

# Perancangan Sistem Kontrol Lampu Lalu Lintas Adaptif menggunakan Logika *Fuzzy* Berdasarkan Jumlah Kendaraan, Panjang Antrian, dan Jenis Kendaraan

## *Design of Adaptive Traffic Light Control System Using Fuzzy Logic, Based on Number of Vehicles, Length of Queue and Types of Vehicles*

<sup>1</sup>Yulia Nur Rahmatin\*), <sup>1</sup>Tina Ainur Rahma\*), <sup>1</sup>Mochamad Naser Ramadhan\*), <sup>1</sup>Ahmad Aminudin\*)

<sup>1</sup>Program Studi Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung 40154, Indonesia

\*) *corresponding email: yulianurrahmatin@gmail.com, aminudin@upi.edu*

### Abstrak

Kemacetan pada persimpangan bersinyal sering dipicu oleh penggunaan pengendali *fixed-time* yang tidak responsif terhadap dinamika volume lalu lintas, panjang antrian, dan heterogenitas kendaraan. Penelitian ini bertujuan merancang sistem kontrol lampu lalu lintas adaptif berbasis *Fuzzy Logic Controller* (FLC) tipe Mamdani dengan mengintegrasikan tiga variabel masukan, yaitu jumlah kendaraan, panjang antrian, dan jenis/ukuran kendaraan. Kebaruan penelitian terletak pada penggunaan variabel jenis kendaraan sebagai masukan eksplisit dalam model FLC. Sistem dirancang melalui penentuan semesta pembicaraan, fungsi keanggotaan, serta basis aturan 27 IF-THEN, kemudian diimplementasikan menggunakan Python dengan pustaka *scikit-fuzzy* melalui mekanisme inferensi MIN-MAX dan defuzzifikasi *Centroid of Area* (COA). Pengujian dilakukan terhadap 27 kombinasi input yang merepresentasikan kondisi lalu lintas dari rendah hingga padat. Hasil simulasi menunjukkan bahwa durasi lampu hijau yang dihasilkan berada pada rentang 5,09–91,60 detik, dengan kecenderungan meningkat seiring kenaikan jumlah kendaraan, panjang antrian, dan ukuran kendaraan. Dengan demikian, model yang diusulkan mampu menghasilkan keputusan durasi lampu hijau yang lebih responsif dan representatif terhadap kondisi lalu lintas campuran.

*Kata Kunci: lampu lalu lintas, logika fuzzy, Mamdani, jenis kendaraan, kontrol kemacetan.*

### Abstract

Congestion at signalized intersections is often triggered by the use of *fixed-time* controllers that are unresponsive to the dynamics of traffic volume, queue length, and vehicle heterogeneity. This study aims to design an adaptive traffic light control system based on a Mamdani-type *Fuzzy Logic Controller* (FLC) by integrating three input variables: the number of vehicles, queue length, and vehicle type/size. The novelty of this research lies in the use of the vehicle type variable as an explicit input within the FLC model. The system was designed by determining the universe of discourse, membership functions, and a base of 27 IF-THEN rules, which were then implemented in Python using the *scikit-fuzzy* library through MIN-MAX inference mechanisms and *Centroid of Area* (COA) defuzzification. Testing was conducted on 27 input combinations representing traffic conditions ranging from low to heavy. The simulation results show that the generated green light duration ranges from 5.09 to 91.60 seconds, with a tendency to increase alongside the rise in the number of vehicles, queue length, and vehicle size. Thus, the proposed model is capable of generating green light duration decisions that are more responsive and representative of mixed traffic conditions.

*Keywords: traffic light, fuzzy logic, Mamdani, vehicle type, traffic congestion.*

Makalah diterima 19 Desember 2025 – makalah direvisi 25 Februari 2026 – disetujui 09 April 2026

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



## 1 Pendahuluan

Pertumbuhan jumlah kendaraan di wilayah perkotaan yang tidak diimbangi dengan perluasan infrastruktur jalan telah menjadi penyebab utama kemacetan lalu lintas [1]. Sistem lampu lalu lintas di persimpangan, yang merupakan titik kritis dari jaringan jalan perkotaan, seringkali masih diatur dengan pola siklus tetap (*fixed-time*). Metode konvensional ini memiliki kelemahan mendasar karena tidak mempertimbangkan dinamika nyata arus kendaraan dan kondisi persimpangan yang selalu berubah [2]. Akibatnya, sering muncul antrian panjang, peningkatan waktu tunggu kendaraan, polusi udara, hingga kerugian ekonomi yang signifikan. Ketidakpastian dalam sistem lalu lintas disebabkan oleh fluktuasi jumlah kendaraan dan panjang antrian yang berubah secara dinamis, di mana hubungan antara kondisi lalu lintas dan durasi lampu hijau bersifat nonlinier

serta saling bergantung. Kompleksitas ini menjadikan sistem persimpangan sulit dimodelkan menggunakan pendekatan deterministik klasik [3]. Logika *fuzzy* dipandang sesuai untuk menangani karakteristik tersebut karena mampu merepresentasikan ketidakpastian dan perilaku nonlinier melalui aturan linguistik berbasis pengetahuan pakar [4]. Oleh karena itu, diperlukan sistem kontrol sinyal lalu lintas yang adaptif dan cerdas, yang mampu menyesuaikan durasi lampu hijau secara dinamis berdasarkan kondisi lalu lintas *real-time*. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pendekatan logika *fuzzy* mampu meningkatkan kinerja pengendalian sinyal lalu lintas dibandingkan metode konvensional, dengan penurunan waktu tunggu dan peningkatan throughput yang signifikan pada berbagai skenario lalu lintas [5],[6]. Ketidakpastian tersebut muncul akibat variasi kedatangan kendaraan, perilaku pengemudi, serta perubahan komposisi lalu lintas yang sulit dimodelkan secara deterministik. Selain itu, sistem lalu lintas bersifat *nonlinear* karena hubungan antara volume kendaraan, panjang antrian, dan waktu pengosongan tidak berbanding lurus, serta bersifat *kompleks* karena melibatkan interaksi simultan antar variabel yang saling mempengaruhi [7]. Sebagian besar penelitian terdahulu masih memodelkan sistem dengan jumlah variabel masukan yang terbatas, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kompleksitas kondisi lalu lintas nyata di persimpangan.

