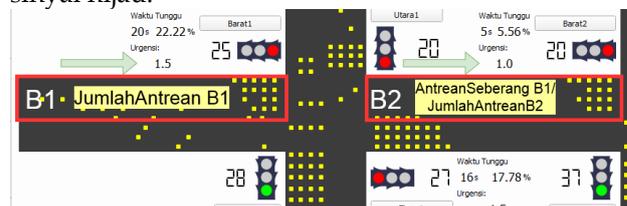


Gambar 2. Arsitektur Sistem

Tabel 1. Keterangan Arsitektur Sistem

No.	Keterangan
1	<i>Traffic Generator</i> : Digunakan untuk mengatur debit kendaraan yang masuk ke lengan U1, B1, S1, U2, S2 dan T2.
2	Jalur Prioritas: Masukan untuk memaksa sistem memberikan sinyal hijau ke suatu jalur. Masukan ini akan diolah sistem ketika ModeKerja = Priority.
3	ModeKerja: Variabel yang ditentukan oleh user untuk menentukan bagaimana simulator mengatur sinyal APILL.
4	Mode Kerja <i>Default</i> : Secara <i>default</i> sistem akan mengatur sinyal APILL menggunakan <i>Fuzzy Inference System</i> dengan masukan berupa data jumlah kendaraan setiap jalur dan lama waktu tunggu.
5	Mode Kerja <i>Priority</i> : Mekanisme yang bekerja ketika kendaraan berprioritas hendak melintas.
6	ModeKerja <i>Maintenance</i> : Mode ini berguna ketika sensor yang digunakan sebagai data masukan mode <i>Default</i> mengalami gangguan. Ketika mode ini bekerja, sistem akan mengatur sinyal APILL menggunakan pewaktuan statis.
7	Prosedur pergantian sinyal dirancang agar pergantian sinyal dapat berlangsung dengan aman.
8	Logger mencatat semua data kendaraan yang masuk dan keluar, masukan dari pengguna, dan data yang diolah oleh <i>controller</i> .
9	APILL menampilkan keluaran dari sistem.

kendaraan yang mengantre, akan semakin tinggi nilai urgensi. Parameter kedua adalah jumlah kendaraan di jalur seberang yang dinamakan *AntreanSeberang*. Parameter ini digunakan agar jumlah kendaraan yang masuk ke jalur seberang tidak melebihi kapasitas maksimal jalur tersebut. Semakin bertambah jumlah kendaraan di jalur seberang, maka nilai urgensi akan semakin berkurang. Selain dua parameter tersebut, terdapat parameter ketiga yaitu lama waktu tunggu. Parameter ini berlaku untuk jalur-jalur dengan kondisi sinyal merah. Parameter ini berguna agar jalur dengan jumlah kendaraan yang sedikit tidak menunggu sangat lama untuk mendapatkan giliran sinyal hijau.

