

Optimisasi Koloni Semut dan Sistem Fuzzy untuk Kendali Lampu Lalu Lintas Pintar

Wrastawa Ridwan
Jurusan Teknik Elektro
Universitas Negeri Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
wridwan@ung.ac.id

Yuliyanti Kadir
Jurusan Teknik Sipil
Universitas Negeri Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
yuliyantikadir@ung.ac.id

Ifan Wiranto
Jurusan Teknik Elektro
Universitas Negeri Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
ifan_te@ung.ac.id

Diterima : Mei 2022
Disetujui : Juni 2022
Dipublikasi : Juli 2022

Abstrak— Pola pengaturan lampu lalu lintas waktu tetap yang tidak mempertimbangkan kondisi aktual persimpangan bisa menimbulkan kemacetan. Kemacetan dapat menyebabkan banyak kerugian, diantaranya yaitu banyaknya waktu terbuang dan bahan bakar yang habis dengan sia-sia. Masalah ini dapat diatasi dengan pengatur lampu lalu lintas pintar yaitu sebuah sistem pengatur lampu lalu lintas yang mampu beradaptasi dengan kondisi setiap ruas jalan pada persimpangan. Pada penelitian ini telah dilakukan pengembangan sistem pengatur lampu lalu lintas pintar berbasis pada logika fuzzy bertingkat dan algoritma optimisasi koloni semut (Ant Colony Optimization). Pada Logika Fuzzy Bertingkat, keluaran dari sistem logika fuzzy tahap pertama menjadi masukan ke sistem logika fuzzy tahap berikutnya. Keluaran dari Sistem Fuzzy adalah menentukan skala prioritas untuk fase hijau berikutnya. Selanjutnya algoritma optimisasi koloni semut melakukan perhitungan waktu hijau yang optimal pada fase tersebut. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan diperoleh bahwa dengan menggunakan sistem pengatur lampu lalu lintas pintar dibanding dengan sistem pengatur lampu lalu lintas waktu tetap terjadi pengurangan panjang antrian kendaraan dan waktu tunggu kendaraan.

Kata Kunci— *Logika Fuzzy, Optimisasi Koloni Semut*

Abstract— Fixed time traffic light control is a traffic light control system that does not take into account the actual conditions of the intersection, which can cause congestion. Congestion can cause a lot of losses, including a lot of wasted time and wasted fuel. This problem can be solved with a smart traffic light controller, which is a traffic light control system that is able to adapt to the conditions of each road section at the intersection. In this research, the development of smart traffic light control based on multi stage fuzzy logic and ant colony optimization (ACO) algorithm has been carried out. In multi stage fuzzy logic, the output of the first stage of the fuzzy logic becomes the input to the next stage of the fuzzy logic. The output of the fuzzy system is to determine the priority scale for the next green phase. Furthermore, Ant Colony Optimization calculates the optimal green time in that phase. Based on the simulation result, it is found that by using smart traffic light control system compared to a fixed time traffic light control system, there is a reduction in queue length and waiting time.

Keywords— *Fuzzy Logic; Ant Colony Optimization*

I. PENDAHULUAN

Penggunaan lampu lalu lintas saat ini lebih banyak diterapkan dengan menggunakan sistem pewaktuan yang statis atau sistem lampu lalu lintas yang tidak mempertimbangkan kondisi persimpangan apakah sedang banyak kendaraan ataukah sedikit. Pola pengaturan waktu yang diterapkan dari satu ruas ke ruas lainnya diatur secara bergilir. Dengan pola pengaturan tersebut apabila terdapat satu ruas jalan yang sedang padat tetapi belum mendapat giliran maka harus menunggu sampai tiba giliran untuk mendapatkan nyala lampu hijau. Penerapan sistem lampu lalu lintas seperti ini ternyata tidak menjawab kondisi yang terjadi di jalan raya, sehingga bisa menimbulkan kemacetan. Kemacetan dapat menyebabkan banyak kerugian, diantaranya yaitu banyaknya waktu terbuang dan bahan bakar yang habis dengan sia-sia. Untuk itu, sebaiknya jika dalam satu ruas jalan hanya terdapat sedikit antrian kendaraan maka lamanya lampu hijau lebih cepat dibanding jika dalam ruas tersebut banyak kendaraan. Sehingga pola pengaturan lampu lalu lintas tersebut lebih adaptif sehingga diharapkan tidak akan menimbulkan antrian yang panjang.