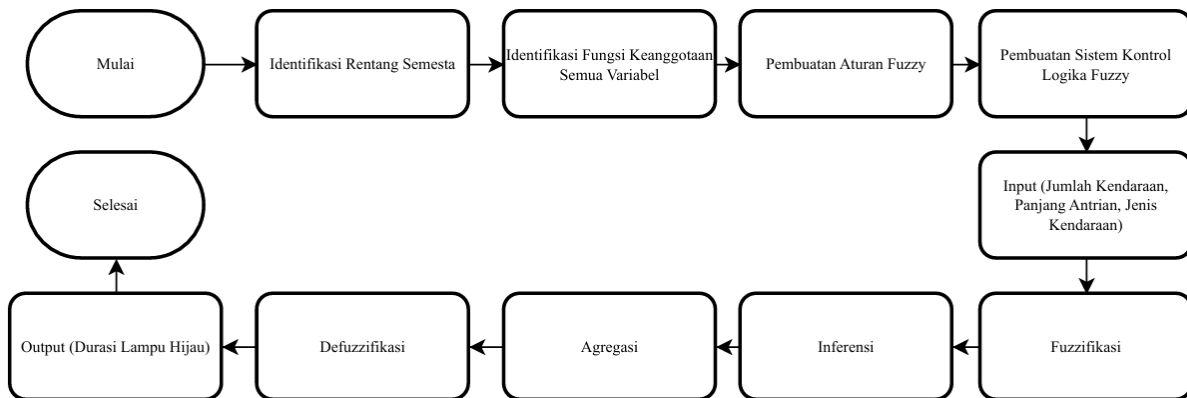
Fahrnunisa et al. (2024) menggabungkan deteksi kendaraan berbasis video menggunakan YOLO untuk memperoleh parameter panjang antrian dan laju arus sebagai masukan *Fuzzy Logic Controller* (FLC); melalui simulasi, pendekatan tersebut meningkatkan jumlah kendaraan yang berhasil keluar dari antrian sekitar 18% dan menurunkan waktu tunggu kendaraan sekitar 21% dibandingkan sistem eksisting [1]. Namun demikian, kualitas estimasi kondisi lalu lintas dari sistem deteksi berbasis visi dapat menurun pada kondisi padat khususnya karena *occlusion* dan tumpang tindih target sehingga akurasi deteksi berpotensi tidak stabil [8],[9]. Di sisi lain, pendekatan prioritas kendaraan darurat umumnya mengoptimasi metrik seperti waktu tunggu dan/atau pengelolaan panjang antrian pada rute kendaraan darurat agar kendaraan prioritas lolos lebih cepat, sembari mencoba menekan dampak negatif ke arus non-prioritas [10],[11]. Secara umum, mayoritas rancangan FLC pada kontrol sinyal lalu lintas masih berfokus pada dua variabel masukan yang relatif mudah diperoleh (misalnya panjang antrian dan *state/posisi* kendaraan, jumlah kendaraan dan waktu tunggu, atau kepadatan dan waktu tunggu), sehingga kompleksitas lapangan sering disederhanakan dalam basis aturan [12]–[16].

Sejumlah studi pengendalian sinyal adaptif telah mempertimbangkan arus lalu lintas campuran, termasuk memasukkan karakteristik atau klasifikasi kendaraan sebagai bagian dari variabel masukan [1],[6]. Namun demikian, pendekatan tersebut belum diterapkan secara konsisten dan umumnya masih terbatas pada representasi tertentu atau skenario spesifik. Dalam banyak kasus, variabel kelas kendaraan belum dimodelkan sebagai masukan independen yang secara eksplisit memengaruhi parameter operasional seperti durasi hijau, laju pengosongan antrian, atau *start-up lost time*. Sebagian besar penelitian tetap berfokus pada indikator berbasis kondisi antrian, waktu tunggu, dan posisi kendaraan sebagai variabel utama, seperti panjang antrian, waktu tunggu kendaraan, jarak ke simpang, dan prioritas kendaraan darurat [12],[13],[17],[18]. Bahkan pada studi terbaru yang memasukkan beberapa fitur tambahan (jarak, akumulasi waktu tunggu, prioritas darurat), variabel yang ditekankan tetap terkait kondisi antrian dan kedekatan kendaraan, bukan komposisi jenis kendaraan sebagai parameter yang mempengaruhi kebutuhan durasi hijau [18]. Dengan demikian, ketiadaan variabel jenis kendaraan pada formulasi masukan FLC masih merupakan celah penelitian yang relevan dan beralasan. Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini mengusulkan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) tipe Mamdani yang mengintegrasikan tiga variabel masukan secara simultan jumlah kendaraan, panjang antrian, dan jenis kendaraan untuk menangkap kompleksitas lalu lintas campuran dan memberikan alokasi durasi hijau yang lebih representatif terhadap kondisi nyata. Pendekatan ini akan diuji melalui lingkungan simulasi mikroskopis guna memvalidasi respon kontroler terhadap dinamika stokastik lalu lintas campuran tanpa risiko gangguan pada lalu lintas nyata. Setup simulasi dirancang untuk mereplikasi perilaku *stop-and-go* dan *gap acceptance* yang kritis pada kondisi jenuh.

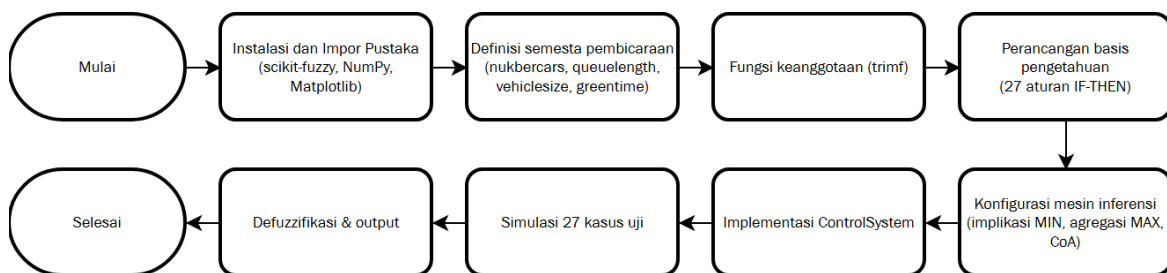
## 2 Metode

Penelitian ini menerapkan metode eksperimen simulasi menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) tipe Mamdani untuk sistem lampu lalu lintas adaptif. Prosedur eksperimen dilaksanakan mengacu pada kerangka kerja pengembangan sistem kontrol cerdas yang dipaparkan oleh [12], yang terdiri dari lima tahapan utama: (1) Identifikasi Variabel, yaitu mendefinisikan semesta pembicaraan (*universe of discourse*) dan fungsi keanggotaan untuk tiga variabel masukan (jumlah kendaraan, panjang antrian, dan jenis kendaraan) serta satu variabel keluaran (durasi lampu hijau); (2) Perancangan Basis Pengetahuan, yang meliputi penyusunan 27 aturan logika (*fuzzy rules*) berbentuk IF-THEN ( $3 \times 3 \times 3$ ); (3) Konfigurasi Mesin Inferensi, menggunakan metode Mamdani dengan operator implikasi MIN, agregasi MAX, dan defuzzifikasi metode *Centroid* (*Center of Area*) untuk mengonversi nilai *fuzzy* menjadi durasi waktu tegas (*crisp output*); (4) Implementasi Sistem, dan (5) Pengujian & Validasi.