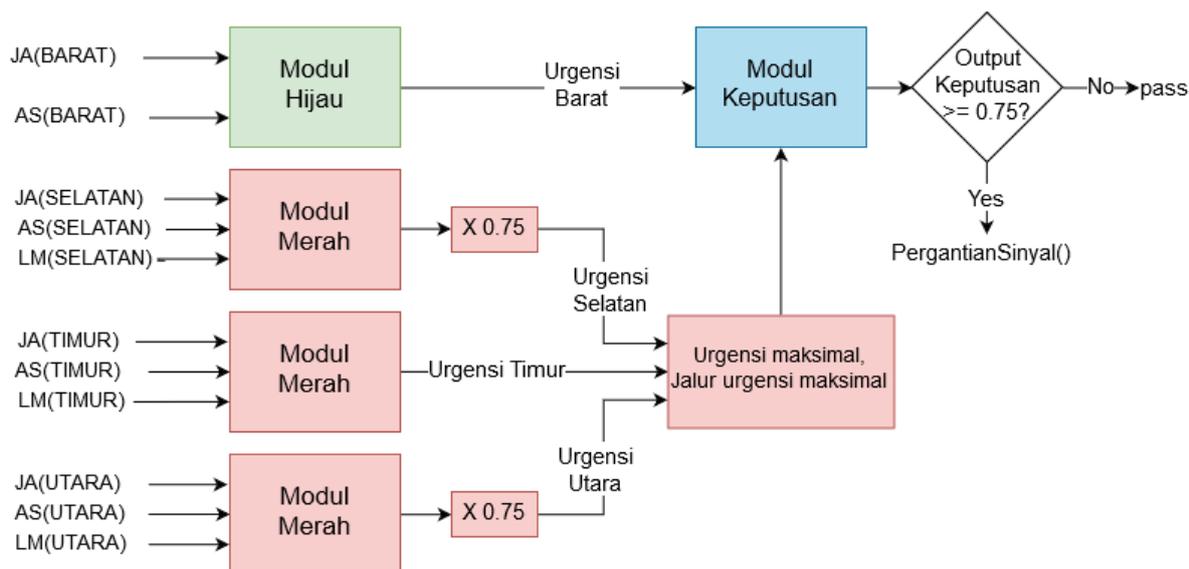


Gambar 3. Ilustrasi JumlahAntrean dan AntreanSeberang

Penghitungan nilai urgensi antara jalur sinyal hijau berbeda dengan jalur sinyal merah. Masing-masing jalur yang sedang dalam kondisi sinyal merah dibandingkan dengan jalur sinyal hijau. Data pada jalur sinyal merah diproses oleh Modul Merah, sedangkan untuk jalur hijau diproses oleh Modul Hijau. Hasil keluaran Modul Merah dan Modul Hijau menjadi masukan untuk Modul Keputusan. Modul Keputusan mempertimbangkan apakah sinyal hijau dialihkan ke jalur lain atau tetap untuk jalur hijau saat ini.

2.4. Perancangan *Fuzzy Inferency System*

Kendali sinyal APILL menggunakan *Fuzzy Inference System* ditentukan berdasarkan nilai urgensi setiap jalur. Parameter pertama adalah jumlah kendaraan yang mengantre. Parameter ini dinamakan *JumlahAntrean* Semakin banyak jumlah



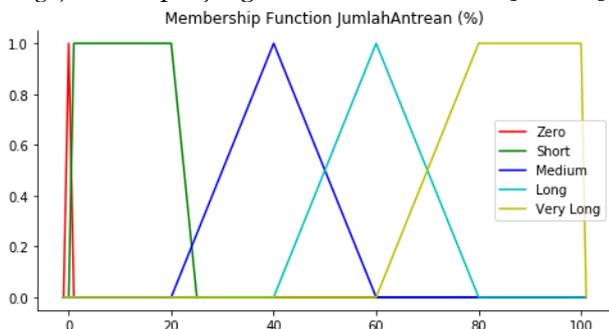
Gambar 4. Diagram Blok Fuzzy Inference System

A. Perancangan Modul Hijau

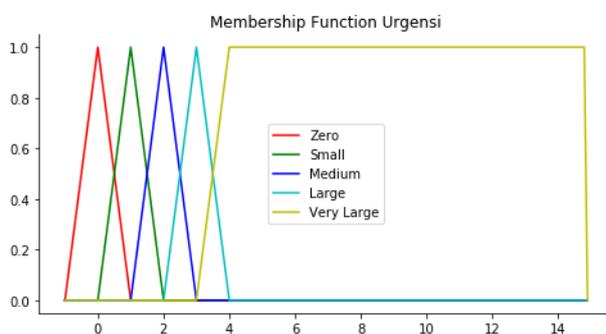
Modul Hijau berfungsi untuk menghitung nilai urgensi jalur yang sedang dalam kondisi sinyal hijau. Modul ini memiliki dua masukan yaitu JumlahAntrean dan AntreanSeberang. Variabel panjang antrean pada JumlahAntrean dan AntreanSeberang dibagi menjadi 5 kategori, yaitu: Z (Zero): ketika jumlah kendaraan = 0; S (Short): $1\% \leq$ panjang antrean $\leq 25\%$ atau [1, 25]; M (Medium): $20\% \leq$ panjang antrean $\leq 60\%$ atau [20, 60]; L (Long): $40\% \leq$ panjang antrean $\leq 80\%$ atau [40, 80]; VL (Very Long): $60\% \leq$ panjang antrean $\leq 100\%$ atau [60, 100].