Secara umum, tujuan dari pengendalian lampu lalu lintas pintar adalah meningkatkan keselamatan lalu lintas di persimpangan, memaksimalkan kapasitas persimpangan, dan meminimalkan penundaan. Penelitian-penelitian tentang sistem pengatur lampu lalu lintas pintar telah dilakukan. Beberapa di antaranya adalah menggunakan Logika Fuzzy yaitu pada [1-5], menggunakan ANFIS [6], menggunakan teknologi RFID dan Logika Fuzzy [7], menggunakan Deep Learning [8], menggunakan Logika Fuzzy dan Pengendali PI [9], dan menggunakan Max-Plus MPC [10]. Beberapa penelitian di atas, terutama pada penelitian menggunakan Logika Fuzzy, belum memperhitungkan waktu hijau optimum. Oleh karena itu, pada penelitian ini ditawarkan sistem pengatur lampu lalu lintas pintar menggunakan algoritma Logika Fuzzy Bertingkat (Multi-Stage Fuzzy Logic) untuk mendapatkan waktu siklus dan waktu hijau. Selanjutnya algoritma Optimisasi Koloni Semut (Ant Colony Optimization) digunakan untuk mendapatkan waktu hijau yang optimum. Diharapkan sistem ini mampu meningkatkan

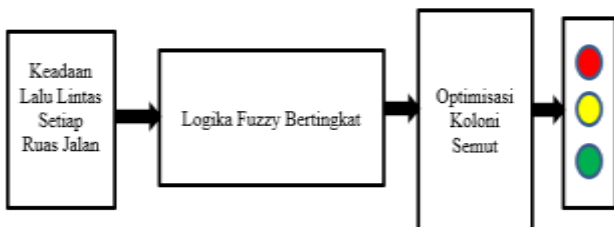
kapasitas simpang, mengurangi panjang antrian dan mengurangi waktu tunggu kendaraan.

Mekanisme proses pemetaan dari himpunan fuzzy masukan yang terdapat pada bagian premis ke himpunan fuzzy keluaran (konsekuen) berdasarkan suatu aturan disebut sebagai inferensi fuzzy. Mekanisme pemetaan dari himpunan semesta tertentu ke himpunan semesta yang lain ini dapat dihubungkan dengan menginterpretasikan aturan pada aturan dasar yang berisi aturan fuzzy sebagai suatu implikasi fuzzy. Metode interpretasi ini banyak macamnya diantaranya adalah metode Takagi-Sugeno-Kang [11], metode fuzzy Mamdani [12,13] dan metode fuzzy Tsukamoto [14].

Sistem koloni semut merupakan model perilaku semut yang diketahui dapat menemukan jarak terpendek antara sarang dan sumber makanan mereka. Semut adalah serangga sosial yang hidupnya berkoloni. Meskipun setiap individu semut bergerak secara quasi random, melakukan pekerjaan yang sederhana, akan tetapi dalam suatu koloni, semut dapat melakukan pergerakan dengan pola tertentu. Setiap pergerakan, semut mengeluarkan zat kimia yang disebut sebagai pheromone. Zat kimia inilah yang dideteksi dan digunakan sebagai alat komunikasi tidak langsung oleh semut lain [15].

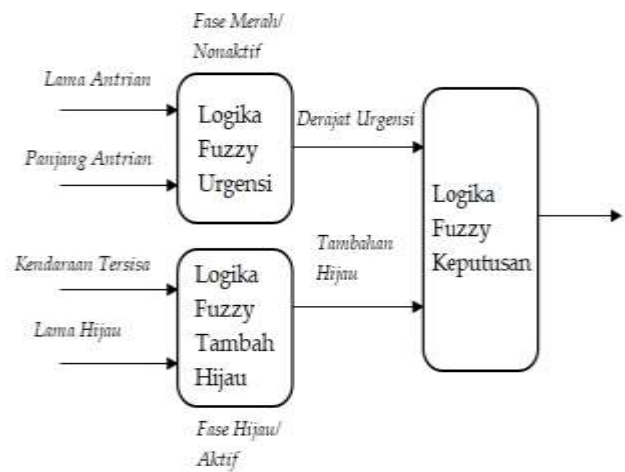
II. METODE

Pada penelitian ini diusulkan model terintegrasi antara Logika Fuzzy dan algoritma Optimisasi Koloni Semut untuk mendapatkan waktu siklus dan waktu hijau yang optimum sesuai dengan situasi saat terkini. Data tentang keadaan lalu lintas di setiap sisi jalan akan diperoleh dari kamera pengamat. Model sistem yang akan dibangun dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Model Sistem Lampu Lalu Lintas Pintar

Keadaan lalu lintas di setiap ruas jalan persimpangan menjadi masukan pada sistem logika Fuzzy. Pada Logika Fuzzy Bertingkat, keluaran dari sistem logika fuzzy tahap pertama menjadi masukan ke sistem logika fuzzy tahap berikutnya. Keluaran dari Sistem Fuzzy adalah menentukan skala prioritas untuk fase hijau berikutnya. Model Logika Fuzzy Bertingkat yang dibangun ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Model Logika Fuzzy Bertingkat

Terdapat dua tahapan logika fuzzy, tahap pertama terdiri dari dua logika fuzzy, yaitu logika fuzzy Urgensi dan logika fuzzy TambahHijau. Urgensi adalah logika fuzzy yang masukannya berasal dari jalan yang mengalami fase merah. Sedangkan masukan logika fuzzy TambahHijau berasal dari ruas jalan yang mengalami fase hijau. Tahap kedua adalah logika fuzzy Keputusan. Logika fuzzy ini berfungsi untuk memutuskan apakah akan beralih ke fase hijau untuk ruas jalan lain atau melanjutkan fase hijau pada ruas jalan yang sedang aktif.