Mekanisme simulasi dibangun menggunakan bahasa pemrograman Python. Pustaka *NumPy* digunakan untuk operasi numerik array, sementara pustaka *scikit-fuzzy* (modul *skfuzzy.control*) digunakan sebagai kerangka kerja inti logika fuzzy (pembentukan *Antecedent/Consequent*, *Rule*, dan *Control System*). Untuk memvalidasi respon sistem terhadap ketidakpastian, simulasi dijalankan dengan membangkitkan data input sintetis yang merepresentasikan berbagai kondisi lalu lintas (sepi, normal, padat), kemudian respon kontroler divisualisasikan menggunakan pustaka *Matplotlib*. Alur tahapan pemrograman dan perancangan sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir pemrograman



Gambar 2. Flowchart simulasi

Gambar 2 menunjukkan alur simulasi sistem *Fuzzy Logic Controller* (FLC) yang digunakan dalam penelitian ini. Proses dimulai dari tahap instalasi dan impor pustaka yang diperlukan, yaitu *scikit-fuzzy*, *NumPy*, dan *Matplotlib* sebagai pendukung komputasi dan visualisasi. Selanjutnya dilakukan definisi semesta pembicaraan (*universe of discourse*) untuk setiap variabel, meliputi jumlah kendaraan (*number of cars*), panjang antrian (*queue length*), ukuran kendaraan (*vehicle size*), dan durasi lampu hijau (*greentime*).

Tahap berikutnya adalah perancangan fungsi keanggotaan menggunakan bentuk triangular membership function (*trimf*), yang kemudian digunakan dalam penyusunan basis pengetahuan berupa 27 aturan logika IF-THEN. Setelah itu, sistem inferensi dikonfigurasi menggunakan metode Mamdani dengan operator implikasi MIN, agregasi MAX, dan defuzzifikasi *Center of Area* (CoA).

Model yang telah dirancang kemudian diimplementasikan dalam bentuk *ControlSystem* dan diuji melalui simulasi terhadap 27 kombinasi kasus uji yang merepresentasikan variasi kondisi lalu lintas. Hasil inferensi selanjutnya didefuzzifikasi untuk menghasilkan nilai keluaran berupa durasi lampu hijau (*greentime*), yang menjadi *output* akhir dari sistem.



Gambar 3. Skema lalu lintas

Objek penelitian disimulasikan berdasarkan karakteristik persimpangan tiga lengan bersinyal Jl. Dr. Setiabudi (Arteri Sekunder) – Jl. Gegerkalong Hilir (Kolektor) ditunjukkan pada Gambar 3. Konfigurasi persimpangan ini memiliki geometri asimetris dengan adanya pulau lalu lintas (*traffic island*) segitiga yang memisahkan arus belok kiri langsung (LTOR) dari arah Gegerkalong. Lokasi ini dipilih karena memiliki kompleksitas lalu lintas campuran (*mixed traffic*) yang tinggi: (1) fluktuasi volume kendaraan akibat gabungan arus wisata (Lembang) dan pendidikan (UPI/NHI); (2) heterogenitas kendaraan yang mencakup angkutan kota, bus pariwisata, dan sepeda motor; serta (3) gangguan hambatan samping dari aktivitas komersial yang memicu *bottleneck*. Parameter lingkungan nyata tersebut dikonversi menjadi *constraints* (batasan nilai) pada variabel input *fuzzy* untuk memastikan simulasi mendekati kondisi lapangan.

## 2.1 Variabel dan Fuzzifikasi

Fuzzifikasi adalah proses pemetaan nilai masukan tegas (*crisp input*) menjadi nilai derajat keanggotaan fuzzy ( $\mu$ ). Pada penelitian ini, representasi kurva fungsi keanggotaan (*Membership Function/MF*) menggunakan kombinasi kurva Segitiga dan Trapesium karena efisiensi komputasinya dalam sistem *real-time* [19]. Secara matematis, derajat keanggotaan untuk kurva segitiga dengan parameter  $\{a, b, c\}$  ditentukan oleh persamaan (1) :

$$\mu_{\text{segitiga}}(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (1)$$

Di mana  $x$  adalah nilai input, serta  $a, b, c$ , adalah parameter yang menentukan koordinat kaki dan puncak kurva pada semesta pembicaraan. Variabel masukan didefinisikan sebagai berikut.

1. Jumlah Kendaraan (0-30 unit): Rentang ini dipilih untuk mengakomodasi kepadatan lalu lintas campuran. Batas atas 30 unit dianggap kondisi jenuh (*oversaturated*) untuk satu siklus lampu pada ruas jalan pendek.
2. Panjang Antrian (0-150 meter): Mengacu pada *Highway Capacity Manual* (HCM), panjang antrian didefinisikan sebagai jarak hulu-hilir antrian. Dengan asumsi ruang henti kendaraan (*queue storage*) rata-rata 6–7,6 meter per kendaraan (setara mobil penumpang) [20], rentang 150 meter cukup untuk menampung antrian sekitar 20–25 kendaraan.
3. Jenis Kendaraan (0-10 meter): Dimensi ini merepresentasikan panjang fisik kendaraan. Rentang ditetapkan berdasarkan spesifikasi kendaraan di Indonesia, di mana kendaraan <4 m dikategorikan ringan, sedangkan bus besar (>10 m hingga 13,5 m) dipetakan ke nilai maksimum (saturasi) dalam himpunan 'Berat' [21].
4. Durasi Lampu Hijau (0-120 detik): Batas maksimum 120 detik diadopsi dari pedoman FHWA untuk *cycle length* maksimum yang wajar pada persimpangan perkotaan guna mencegah waktu tunggu yang eksesif pada fase merah [22].

Secara numerik, parameter fungsi keanggotaan untuk variabel input Jumlah Kendaraan didefinisikan melalui persamaan (2) hingga (4):

$$\mu_{sedikit}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ \frac{15-x}{15}, & 0 < x < 15 \\ 0, & x \geq 15 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{sedang}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 4 \text{ atau } x \geq 30 \\ \frac{x-4}{11}, & 4 < x \leq 15 \\ \frac{30-x}{15}, & 15 < x < 30 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{banyak}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 15 \\ \frac{x-15}{15}, & 15 < x < 30 \\ 1, & x \geq 30 \end{cases} \quad (4)$$

Selanjutnya, fungsi keanggotaan untuk variabel Panjang Antrian dijabarkan dalam persamaan (5) hingga (7):

$$\mu_{pendek}(y) = \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ \frac{75-y}{75}, & 0 < y < 75 \\ 0, & x \geq 75 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{sedang}(y) = \begin{cases} 0, & y \leq 10 \text{ atau } y \geq 150 \\ \frac{y-10}{65}, & 10 < y \leq 75 \\ \frac{150-y}{75}, & 75 < y < 150 \end{cases} \quad (6)$$