Selain dua masukan, Modul Hijau memiliki satu keluaran berupa variable, yaitu nilai urgensi. Variabel urgensi nantinya menjadi masukan untuk Modul Keputusan. Variabel urgensi dibagi menjadi 5 kategori, yaitu:

Z (Zero): ketika jumlah kendaraan = 0; S (Small): $1\% \leq$ panjang antrean $\leq 25\%$ atau [1, 25]; M (Medium): $20\% \leq$ panjang antrean $\leq 60\%$ atau [20, 60]; L (Large): $40\% \leq$ panjang antrean $\leq 80\%$ atau [40, 80]; VL (Very Large): $60\% \leq$ panjang antrean $\leq 100\%$ atau [60, 100].



Gambar 5. Membership Function JumlahAntrean dan AntreanSeberang



Gambar 6. Membership Function Keluaran Urgensi

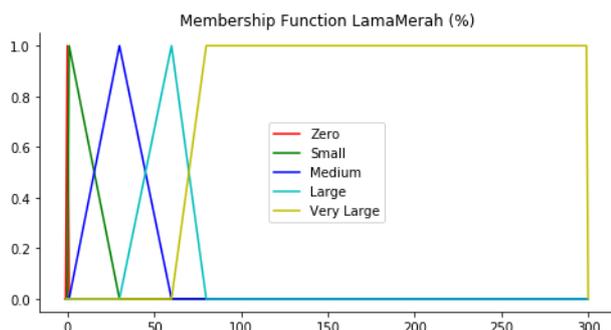
Tabel 2. Fuzzy Rule Modul Hijau

		JumlahAntrean				
		Z	S	M	L	VL
AntreanSeberang	Z	Z	S	M	L	VL
	S	Z	S	M	L	L
	M	Z	S	S	M	M
	L	Z	S	S	S	S
	VL	Z	Z	Z	Z	Z

B. Perancangan Modul Merah

Berbeda dengan Modul Hijau, Modul Merah memiliki satu masukan tambahan untuk menghitung nilai urgensi. Fungsi Modul Merah adalah untuk menghitung nilai urgensi ke tiga jalur dengan kondisi sinyal merah. Kaidah-kaidah di Modul Merah dirancang agar pertambahan nilai urgensi tidak terlalu melonjak tinggi seiring meningkatnya durasi kendaraan menunggu giliran mendapatkan sinyla hijau. Lama waktu sinyal merah adalah 90 detik. Namun fungsi keanggotaan dibuat agar dapat mengakomodasi LamaMerah hingga 270 detik (300% dari 90 detik). Dengan begini, sistem masih dapat bekerja apabila kendaraan berprioritas menyebabkan

LamaMerah melebihi 90 detik.



Gambar 7. Membership Function LamaMerah

Tabel 3. Fuzzy Rule Modul Merah

		<u>LamaMerah</u> = Z					
		<u>JumlahAntrean</u>					
<u>AntreanSeberang</u>		Z	S	M	L	VL	
	Z	Z	S	S	S	M	
	S	Z	S	S	S	S	
	M	Z	S	S	S	S	
	L	Z	S	S	S	S	
	VL	Z	Z	Z	Z	Z	

		<u>LamaMerah</u> = S					
		<u>JumlahAntrean</u>					
<u>AntreanSeberang</u>		Z	S	M	L	VL	
	Z	Z	S	S	M	L	
	S	Z	S	S	S	M	
	M	Z	S	S	S	S	
	L	Z	S	S	S	S	
	VL	Z	Z	Z	Z	Z	

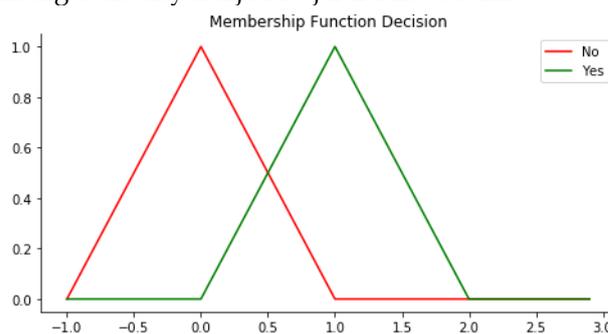
		<u>LamaMerah</u> = M					
		<u>JumlahAntrean</u>					
<u>AntreanSeberang</u>		Z	S	M	L	VL	
	Z	Z	S	M	L	VL	
	S	Z	S	M	M	L	
	M	Z	S	S	M	M	
	L	Z	S	S	S	S	
	VL	Z	Z	Z	Z	Z	