Setelah dibangun sistem logika fuzzy bertingkat yang keluarannya adalah skala prioritas fase hijau, tahapan berikutnya adalah menentukan lamanya waktu hijau yang optimal. Tujuan penentuan lama waktu hijau yang optimal adalah untuk memberikan batas maksimum lamanya fase hijau pada ruas jalan yang sedang aktif. Lama waktu hijau yang optimal diperoleh berdasarkan pada total waktu tunggu kendaraan dalam antrian yang minimum. Total waktu tunggu kendaraan dalam antrian diperoleh berdasarkan persamaan-persamaan berikut. [16].

Ketika seluruh kendaraan dalam antrian awal akan dikeluarkan dalam antrian maka $(t_2 - t_1) \geq (q - 1)hw$, total harapan waktu tunggu dari kendaraan yang bergerak selama waktu hijau (dari t_1 ke t_2) dapat dinyatakan dalam persamaan (1),

$$J_{hijau1}(t_1, t_2) = \frac{q(q-1)hw}{2} + \sum_{i=1}^q (t_1 - t_a^i) + \frac{\lambda((q-1)hw)^2}{2} + \frac{\lambda((q-1)hw)[\lambda((q-1)hw) - 1]hw}{2} \quad (1)$$

Ketika $(t_2 - t_1) \geq (q - 1)hw$ maka tidak semua kendaraan dalam antrian awal dapat keluar dari antrian. Total waktu tunggu untuk kasus ini dapat dinyatakan dalam persamaan (2),

$$J_{hijau2}(t_1, t_2) = \frac{q_{out}(q_{out} - 1)hw}{2} + \sum_{i=1}^q (t_1 - t_a^i) + (q - q_{out})(t_2 - t_1) + \frac{\lambda(t_2 - t_1)^2}{2} \quad (2)$$

dimana,

t_1 adalah waktu awal penyalaan lampu hijau (detik)
 t_2 adalah waktu akhir penyalaan lampu hijau (detik)
 q adalah jumlah kendaraan dalam antrian pada saat t_1 (kendaraan)
 q_{out} adalah jumlah kendaraan yang keluar antrian selama fase hijau (kendaraan)
 hw adalah headway (ditetapkan selama 2 detik)
 t_a^i adalah waktu kedatangan kendaraan i (detik)
 λ adalah arus kendaraan pada ruas jalan yang akan diaktifkan (kendaraan/detik)

Algoritma Optimisasi Koloni Semut digunakan untuk mencari total waktu tunggu yang minimum di antara beberapa waktu tunggu yang dibangkitkan. Berikut adalah algoritma Optimisasi Koloni Semut untuk menemukan nilai yang minimum. Sebagai langkah awal siklus pertama, jumlah semut ditentukan sembarang diletakkan pada titik-titik yang berbeda secara acak. Sampai siklus pertama selesai, semut akan berpindah dari titik i ke titik j (yang diijinkan) dengan mempertimbangkan *visibility*, yaitu

$$\eta_j = \frac{1}{C_j} \quad (3)$$

dengan C_j adalah *cost* titik j . Semut akan menuju ke titik yang nilai *visibility*-nya terbesar. Pada kasus ini nilai C_j adalah nilai total waktu tunggu yang diperoleh dari persamaan (1) dan (2).

Setiap selesai satu siklus, semut akan meninggalkan jejak, *pheromone*, pada setiap titik yang dikunjungi. Pada siklus kedua dan seterusnya, semut-semut baru diletakkan pada salah satu titik yang telah dikunjungi oleh semut pada siklus sebelumnya, dan akan berpindah dari titik i ke titik j (yang diijinkan) berdasarkan pada suatu fungsi peluang, dinamai sebagai aturan transisi status (*state transition rule*) [17,18], yaitu,

$$p_j(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_j(t)]^\alpha [\eta_j]^\beta}{\sum_{j \in \text{dijinkan}} [\tau_j(t)]^\alpha [\eta_j]^\beta}; & \text{jika } j \in \text{dijinkan} \\ 0; & \text{jika sebaliknya} \end{cases} \quad (4)$$

dengan $\tau_j(t)$ adalah jumlah *pheromone* semut pada titik j pada saat t . Parameter α dan β digunakan untuk mengendalikan tingkat kepentingan relatif dari *pheromone* dan *visibility*. Dengan demikian, setelah suatu semut menyelesaikan perjalanannya dalam satu siklus, jumlah *pheromone* akan diperbarui menjadi :

$$\tau_j(t+N) = \rho \tau_j(t) + \Delta \tau_j(t, t+N) \quad (5)$$

dengan ρ adalah suatu koefisien yang bernilai antara 0 sampai 1, sedemikian hingga $(1-\rho)$ menunjukkan penguapan *pheromone*, dan

$$\Delta \tau_j(t, t+N) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_j^k(t, t+N), \quad (6)$$

dengan $\Delta \tau_j^k(t, t+N)$ adalah *pheromone* yang ditinggalkan oleh semut k pada titik j , pada saat antara t sampai $(t+N)$, yang ditentukan sebagai berikut :