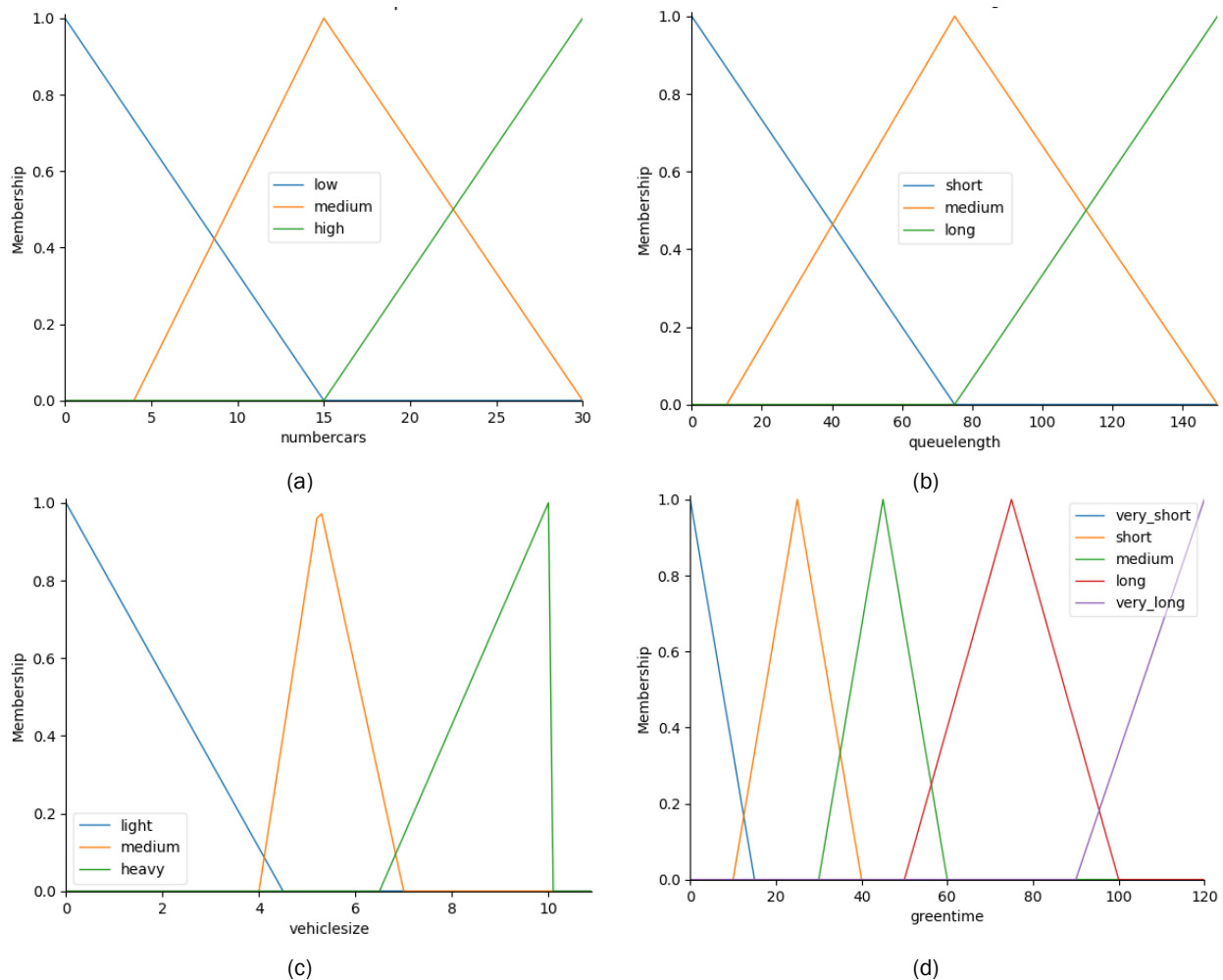
$$\mu_{panjang}(y) = \begin{cases} 0, & y \leq 75 \\ \frac{y-75}{75}, & 75 < y < 150 \\ 1, & y \geq 150 \end{cases} \quad (7)$$

Terakhir, fungsi keanggotaan untuk variabel Jenis Kendaraan yang merepresentasikan dimensi fisik dirumuskan dalam persamaan (8) hingga (10):

$$\mu_{ringan}(z) = \begin{cases} 1, & z \leq 0 \\ \frac{4.5-z}{4.5}, & 3.0 < z < 4.5 \\ 0, & z \geq 4.5 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{menengah}(z) = \begin{cases} 0, & z \leq 4.0 \text{ atau } z \geq 7.0 \\ \frac{z-4.0}{1.5}, & 4.0 < z \leq 5.5 \\ \frac{7.0-z}{1.5}, & 5.5 < z < 7.0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{berat}(z) = \begin{cases} 0, & z \leq 6.5 \\ \frac{z-6.5}{3.5}, & 6.5 < z < 10.0 \\ 1, & z \geq 10.0 \end{cases} \quad (10)$$



Gambar 4. Kurva fungsi keanggotaan variabel *input* dan *output*: (a) Jumlah kendaraan, (b) Panjang antrian, (c) Jenis kendaraan, dan (d) Durasi lampu hijau.

Hasil visualisasi fungsi keanggotaan (*membership function*) untuk ketiga variabel input dan satu variabel *output* disajikan pada Gambar 4. Grafik ini menggambarkan proses pemetaan nilai masukan tegas (*crisp input*) ke dalam derajat keanggotaan *fuzzy* dalam interval 0 hingga 1.

Pada Gambar 4(a), variabel input jumlah\_kendaraan direpresentasikan dalam domain 0–30 unit dengan tiga himpunan linguistik, yaitu *Low* (Sedikit), *Medium* (Sedang), dan *High* (Banyak). Selanjutnya, Gambar 4(b) memperlihatkan variabel panjang\_antrian dengan rentang 0–150 meter, sementara Gambar 4(c) menggambarkan variabel jenis\_kendaraan yang diklasifikasikan berdasarkan panjang fisik kendaraan dalam rentang 0–10 meter. Adapun Gambar 4(d) menampilkan variabel keluaran durasi\_hijau dengan lima himpunan linguistik yang mencakup rentang waktu 0–120 detik.

Dari keseluruhan grafik dapat diamati bahwa antar-himpunan keanggotaan memiliki area perpotongan (*overlapping*). Ciri ini merupakan aspek penting dalam sistem logika *fuzzy* karena memungkinkan terjadinya transisi nilai output secara bertahap dan kontinu. Dengan demikian, perubahan kondisi lalu lintas tidak menghasilkan lonjakan nilai durasi lampu hijau secara tiba-tiba, tetapi menghasilkan penyesuaian yang proporsional dan halus terhadap dinamika arus kendaraan.

## 2.2 Basis Aturan

Basis aturan (*Rule Base*) merupakan komponen inti dari sistem inferensi yang memetakan ruang input ke ruang output melalui sekumpulan logika implikasi "IF-THEN". Mengingat sistem ini menggunakan tiga variabel masukan yang masing-masing memiliki tiga himpunan linguistik, maka total aturan yang terbentuk adalah 27 aturan (3x3x3). Penyusunan aturan ini didasarkan pada pengetahuan heuristik pakar lalu lintas (*expert knowledge*) sebagaimana praktik umum pada perancangan pengendali sinyal persimpangan [23]–[25]. Logika dasar yang dibangun adalah durasi lampu hijau berbanding lurus dengan beban lalu lintas. Namun, penelitian ini menambahkan bobot khusus pada variabel jenis kendaraan. Sebagai contoh, prioritas durasi hijau akan

ditingkatkan tidak hanya saat jumlah kendaraan 'Banyak', tetapi juga ketika terdeteksi kendaraan 'Berat' (bus/truk). Strategi ini diterapkan untuk mengakomodasi *start-up lost time* yang lebih besar akibat inersia massa kendaraan berat saat mulai bergerak dari posisi diam. Matriks aturan lengkap disajikan dalam Tabel 1.