		<u>LamaMerah</u> = L					
		<u>JumlahAntrean</u>					
<u>AntreanSeberang</u>		Z	S	M	L	VL	
	Z	Z	M	L	VL	VL	
	S	Z	M	L	L	VL	
	M	Z	M	M	L	L	
	L	Z	S	M	M	L	
	VL	Z	Z	Z	Z	Z	

		<u>LamaMerah</u> = VL					
		<u>JumlahAntrean</u>					
<u>AntreanSeberang</u>		Z	S	M	L	VL	
	Z	Z	L	VL	VL	VL	
	S	Z	L	L	VL	VL	
	M	Z	M	L	L	VL	
	L	Z	M	M	L	L	
	VL	Z	Z	Z	Z	Z	

C. Perancangan Modul Keputusan

Modul ketiga adalah Modul Keputusan. Modul ini memiliki masukan dari keluaran kedua modul sebelumnya (Modul Merah dan Modul Hijau). Modul ini membandingkan kedua masukan dan memilih masukan yang memiliki nilai urgensi lebih tinggi. Keluaran dari modul ini berupa "Yes" atau "No". Ketika keluaran berupa "Yes", artinya modul memerintahkan kepada sistem untuk mengubah sinyal hijau ke jalur lainnya. Sebaliknya ketika modul mengeluarkan "No" artinya sistem tidak perlu mengubah sinyal hijau ke jalur lain saat ini.



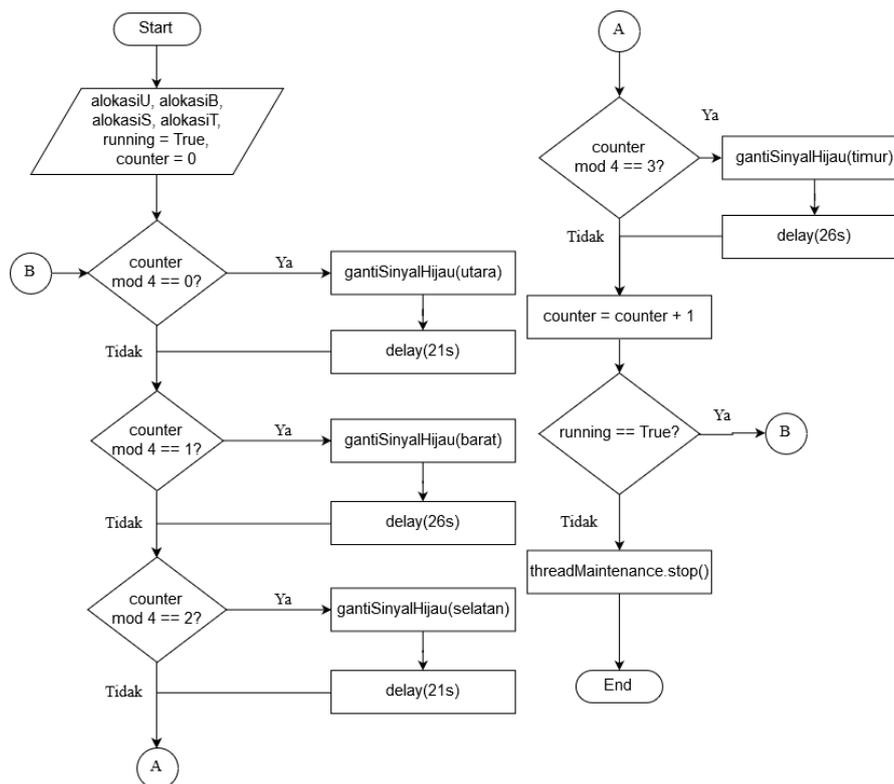
Gambar 8. Membership Function Modul Keputusan

Tabel 4. Fuzzy Rule Modul Keputusan

		<u>Urgensi Hijau</u>					
		Z	S	M	L	VL	
<u>Urgensi Merah</u>	Z	N	N	N	N	N	
	S	Y	N	N	N	N	
	M	Y	Y	N	N	N	
	L	Y	Y	Y	N	N	
	VL	Y	Y	Y	Y	N	

2.5. Perancangan Mode Kerja Maintenance

Mode Kerja Maintenance dibuat sebagai cadangan apabila sensor yang digunakan untuk mengambil data kepadatan persimpangan tidak berfungsi. Mode kerja Maintenance akan mengatur persimpangan dengan menggunakan pewaktuan statis.