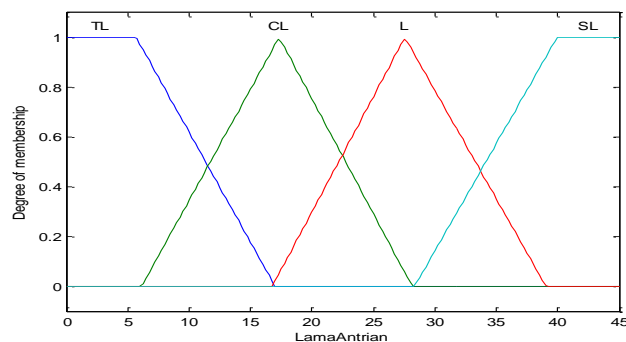
$$\Delta \tau_j^k(t, t+N) = \begin{cases} \frac{1}{L^k}; & \text{jika } j \in \text{perjalanan } k \\ 0; & \text{jika sebaliknya} \end{cases} \quad (7)$$

dengan L^k adalah jumlah *cost* pada perjalanan yang dilakukan oleh semut k . N adalah jumlah titik yang dikunjungi oleh setiap semut dalam satu siklus. Jumlah *pheromone* pada saat $t=0$ untuk setiap titik yaitu $\tau_j(0)$, ditentukan sama dengan nilai *visibility*-nya. Titik yang memiliki jumlah *pheromone* terbanyak adalah titik minimum.

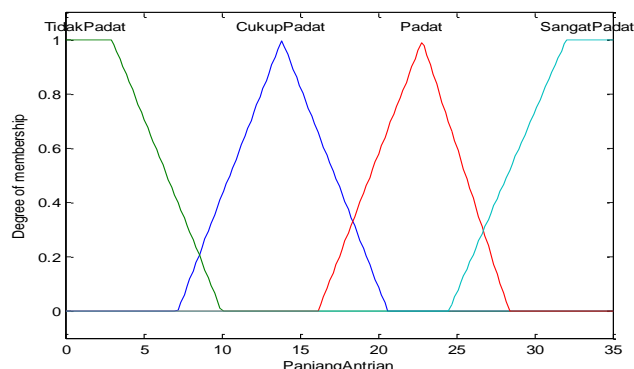
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada kasus ini, fase lampu lalu lintas yang diterapkan adalah dua fase. Ada dua tahapan logika fuzzy, tahap pertama terdiri dari dua logika fuzzy, yaitu logika fuzzy Urgensi dan logika fuzzy TambahHijau. Tahap kedua adalah logika fuzzy Keputusan. Semesta pembicaraan himpunan fuzzy dan fungsi keanggotaan fuzzy ditentukan berdasarkan analisis data yang diperoleh dari survei volume lalu lintas. Berikut ini adalah rincian dari masing-masing logika fuzzy.

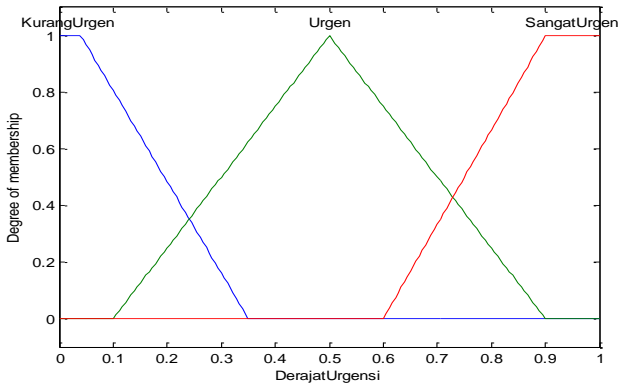
Logika fuzzy Urgensi terdiri dari dua masukan yaitu LamaAntrian dan PanjangAntrian serta keluarannya (konsekuen) adalah DerajatUrgensi. Fungsi keanggotaan masukannya dapat dilihat pada Gambar 3., dan Gambar 4., serta fungsi keanggotaan konsekuen dapat dilihat pada Gambar 5. Basis aturan Logika Fuzzy Urgensi dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 3. Fungsi Keanggotaan LamaAntrian



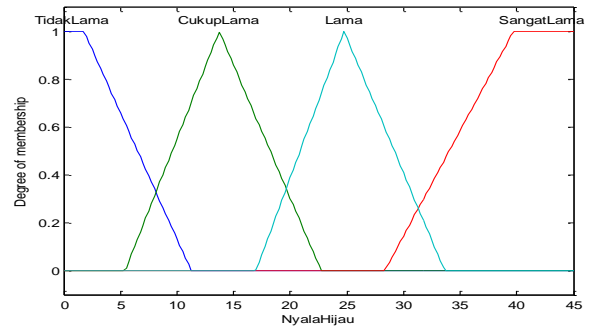
Gambar 4. Fungsi Keanggotaan PanjangAntrian