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa sistem dirancang untuk memberikan kompensasi waktu terhadap dimensi kendaraan. Analisis pada aturan ke-3 dan ke-6 menunjukkan bahwa meskipun jumlah kendaraan tergolong 'Sedikit', jika sistem mendeteksi keberadaan kendaraan 'Berat', durasi hijau dinaikkan satu tingkat (dari 'Sangat Cepat' menjadi 'Cepat', atau dari 'Cepat' menjadi 'Normal'). Penyesuaian ini krusial untuk mencegah fenomena *dilemma zone* dan memastikan kendaraan berat memiliki waktu yang cukup untuk melintasi persimpangan dengan aman.

Tabel 1. Matriks aturan fuzzy

No	Jumlah kendaraan	Panjang antrian	Jenis kendaraan	Output (durasi hijau)
1	Sedikit	Pendek	Ringan	Sangat cepat
2	Sedikit	Pendek	Menengah	Sangat cepat
3	Sedikit	Pendek	Berat	Cepat
4	Sedikit	Sedang	Ringan	Sangat cepat
5	Sedikit	Sedang	Menengah	Cepat
6	Sedikit	Sedang	Berat	Normal
7	Sedikit	Panjang	Ringan	Cepat
8	Sedikit	Panjang	Menengah	Normal
9	Sedikit	Panjang	Berat	Normal
10	Sedang	Pendek	Ringan	Sangat cepat
11	Sedang	Pendek	Menengah	Cepat
12	Sedang	Pendek	Berat	Normal
13	Sedang	Sedang	Ringan	Cepat
14	Sedang	Sedang	Menengah	Normal
15	Sedang	Sedang	Berat	Normal
16	Sedang	Panjang	Ringan	Normal
17	Sedang	Panjang	Menengah	Normal
18	Sedang	Panjang	Berat	Lama
19	Banyak	Pendek	Ringan	Cepat
20	Banyak	Pendek	Menengah	Normal
21	Banyak	Pendek	Berat	Normal
22	Banyak	Sedang	Ringan	Normal
23	Banyak	Sedang	Menengah	Normal
24	Banyak	Sedang	Berat	Lama
25	Banyak	Panjang	Ringan	Normal
26	Banyak	Panjang	Menengah	Lama
27	Banyak	Panjang	Berat	Sangat lama

### 2.3 Inferensi dan Defuzzifikasi

Mekanisme inferensi sistem menggunakan metode Mamdani (*Min-Max*). Proses ini melibatkan operator AND (irisan) yang menggunakan fungsi Minimum untuk mendapatkan nilai kekuatan aturan (*firing strength*), sedangkan komposisi antar aturan menggunakan fungsi Maksimum (agregasi). Tahap akhir adalah defuzzifikasi untuk mengonversi himpunan *fuzzy* hasil agregasi menjadi nilai keluaran tegas (Z) menggunakan metode *Centroid of Area* (COA). Metode COA dipilih karena terbukti menghasilkan perubahan output yang lebih halus (*smooth*) dan *robust* dibandingkan metode *Mean of Maximum* (MOM), terutama untuk aplikasi kontrol yang membutuhkan presisi tinggi [11], [14].

Pada setiap skenario simulasi, sistem menghitung keluaran *fuzzy* melalui tahapan: (1) menghitung derajat keanggotaan setiap input terhadap fungsi keanggotaan yang didefinisikan, (2) menghitung firing strength setiap aturan, (3) membentuk keluaran *fuzzy* tiap aturan melalui proses implikasi (pemotongan/*clipping*), (4) mengagregasi seluruh keluaran aturan menjadi satu himpunan *fuzzy* keluaran, dan (5) melakukan defuzzifikasi menggunakan metode *Centroid of Area* (COA).

### 2.3.1 Firing Strength Setiap Aturan

Untuk aturan ke-*i* berbentuk: IF (Jumlah Kendaraan = A) AND (Panjang Antrian = B) AND (Jenis Kendaraan = C) THEN (Durasi Hijau = D), maka *firing strength* ( $\alpha_i$ ) dihitung dengan operator AND = minimum:

$$\alpha_i = \min(\mu_{Jumlah}(n), \mu_{Antrian}(q), \mu_{Jenis}(s)) \quad (11)$$

### 2.3.2 Implikasi (Pemotongan *Output* Per Aturan)

Konsekuensi aturan ke-*i* menghasilkan himpunan *fuzzy* keluaran *D*. Dengan metode Mamdani, fungsi keanggotaannya dipotong pada tinggi  $\alpha_i$  :

$$\mu_i(z) = \min(\alpha_i, \mu_D(z)) \quad (12)$$

di mana *z* adalah domain durasi hijau (detik).

### 2.3.3 Agregasi *Output*

Nilai  $\mu_{agregasi}(z)$  pada persamaan (13) diperoleh dengan menggabungkan semua keluaran aturan menggunakan operator OR = maksimum (*max aggregation*):

$$\mu_{agregasi}(z) = \max(\mu_{hasil1}(z), \mu_{hasil2}(z), \dots, \mu_{hasiln}(z)) \quad (13)$$

Untuk memperjelas proses komputasi numerik yang terjadi di dalam sistem simulasi, Tabel 2 menyajikan contoh cuplikan nilai diskrit  $\mu_{agregasi}(z)$  pada domain waktu tertentu berdasarkan skenario uji acak. Nilai-nilai ini merepresentasikan tinggi kurva daerah hasil setelah proses agregasi Max.

Tabel 2. Contoh Nilai  $\mu_{agregasi}(z_k)$

$Z_k$	30	40	50	60	70
$\mu_{agregasi}(z)$	0,20	0,50	0,80	0,40	0,10

Berdasarkan sampel data pada Tabel 2, proses defuzzifikasi COA dilakukan dengan membagi momen area terhadap luas total area. Dalam implementasi diskrit, formulasi integral didekati dengan penjumlahan berbobot (*weighted sum*) menggunakan persamaan (14):

$$Z \approx \frac{\sum \mu_{agregasi}(z_k) z_k}{\sum \mu_{agregasi}(z_k)} \quad (14)$$

Substitusi nilai sampel menghasilkan estimasi durasi lampu hijau sesuai persamaan (15):

$$Z = \frac{0,20 \times 30 + 0,50 \times 40 + 0,80 \times 50 + 0,40 \times 60 + 0,10 \times 70}{0,20 + 0,50 + 0,80 + 0,40 + 0,10} = \frac{97}{2,0} \approx 48.5 \text{ detik} \quad (15)$$

Nilai tegas 48.5 detik inilah yang kemudian dieksekusi oleh kontroler sebagai durasi lampu hijau. Pada implementasi simulasi penuh menggunakan Python (*scikit-fuzzy*), perhitungan dilakukan pada resolusi domain yang lebih rapat ( $z = 0, 1, \dots, 120$ ) untuk menjamin presisi nilai *centroid* yang dihasilkan.