Gambar 9. Perancangan Mode Kerja Maintenance

2.6. Pengujian FIS vs Pewaktuan Statis

Pengujian pertama dilakukan dengan cara melewati sejumlah mobil ke seluruh jalur dengan frekuensi yang sama. Mobil yang hendak melewati persimpangan diatur menggunakan *Fuzzy Inference System* (FIS) dan pewaktuan statis. Kemudian hasil pengujian menjadi dasar untuk melakukan analisa apakah sistem kendali sinyal APILL menggunakan FIS dapat menghasilkan waktu tempuh/waktu tunggu dan jumlah antrean yang lebih ringkas dibandingkan dengan menggunakan pewaktuan statis (*fixed time*). Sistem ini diuji dengan beberapa kasus berbeda, yaitu:

- a. 2300 mobil/jam.
- b. 2200 mobil/jam.
- c. 2100 mobil/jam.
- d. 2000 mobil/jam.
- e. 1900 mobil/jam.
- f. 1800 mobil/jam

2.7. Pengujian Mode Kerja Prioritas

Pengujian mode kerja *Priority* dilakukan dengan memberikan gangguan kepada sistem kendali sinyal APILL menggunakan FIS berupa kendaraan berprioritas yang memaksa sistem untuk memberikan sinyal hijau ke jalur kendaraan prioritas. Kendaraan berprioritas dilewatkan melalui jalur B1 dan keluar melalui jalur B2 pada kasus 2200 mobil/jam.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 5. Hasil Waktu Tunggu Rata-rata Logika Fuzzy vs Pewaktuan Statis (a)

Case	Jalur	Logika Fuzzy	Pewaktuan Statis	Selisih (s)	
1.a	U1	23.36	37.52	-14.16	
	B1	24.77	33.10	-8.33	
	S1	23.59	37.58	-13.99	
	T1	18.93	57.11	-38.18	
	U2	24.94	37.55	-12.61	
	B2	20.53	57.42	-36.89	
	S2	22.64	37.62	-14.98	
	T2	23.30	33.16	-9.86	
	Rata-rata		22.76	41.38	-18.63
	1.b	U1	23.94	36.86	-12.92
B1		22.87	32.30	-9.43	
S1		23.68	36.77	-13.09	
T1		17.68	56.46	-38.78	
U2		25.97	36.96	-10.99	
B2		17.05	56.54	-39.49	
S2		24.65	36.82	-12.17	
T2		21.88	32.62	-10.74	
Rata-rata			22.22	40.67	-18.45

Tabel 6 Hasil Waktu Tunggu Rata-rata Logika Fuzzy vs
 Pewaktuan Statis (b)

Case	Jalur	Logika Fuzzy	Pewaktuan Statis	Selisih (s)
1.c	U1	21.57	36.68	-15.11
	B1	21.69	31.81	-10.12
	S1	21.85	36.14	-14.29
	T1	18.35	56.94	-38.59
	U2	22.51	36.71	-14.20
	B2	17.63	57.71	-40.08
	S2	21.77	36.30	-14.53
	T2	21.19	31.95	-10.76
	Rata-rata	20.82	40.53	-19.71
1.d	U1	20.95	36.12	-15.17
	B1	23.03	31.39	-8.36
	S1	23.61	35.59	-11.98
	T1	18.33	56.63	-38.30
	U2	23.75	36.08	-12.33
	B2	18.73	56.80	-38.07
	S2	22.53	35.74	-13.21
	T2	24.62	31.46	-6.84
	Rata-rata	21.94	39.98	-18.03
1.e	U1	20.61	36.38	-15.77
	B1	21.33	32.12	-10.79
	S1	21.41	35.89	-14.48
	T1	12.68	55.88	-43.20
	U2	21.10	36.45	-15.35
	B2	21.57	56.30	-34.73
	S2	21.20	36.00	-14.80
	T2	20.89	31.83	-10.94
	Rata-rata	20.10	40.11	-20.01
1.f	U1	22.59	35.81	-13.22
	B1	22.76	30.93	-8.17
	S1	20.45	35.44	-14.99
	T1	21.99	56.91	-34.92
	U2	20.36	35.79	-15.43
	B2	22.75	56.79	-34.04
	S2	21.85	35.45	-13.60
	T2	22.92	31.27	-8.35
	Rata-rata	21.96	39.80	-17.84