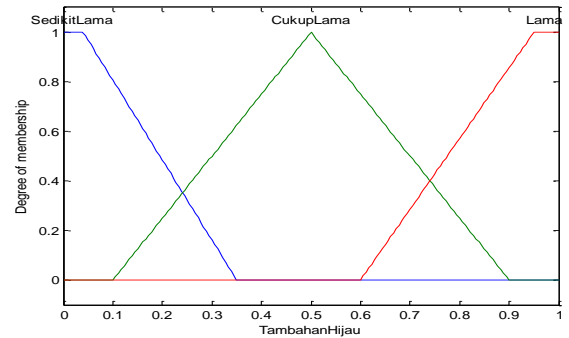
Gambar 5. Fungsi keanggotaan DerajatUrgensi

Tabel 1. Basis aturan Logika Fuzzy Urgensi

	Lama Antrian				
		Tidak Lama	Cukup Lama	Lama	Sangat Lama
Panjang Antrian	Tidak Padat	Kurang	Kurang	Kurang	Kurang
	Padat	Urgen	Urgen	Urgen	Urgen
	Cukup Padat	Kurang	Kurang	Kurang	Urgen
	Padat	Urgen	Urgen	Urgen	Sangat Urgen
	Sangat Padat	Urgen	Sangat Urgen	Sangat Urgen	Sangat Urgen



Gambar 7. Fungsi Keanggotaan NyalaHijau

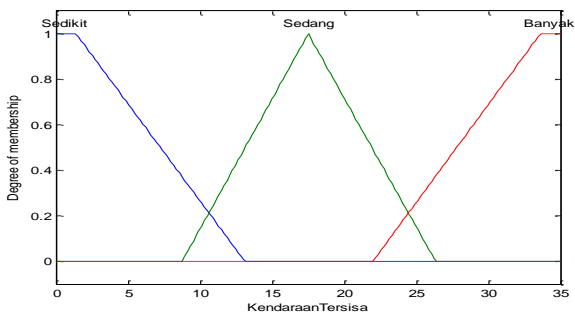


Gambar 8. Fungsi keanggotaan TambahanHijau

Tabel 2. Basis aturan Logika Fuzzy TambahHijau

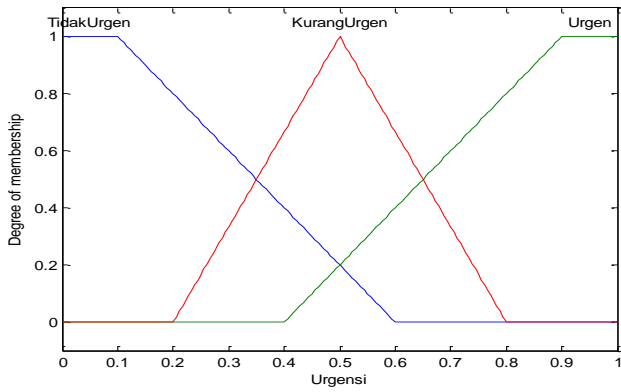
	Kendaraan Tersisa			
		Sedikit	Sedang	Banyak
Nyala Hijau	Tidak Lama	Sedikit	Cukup	Lama
	Cukup Lama	Sedikit	Cukup	Cukup
	Lama	Sedikit	Sedikit	Sedikit
	Lama	Lama	Lama	Lama
	Sangat Lama	Sedikit	Sedikit	Lama

Logika fuzzy TambahHijau terdiri dari dua masukan yaitu KendaraanTersisa dan LamaHijau serta keluarannya adalah TambahanHijau. Fungsi keanggotaan masukannya dapat dilihat pada Gambar 6., dan Gambar 7., serta fungsi keanggotaan konsekuen dapat dilihat pada Gambar 8. Basis aturan Logika Fuzzy TambahHijau ditunjukkan pada Tabel 2.