### 3 Hasil dan Diskusi

#### 3.1 Implementasi dan Hasil Simulasi

Model FLC diimplementasikan pada Python menggunakan pustaka *scikit-fuzzy* (modul *skfuzzy.control*) yang menyediakan komponen variabel linguistik, aturan, serta mekanisme inferensi Mamdani dan defuzzifikasi. Arsitektur pengujian mengikuti alur umum pengendalian sinyal berbasis *fuzzy* : (i) akuisisi kondisi lalu lintas sebagai masukan tegas (*crisp*) jumlah kendaraan, panjang antrian, dan ukuran/jenis kendaraan; (ii) fuzzifikasi; (iii) evaluasi aturan; (iv) agregasi keluaran; (v) defuzzifikasi untuk menghasilkan durasi hijau tegas; dan (vi) pencatatan keluaran untuk analisis. Struktur proses ini sejalan dengan kerangka *fuzzy signal control* yang memisahkan tahap deteksi/ukur, pemodelan situasi, fuzzifikasi-inferensi-defuzzifikasi, hingga aksi kontrol. Hasil simulasi disajikan pada Tabel 3.

Nilai durasi hijau pada Tabel 3 diperoleh melalui proses komputasi deterministik pada FIS Mamdani, yaitu fuzzifikasi, evaluasi aturan (operator AND = minimum), agregasi keluaran (operator maximum), defuzzifikasi menggunakan metode *Centroid of Area* (COA) pada semesta diskrit durasi hijau [0,120] detik.

Berdasarkan 27 skenario simulasi, keluaran *greentime* berada pada rentang 5,09–91,60 detik. Secara umum, peningkatan jumlah kendaraan, panjang antrian, dan ukuran kendaraan cenderung diikuti oleh peningkatan durasi lampu hijau. Pada kondisi antrian pendek (10 m), *greentime* relatif rendah, yaitu 5,09–25,00 detik, sedangkan pada antrian yang lebih panjang (140 m) nilai keluaran meningkat hingga 91,60 detik. Nilai tertinggi diperoleh pada kombinasi 28 kendaraan/lajur, antrian 140 m, dan ukuran kendaraan 9,0 m, yang menghasilkan *greentime* 91,60 detik. Sebaliknya, nilai terendah terjadi pada kombinasi 2 kendaraan/lajur, antrian 10 m, dan ukuran kendaraan 5,5 m, yaitu 5,09 detik.

Tabel 3. hasil simulasi pada berbagai skenario

No	Jumlah kendaraan	Panjang antrian (m)	Ukuran kendaraan (m)	Greentime (s)
1	2	10	3.5	6.70
2	2	10	5.5	5.09
3	2	10	9.0	25.00
4	2	75	3.5	6.70
5	2	75	5.5	25.00
6	2	75	9.0	45.00
7	2	140	3.5	21.13
8	2	140	5.5	41.31
9	2	140	9.0	45.00
10	15	10	3.5	6.70
11	15	10	5.5	25.00
12	15	10	9.0	45.00
13	15	75	3.5	25.00
14	15	75	5.5	45.00
15	15	75	9.0	45.00
16	15	140	3.5	37.55
17	15	140	5.5	45.00
18	15	140	9.0	71.39
19	28	10	3.5	21.13
20	28	10	5.5	41.31
21	28	10	9.0	45.00
22	28	75	3.5	37.55
23	28	75	5.5	45.00
24	28	75	9.0	71.39
25	28	140	3.5	37.55
26	28	140	5.5	71.59
27	28	140	9.0	91.60

### 3.2 Analisis dan Diskusi

Hasil simulasi terhadap 27 kombinasi input menunjukkan bahwa sistem *Fuzzy Logic Controller* (FLC) menghasilkan variasi durasi lampu hijau (*greentime*) pada rentang 5,09 hingga 91,60 detik. Variasi ini menunjukkan bahwa keluaran sistem merespons perubahan tiga variabel masukan, yaitu jumlah kendaraan, panjang antrian, dan ukuran kendaraan. Secara umum, peningkatan nilai masukan cenderung diikuti oleh peningkatan durasi hijau yang dihasilkan.

Pada kondisi jumlah kendaraan rendah (2 kendaraan/lajur) dan panjang antrian pendek (10 m), *greentime* berada pada kisaran 5,09–25,00 detik. Sebaliknya, pada kondisi jumlah kendaraan tinggi (28 kendaraan/lajur) dan panjang antrian maksimum (140 m), *greentime* meningkat hingga 91,60 detik, khususnya pada ukuran kendaraan terbesar (9,0 m). Pola ini menunjukkan bahwa sistem memberikan durasi hijau yang lebih panjang pada kondisi lalu lintas yang lebih padat dan kompleks.

Pengaruh ukuran kendaraan juga tampak jelas. Pada kombinasi jumlah kendaraan dan panjang antrian yang sama, peningkatan ukuran kendaraan dari 3,5 m ke 9,0 m umumnya diikuti oleh peningkatan *greentime*. Secara rata-rata, nilai *greentime* untuk ukuran kendaraan 3,5 m, 5,5 m, dan 9,0 m masing-masing adalah 22,22 detik, 38,26 detik, dan 53,82 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa variabel ukuran kendaraan berkontribusi dalam memodulasi keputusan durasi hijau, sehingga representasi heterogenitas lalu lintas menjadi lebih eksplisit pada model yang digunakan.

Temuan tersebut sejalan dengan prinsip dasar pengaturan sinyal lalu lintas. FHWA menjelaskan bahwa *start-up lost time* adalah waktu tambahan pada awal fase hijau yang dibutuhkan kendaraan pertama dalam antrian untuk bereaksi dan mulai bergerak, dan nilai ini umumnya diasumsikan sekitar 2 detik; FHWA juga menyebut total lost time per fase sebesar 4 detik sebagai nilai baku dalam estimasi kapasitas. Dengan demikian, peningkatan jumlah kendaraan dan panjang antrian secara alami akan meningkatkan kebutuhan waktu hijau agar pelepasan antrian tetap efektif [26]. Dari sisi perilaku kendaraan berat, literatur juga menunjukkan bahwa karakteristik pelepasan antrian tidak sama dengan mobil penumpang. Studi Ghanim dan Abu-Lebdeh pada kondisi *oversaturated interrupted flow* melaporkan bahwa headway kendaraan berat berbeda dari mobil penumpang, dan bahwa nilai PCE rata-rata sekitar 2,25 masih masuk akal untuk kondisi yang mereka teliti [27].

Secara metodologis, hasil ini juga selaras dengan kerangka *fuzzy traffic signal control* yang memandang pengendalian sinyal sebagai proses bertahap yang mencakup fuzzifikasi, inferensi, defuzzifikasi, dan aksi kontrol. Niittymäki menempatkan pendekatan fuzzy sebagai kerangka yang sesuai untuk sistem lalu lintas yang bersifat nonlinier dan berubah-ubah [28],[29].