Tabel 7. Hasil Antrean Rata-rata Logika Fuzzy vs
 Pewaktuan Statis (a)

Cas e	Jalur	Logika Fuzzy	Pewaktuan Statis	Selis ih
1.a	U1	24.35	31.24	-6.89
	B1	27.21	32.09	-4.88
	S1	24.24	31.10	-6.86
	T1	23.24	45.81	- 22.58
	U2	25.21	31.22	-6.00
	B2	24.24	45.86	- 21.62
	S2	23.71	31.12	-7.41
	T2	26.39	32.09	-5.70
	Rata-rata	24.82	35.07	- 10.24
1.b	U1	24.68	32.38	-7.69
	B1	26.21	33.23	-7.02
	S1	24.23	32.24	-8.01
	T1	22.02	47.09	- 25.07
	U2	25.97	32.46	-6.49
	B2	22.18	47.33	- 25.14
	S2	24.90	32.27	-7.36
	T2	25.70	33.34	-7.63
	Rata-rata	24.49	36.29	- 11.80
1.c	U1	21.79	30.84	-9.05
	B1	24.11	31.43	-7.32
	S1	20.24	30.45	- 10.21
	T1	22.45	45.34	- 22.89
	U2	21.83	30.84	-9.00
	B2	20.43	45.62	- 25.20
	S2	21.35	30.52	-9.17
	T2	23.36	31.53	-8.17
	Rata-rata	21.94	34.57	- 12.62
1.d	U1	20.00	29.27	-9.27
	B1	23.25	29.90	-6.65
	S1	21.41	28.80	-7.39
	T1	19.37	42.90	- 23.53
	U2	21.46	29.22	-7.76
	B2	19.47	43.08	- 23.61
	S2	20.81	28.88	-8.07

	T2	24.07	29.79	-5.72
	Rata-rata	21.23	32.73	-11.50
	U1	19.49	27.33	-7.84
	B1	21.62	28.06	-6.44
	S1	19.57	26.95	-7.38
	T1	16.04	39.73	-23.70
1.f	U2	19.69	27.34	-7.65
	B2	21.57	39.83	-18.25
	S2	19.50	27.01	-7.52
	T2	21.56	27.82	-6.26
	Rata-rata	19.88	30.51	-10.63

Selama proses simulasi berlangsung, terdapat error yang dihasilkan oleh sistem kendali APILL menggunakan logika fuzzy. Parameter error adalah apabila terdapat kendaraan yang menunggu lebih dari 90 detik. Dari Tabel sebelumnya terlihat bahwa di pada kasus 2100 mobil/jam dan 1800 mobil/jam terdapat lama waktu tunggu yang melebihi 90 detik. Setelah dilakukan perhitungan persentase error, didapatkan nilai error yang sangat kecil seperti yang tersaji pada **Error! Reference source not found.**

Tabel 8. Error

Case	Jalur	Waktu Tunggu Maksimal (s)	$\geq 90s$ (mobil)	Error (%)
1.c	B1	95	4	0.19
1.f	U1	98	5	0.28

Penyesuaian kinerja fuzzy dengan persimpangan, dan lama durasi sinyal merah di suatu persimpangan dilakukan dengan uji coba menggunakan 2200 kendaraan/jam. Dibawah ini terlihat penyebaran data antrian kendaraan terbanyak berada di rentang nilai antara 6.9 hingga 38.

Penyebaran data waktu tunggu rata-rata yang dihasilkan oleh fungsi keanggotaan versi 3 juga berkisan antara rentang 0 hingga 48 detik. Dari data pada **Error! Reference source not found.** dan **Error! Reference source not found.** tidak menunjukkan adanya kendaraan yang menunggu lebih dari 90 detik.