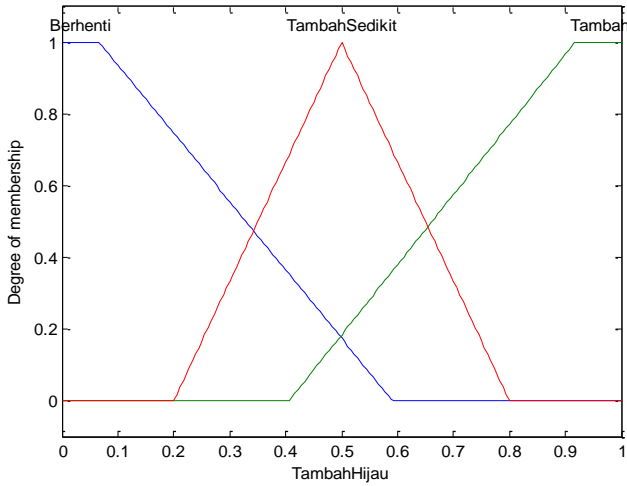


Gambar 6. Fungsi Keanggotaan KendaraanTersisa

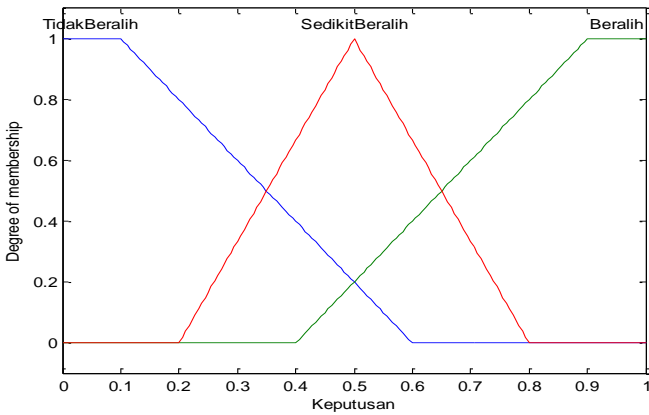
Logika fuzzy Keputusan terdiri dari dua masukan yaitu Urgensi dan TambahHijau serta keluarannya adalah Keputusan. Fungsi keanggotaan masukannya dapat dilihat pada Gambar 9., dan Gambar 10., serta fungsi keanggotaan konsekuen dapat dilihat pada Gambar 11. Basis aturan Logika Fuzzy Keputusan ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 9. Fungsi Keanggotaan Urgensi



Gambar 10. Fungsi Keanggotaan TambahHijau

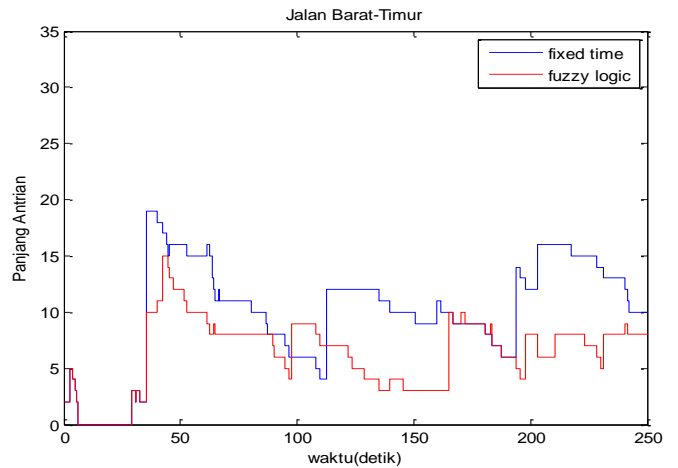


Gambar 11. Fungsi keanggotaan Keputusan

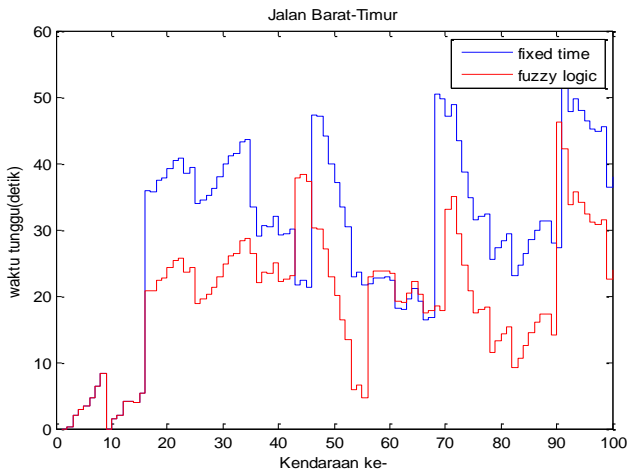
Tabel 3. Basis aturan Logika Fuzzy Keputusan

		Urgensi		
		Tidak Urgen	Kurang Urgen	Urgen
Tambah Hijau	Berhenti	Tidak Beralih	Tidak Beralih	Beralih
	Tambah	Tidak Beralih	Sedikit Beralih	Beralih
	Sedikit	Beralih	Beralih	Beralih
	Tambah	Tidak Beralih	Sedikit Beralih	Beralih

Pengujian sistem dilakukan dengan membandingkan unjuk kerja sistem pengatur lampu lalu lintas pintar dengan sistem pengatur lampu lalu lintas waktu tetap. Pada simulasi ini dibangkitkan bilangan acak distribusi Poisson dengan rerata kedatangan 1200 kendaraan/jam untuk ruas jalan Barat-Timur dan rerata kedatangan 800 kendaraan/jam untuk ruas jalan Utara-Selatan. Waktu hijau untuk ruas jalan Barat-Timur adalah 40 detik dan waktu hijau untuk ruas jalan Utara-Selatan adalah 35 detik. Selanjutnya untuk pengujian sistem pengatur lampu lalu lintas pintar yang telah dibangun, keadaan setiap ruas jalan adalah sama dengan keadaan ruas jalan pada sistem pengatur lampu lalu lintas waktu tetap. Berikut adalah grafik hasil menjalankan simulasi. Untuk ruas jalan Barat-Timur perbandingan panjang antrian antara pengatur lampu lalu lintas waktu tetap dan pengatur lampu lalu lintas pintar diperlihatkan pada Gambar 12., serta perbandingan waktu tunggu kendaraan antara pengatur lampu lalu lintas waktu tetap dan pengatur lampu lalu lintas pintar dapat dilihat pada Gambar 13.