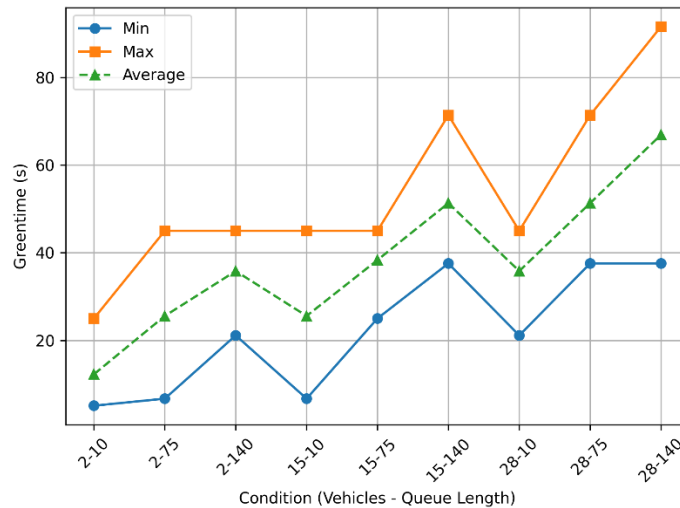
Analisis sensitivitas dilakukan secara kualitatif dengan mengamati perubahan nilai *greentime* terhadap variasi masing-masing variabel masukan, yaitu jumlah kendaraan, panjang antrian, dan ukuran kendaraan.

Variabel jumlah kendaraan menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan *greentime*, terutama pada kondisi antrian panjang. Sebagai contoh, pada panjang antrian 140 m dan ukuran kendaraan 3,5 m, peningkatan jumlah kendaraan dari 2 menjadi 28 kendaraan/lajur menyebabkan peningkatan *greentime* dari 21,13 detik menjadi 37,55 detik. Hal ini sejalan dengan konsep dasar kontrol lalu lintas bahwa peningkatan volume kendaraan akan meningkatkan kebutuhan waktu pelayanan pada fase hijau.

Variabel panjang antrian juga menunjukkan kontribusi yang konsisten terhadap peningkatan *greentime*. Pada jumlah kendaraan tetap (15 kendaraan/lajur) dan ukuran kendaraan 3,5 m, peningkatan panjang antrian dari 10 m menjadi 140 m meningkatkan *greentime* dari 6,70 detik menjadi 37,55 detik. Hal ini menunjukkan bahwa sistem FLC merespons kondisi akumulasi kendaraan secara langsung dalam menentukan durasi hijau.

Sementara itu, variabel ukuran kendaraan menunjukkan pengaruh yang relatif lebih non-linear dibandingkan dua variabel lainnya. Pada beberapa kondisi, peningkatan ukuran kendaraan menghasilkan lonjakan *greentime* yang cukup signifikan, khususnya pada kombinasi jumlah kendaraan dan panjang antrian yang tinggi. Hal ini dapat dikaitkan dengan fakta bahwa kendaraan dengan dimensi lebih besar cenderung memiliki waktu akselerasi lebih lambat dan membutuhkan ruang lebih besar, sehingga memengaruhi laju pengosongan antrian (*queue discharge rate*) dan *start-up lost time*, sebagaimana dibahas dalam literatur rekayasa lalu lintas seperti *Highway Capacity Manual*.

Meskipun demikian, respons keluaran belum sepenuhnya monoton. Pada beberapa kombinasi input, nilai *greentime* tetap berada pada nilai yang sama, seperti 45,00 detik, meskipun parameter masukan berbeda. Kondisi ini mengindikasikan adanya zona saturasi pada fungsi keanggotaan atau basis aturan yang digunakan. Karena itu, penyempurnaan fungsi keanggotaan dan struktur aturan masih diperlukan agar respons sistem menjadi lebih halus dan konsisten.



Gambar 5. Variasi nilai minimum, maksimum, dan rata-rata *greentime* pada setiap kombinasi jumlah kendaraan dan panjang antrian.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, terdapat perbedaan yang signifikan antara nilai minimum dan maksimum *greentime* pada setiap kondisi lalu lintas. Selisih ini cenderung meningkat pada kondisi dengan jumlah kendaraan dan panjang antrian yang lebih tinggi. Selain itu, kurva rata-rata berada di antara nilai minimum dan maksimum, yang secara indikatif merepresentasikan keluaran sistem tanpa mempertimbangkan variasi ukuran kendaraan.

Jika dibandingkan secara indikatif dengan pendekatan yang hanya menggunakan variabel makroskopis seperti panjang antrian dan waktu tunggu, hasil ini menunjukkan bahwa penambahan variabel ukuran kendaraan memperkaya sensitivitas model terhadap kondisi lalu lintas campuran. Pada kombinasi input yang sama, variasi ukuran kendaraan menghasilkan rentang *greentime* yang cukup lebar, misalnya pada 2 kendaraan/lajur dan antrian 10 m, nilai *greentime* berada pada rentang 5,09–25,00 detik, sedangkan pada 28 kendaraan/lajur dan antrian 140 m rentangnya meningkat menjadi 37,55–91,60 detik. Secara rata-rata, *greentime* juga meningkat seiring bertambahnya ukuran kendaraan, sehingga variabel jenis kendaraan berpotensi membantu mengurangi risiko representasi keputusan yang terlalu umum pada kondisi lalu lintas heterogen.

#### 4 Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa pengintegrasian variabel jenis kendaraan bersama jumlah kendaraan dan panjang antrian ke dalam sistem *Fuzzy Logic Controller* (FLC) tipe Mamdani menghasilkan keluaran durasi lampu hijau yang responsif terhadap variasi kondisi lalu lintas campuran. Berdasarkan hasil simulasi, sistem menghasilkan durasi hijau pada rentang 5,09 hingga 91,60 detik sesuai perubahan beban lalu lintas. Variabel ukuran kendaraan juga memengaruhi keluaran sistem, dengan nilai rata-rata *greentime* sebesar 53,82 detik pada ukuran kendaraan 9,0 m dibandingkan 22,22 detik pada ukuran 3,5 m. Hasil ini menunjukkan bahwa variabel jenis kendaraan berkontribusi dalam memodulasi alokasi waktu hijau agar lebih representatif terhadap kondisi lapangan. Meskipun demikian, masih ditemukan zona saturasi pada beberapa kombinasi input yang menyebabkan respons keluaran belum sepenuhnya monoton. Oleh karena itu, penyempurnaan fungsi keanggotaan dan basis aturan masih diperlukan agar transisi respons sistem menjadi lebih halus dan konsisten pada berbagai kondisi antrian.

#### Ucapan Terima kasih

Penelitian ini dilakukan secara mandiri tanpa dibiayai oleh pihak lembaga atau institusi manapun.