4. KESIMPULAN

1. Kinerja APILL menggunakan logika fuzzy dapat memberikan sinyal hijau yang dapat menyesuaikan dengan kepadatan dan lama waktu tunggu disetiap lengan persimpangan.

2. Kinerja APILL menggunakan logika fuzzy dapat mengurangi lama waktu tunggu rata-rata dan jumlah antrian di masing-masing jalur di persimpangan.

3. Sistem kendali sinyal APILL menggunakan logika fuzzy dapat memberikan lama waktu tempuh yang merata di semua jalur yang ada di persimpangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [M. Khalid, S. C. Liang and R. Yusof, "Control of a 1 Complex Traffic Junction Using Fuzzy,"] *Conference Paper*, vol. August, 2004.
- [M. Aria, "Fuzzy Logic System for Coordinated 2 Traffic Signal Control with Dynamic Phase Selection," *TELEKONTRAN*, 2017.
- [SETIANTO, L. K. MEN and B. M. WIBAWA, 3 "PENGATURAN LAMPU LALULINTAS BERBASIS FUZZY," *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, vol. 01, 2017.
- [Direktorat Jenderal Perhubungan Darat - 4 Kementerian Perhubungan Republik Indonesia ,] "ATCS di beberapa Provinsi dan Kota di Indonesia," Direktorat Jenderal Perhubungan Darat , 2 Agustus 2013. [Online]. Available: <http://hubdat.dephub.go.id/berita/1222-atcs-di-beberapa-provinsi-dan-kota-di-indonesia>. [Accessed 14 November 2017].
- [J. M. Echols and H. Shadily, *Kamus Inggris 5 Indonesia*, Jakarta: PT Gramedia, 1976.
- [R. Munir, "Pengantar Logika Fuzzy," [Online]. 6 Available:] <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiwIP8oYngAhVRa94KHfzrBboQFjAAegQICRAC&url=http%3A%2F%2Finformatika.stei.itb.ac.id%2F~rinaldi.munir%2FMetNum%2F2011-2012%2FPengantar%2520Logika%2520Fuzzy.pdf&usq=AOv>. [Accessed 25 Januari 2019].
- [M. Negnevitsky, *Artificial Intelligence A Guide to 7 Intelligent Systems Second Edition*, Essex:] Pearson Education, 2005.
- [R. Munir, "Sistem Inferensi Fuzzy," 2011. [Online]. 8 Available:] <http://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/MetNum/2011-2012/Sistem%20Inferensi%20Fuzzy.pdf>. [Accessed 8 Mei 2018].
- [mathworks.com, "What is Fuzzy Logic? - 9 MATLAB & Simulink," [Online]. Available:] <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/what>

- is-fuzzy-logic.html. [Accessed 17 November 2017].
- [B. P. S. Kota Bandung, Kota Bandung Dalam 1 Angka 2017, Bandung: BPS Kota Bandung, 2017. 0]
- [D. R. -. detikOto, "Jangan Salah Sebut, Lampu 1 Lalin Namanya APILL Bukan Lampu Merah," 1 detikOto, 17 April 2018. [Online]. Available:] <https://oto.detik.com/berita/d-3975567/jangan-salah-sebut-lampu-lalin-namanya-apill-bukan-lampu-merah>. [Accessed 6 Mei 2018].
- [M. Aria. [Online]. Available: 1 <https://elib.unikom.ac.id/download.php?id=426274>. [Accessed 16 Februari 2019].]
- [Ahadi, 1 "<https://otomotif.kompas.com/read/2018/03/093/084200015/10-penyebab-macet-dan-kurangnya-penyelesaian>," www.ilmusipil.com, 5 November 2011. [Online]. Available: <http://www.ilmusipil.com/penyebab-kemacetan-jalan-raja>. [Accessed 6 Mei 2018].]
- [Direktorat Jenderal Bina Marga & Direktorat 1 Bina Jalan Kota, Manual Kapasitas Jalan 4 Indonesia (MKJI), SWEROAD, 1997.]
- ["Kemacetan - Wikipedia bahasa Indonesia, 1 ensiklopedia bebas," 8 Februari 2019. [Online]. 5 Available:] <https://id.wikipedia.org/wiki/Kemacetan>. [Accessed 16 Februari 2019].