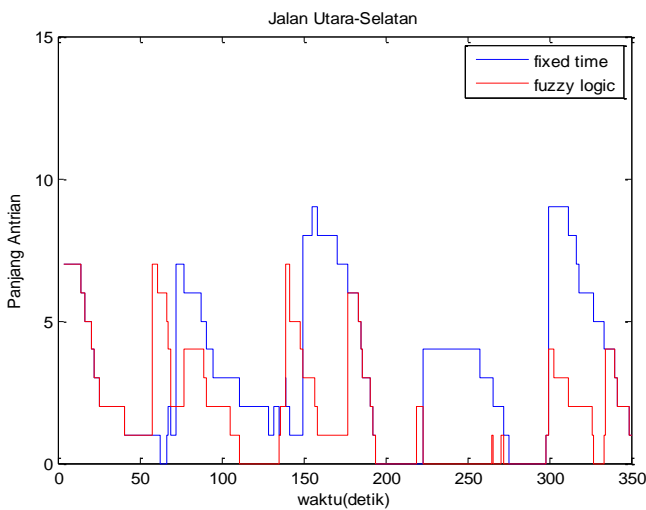


Gambar 12. Perbandingan panjang antrian antara pengatur lampu lalu lintas waktu tetap dan pengatur lampu lalu lintas pintar pada ruas jalan Barat-Timur

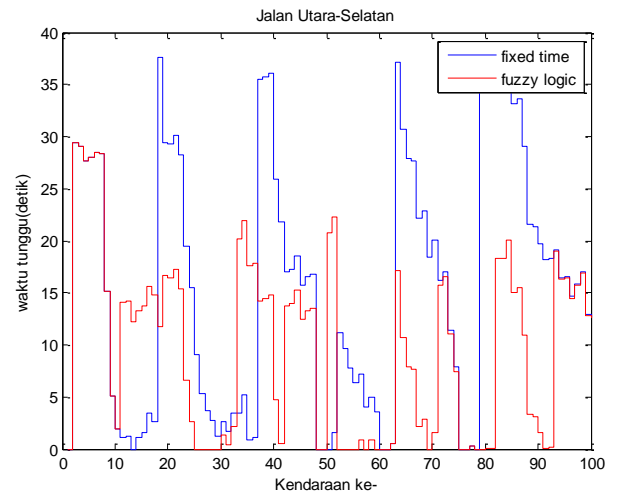


Gambar 13. Perbandingan waktu tunggu kendaraan antara pengatur lampu lalu lintas waktu tetap dan pengatur lampu lalu lintas pintar pada ruas jalan Barat-Timur

Untuk ruas jalan Utara-Selatan perbandingan panjang antrian antara pengatur lampu lalu lintas waktu tetap dan pengatur lampu lalu lintas pintar diperlihatkan pada Gambar 14., serta perbandingan waktu tunggu kendaraan antara pengatur lampu lalu lintas waktu tetap dan pengatur lampu lalu lintas pintar dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 14. Perbandingan panjang antrian antara pengatur lampu lalu lintas waktu tetap dan pengatur lampu lalu lintas pintar pada ruas jalan Utara-Selatan



Gambar 15. Perbandingan waktu tunggu kendaraan antara pengatur lampu lalu lintas waktu tetap dan pengatur lampu lalu lintas pintar pada ruas jalan Utara-Selatan

Pada Table 4. diperlihatkan unjuk kerja hasil simulasi dari pengatur lampu lalu lintas waktu tetap dan pengatur lampu lalu lintas pintar berdasarkan pada rerata panjang antrian dan rerata waktu tunggu.

Tabel 4. Perbandingan Unjuk Kerja Lampu Lalu Lintas Waktu Tetap dan Lampu Lalu Lintas Pintar

	Lampu lalu lintas waktu tetap		Lampu lalu lintas pintar		Persentasi Pengurangan	
	B-T	U-S	B-T	U-S	B-T	U-S
Panjang Antrian	9,36	4,11	6,13	2,73	34,5%	33,58%
Waktu Tunggu	29,08	15,48	17,38	10,82	40,23%	30,10%

Berdasarkan Tabel 4., diperoleh bahwa dengan menggunakan sistem pengatur lampu lalu lintas pintar dibanding dengan sistem pengatur lampu lalu lintas waktu tetap terjadi pengurangan panjang antrian kendaraan dan waktu tunggu kendaraan. Dalam kasus simulasi yang dilakukan terjadi pengurangan panjang antrian rata-rata sebesar 34,04% dan pengurangan waktu tunggu rata-rata sebesar 35,17%.

IV. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dilakukan pengembangan sistem pengatur lampu lalu lintas pintar berbasis pada logika fuzzy bertingkat dan algoritma optimisasi koloni semut. Pengatur lampu lalu lintas pintar yaitu sebuah sistem pengatur lampu lalu lintas yang mampu beradaptasi dengan kondisi setiap ruas jalan pada persimpangan. Pada Logika Fuzzy Bertingkat, keluaran dari sistem logika fuzzy tahap pertama menjadi masukan ke sistem logika fuzzy tahap berikutnya. Keluaran dari Sistem Fuzzy adalah menentukan skala prioritas untuk fase hijau berikutnya. Selanjutnya algoritma optimisasi koloni semut (Ant Colony Optimization (ACO))

menghitung waktu hijau yang optimal pada fase tersebut. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh bahwa dengan menggunakan sistem pengatur lampu lalu lintas pintar dibanding dengan sistem pengatur lampu lalu lintas waktu tetap terjadi pengurangan panjang antrian kendaraan dan waktu tunggu kendaraan. Dalam kasus simulasi yang dilakukan terjadi pengurangan panjang antrian rata-rata sebesar 34,04% dan pengurangan waktu tunggu rata-rata sebesar 35,17%.

REFERENSI

- [1] Alam, J., Pandey, M.K., & Ahmad, H., (2013): Intelligent Traffic Light Control System for Isolated Intersection Using Fuzzy Logic, Conference on Advances in Communication and Control System.
- [2] Mohanaselvi, S. & Shanpriya, B., "Application of Fuzzy Logic to Control Traffic Signals," : AIP Conference Proceedings 2112, 020045 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5112230>.
- [3] Colotta, M., Bello, L.L., & Pau G., (2015), A novel approach for dynamic traffic lights management based on Wireless Sensor Networks and multiple fuzzy logic controllers, Expert Systems with Applications 42.
- [4] Prasetyo, E.E., Wahyunggoro, O., & Sulistyono, S., (2015), Design and Simulation of Adaptive Traffic Light Controller Using Fuzzy Logic Sugeno Method , IEEE International Journal on Scientific and Research Publications 5(4)
- [5] Lamas, W.Q., Giacaglia, G.E.O., & Oliviera, E.C.,(2017), Intelligent Urban Traffic Flow Control: A Case Study on Fuzzy Logic Application, International Journal on Transportation Engineering and Technology 3(3).
- [6] Wannige, C.T., & Sonnadara, D.U.J., (2009), Application of Adaptive Neuro-Fuzzy Traffic Signal Control for Multiple Junctions, IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICHS).
- [7] Dereli, T., Cetinkaya, C., & Celic, N., (2018), Designing a Fuzzy Logic Controller for a Single Intersection: A Case Study in Gaziantep, Expert Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences 36(3)
- [8] Liang, X., & Du X.,(2018), Deep Reinforcement Learning for Traffic Light Controlling Vehicular Networks, IEEE Transactions on Vehicular Technology.
- [9] Tune, I., & Soylemez, M.T.,(2020), Intelligent Intersection Management Using Fuzzy Logic control and PI control, International Proceedings of Transport Research Arena TRA.
- [10]Joelianto, E., Sutarto,H.Y., Airulla, D.G., & Zaky, M., (2020), Design and Simulation of Traffic Light Control System at Two Intersections Using Max-Plus Model Predictive Control, International Journal of Artificial Intelligence 18(1).
- [11]Ridwan, W., Wiranto, I., & Dako, R.D.R., (2020), Ability estimation in computerized adaptive test using Mamdani Fuzzy Inference System, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 850 012004
- [12]Ridwan, W., Wiranto, I., & Dako, R.D.R., (2021), Computerized Adaptive Test based on Sugeno Fuzzy Inference System, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1098 032077
- [13]Wiranto, I., Ridwan, W., (2021), Maneuvering Target Tracking With Constant Acceleration Motion Model Using Hybrid Mamdani Fuzzy-Kalman Filter Algorithm, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 16(2)
- [14]Kusumadewi, S., & Purnomo, H.,(2013), Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan, Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta
- [15]Dorigo, M., & Stutzle, T., (2004), Ant Colony Optimization, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- [16]Renfrew, D., & Yu, X.H., (2009), Traffic Signal Control with Swarm Intelligence, 2009 Fifth International Conference on Natural Computation, IEEEExplore
- [17]Joelianto, E., Wiranto, I., (2011) An Application of Ant Colony Optimization, Kalman Filter and Artificial Neural Network for Multiple Target Tracking Problems. International Journal of Artificial Intelligence, Vol. 7, number A11.
- [18]Wiranto, I., Bonok, Z., (2018), Application of Ant System and Nearest Neighbor Kalman Filter for Multi Target Tracking in Multi Sensor Radar System, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 13(15)