## Referensi

- [1] Z. Fahrnunisa, Rahmadwati, and R. A. Setyawan, "Adaptive traffic light signal control using fuzzy logic based on real-time vehicle detection from video surveillance," *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika (JITEKI)*, vol. 10, no. 2, pp. 235–251, 2024. <https://doi.org/10.26555/jiteki.v10i2.28712>
- [2] K. Nautiyal, D. Gangodkar, and M. Diwakar, "Analysis on advancements in adaptive traffic lights system," *Procedia Computer Science*, vol. 258, pp. 2767–2776, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.04.537>
- [3] C. Dumitrescu, P. Ciotirnae, and C. Vizitiu, "Fuzzy logic for intelligent control system using soft computing applications," *Sensors*, vol. 21, no. 8, p. 2617, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21082617>
- [4] S. Prakash and R. Menon, "Multi-criteria fuzzy logic decision support for traffic signal optimization in mixed traffic environments," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 48501–48515, 2023.
- [5] T. D. Chala and L. T. Kóczy, "Agent-based intelligent fuzzy traffic signal control system for multiple road intersection systems," *Mathematics*, vol. 13, no. 1, pp. 1–27, 2024. <https://doi.org/10.3390/math13010124>
- [6] Savithamma R M and R. Sumathi, "Intelligent traffic signal controller for heterogeneous traffic using reinforcement learning," *Green Energy and Intelligent Transportation*, vol. 2, no. 6, p. 100124, Dec. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.geits.2023.100124>
- [7] X. Zhang and K. Liu, "Deep learning-assisted fuzzy control for traffic signal coordination in urban corridors," *Transportation Research Part C*, vol. 142, p. 103821, 2022.
- [8] Y. Zhang, Z. Guo, J. Wu, Y. Tian, H. Tang, and X. Guo, "Real-time vehicle detection based on improved YOLOv5," *Sustainability*, vol. 14, no. 19, p. 12274, Sep. 2022. <https://doi.org/10.3390/su141912274>
- [9] K. Zhu, H. Lyu, and Y. Qin, "Enhanced detection of small and occluded road vehicle targets using improved YOLOv5," *Signal, Image and Video Processing*, vol. 19, no. 168, Dec. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11760-024-03756-3>
- [10] P. Rosayyan, J. Paul, S. Subramaniam, and S. I. Ganesan, "An optimal control strategy for emergency vehicle priority system in smart cities using edge computing and IOT sensors," *Measurement: Sensors*, vol. 26, p. 100697, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100697>
- [11] Y. Y. Chen, J. Y. Wang, S. C. Lo, and W. T. Sung, "An emergency vehicle traffic signal preemption system considering queue spillbacks along routes and negative impacts on non-priority traffic," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 18, no. 8, pp. 1385–1395, 2024. <https://doi.org/10.1049/itr2.12518>
- [12] Tunc, A. Y. Yesilyurt, and M. T. Soylemez, "Different fuzzy logic control strategies for traffic signal timing control with state inputs," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 2, pp. 265–270, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.06.059>
- [13] Y. Bi, Q. Ding, Y. Du, D. Liu, and S. Ren, "Intelligent traffic control decision-making based on type-2 fuzzy and reinforcement learning," *Electronics*, vol. 13, no. 19, p. 3894, Oct. 2024. <https://doi.org/10.3390/electronics13193894>
- [14] T. Meepokgit and S. Wisayataksin, "Traffic signal control with state-optimizing deep reinforcement learning and fuzzy logic," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 17, p. 7908, Sep. 2024. <https://doi.org/10.3390/app14177908>
- [15] M. Vlasceanu et al., "Comparative evaluation of fuzzy logic and Q-learning for adaptive urban traffic signal control," *Electronics*, vol. 14, no. 14, p. 2759, Jul. 2025. <https://doi.org/10.3390/electronics14142759>
- [16] S. M. Seifivand, P. Asghari, H. H. S. Javadi, et al., "Optimizing and managing the lighting time of the traffic light using the reinforcement learning system based on fuzzy logic and training the system with evolutionary algorithms," *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, vol. 23, pp. 1125–1144, Aug. 2025. <https://doi.org/10.1007/s13177-025-00504-w>
- [17] F. Zahwa, M. Simic, and C. T. Cheng, "Fuzzy-based traffic light control strategy: the good, the bad, and the ugly," in *Big Data Analytics and Data Science*, pp. 61–75, 2024. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-8666-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-97-8666-4_6)
- [18] T. D. Chala and L. T. Kóczy, "Agent-Based Intelligent Fuzzy Traffic Signal Control System for Multiple Road Intersection Systems," *Mathematics*, vol. 13, no. 1, 2025. <https://doi.org/10.3390/math13010124>
- [19] S. Furqon, I. Santoso, and Y. A. A. Soetrisno, "Perancangan sistem pengontrolan lampu lalu lintas menggunakan metode fuzzy," *Transient*, vol. 9, no. 1, pp. 88–96, 2020. <https://doi.org/10.14710/transient.v9i1.88-96>
- [20] Z. Wang, "Queue storage design for metered on-ramps," *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 47–64, 2013. <https://doi.org/10.1260/2046-0430.2.1.47>
- [21] N. Tanarubun, N. Hartatik, and M. Firmansyah, "Performance analysis of unsignalized intersections on the Taman Asri Tambak Rejo Road in Sidoarjo Regency using the PKJI 2014 Method," *Jurnal Indonesia Sosial Sains*, vol. 6, no. 12, Dec. 2025. [Online]. Available: <http://jiss.publikasiindonesia.id/>.

- [22]H. K. An, M. Awais Javeed, G. Bae, N. Zubair, A. S. M. Metwally, P. Bocchetta, F. Na, and M. S. Javed, "optimized intersection signal timing : An intelligent approach-based study for sustainable models," *Sustainability*, vol. 14, no. 18, p. 11422, Sep. 2022. <https://doi.org/10.3390/su141811422>
- [23]J. Niittymäki, "Using Fuzzy Logic to Optimize Adaptive Traffic Signal Control," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 9, no. 6, pp. 385-403, Des. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(00\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00045-3)
- [24]C. P. Pappis and E. H. Mamdani, "A fuzzy logic controller for a traffic junction," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 7, no. 10, pp. 707-717, 1977. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1977.4309605>.
- [25]J. P. Niittymäki, "Fuzzy traffic signal control," in *Transportation Planning*, M. Patriksson and M. Labbé, Eds., Boston, MA: Springer, pp. 185-211, 2002. [https://doi.org/10.1007/0-306-48220-7\\_10](https://doi.org/10.1007/0-306-48220-7_10)
- [26]Federal Highway Administration (FHWA), "Operational Analysis Fundamentals," in *Traffic Signal Timing Manual*, 2nd ed., Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 2013, ch. 3. [Online]. Available: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop13006/ch3.htm>
- [27]M. S. Ghanim and G. Abu-Lebdeh, "Characterization of heavy vehicle headways in oversaturated interrupted conditions: Towards development of passenger car equivalency factors," *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 589-602, Sep. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2021.07.002>.
- [28]J. Niittymäki, "Fuzzy traffic signal control-fuzzification and defuzzification methods, extended abstract," in Proc. 6th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, Gothenburg, 1998, p. 5. [Online]. Available: <https://tiedejatutkimus.fi/fi/results/publication/0359663998>
- [29]J. Niittymäki, "Fuzzy Traffic Signal Control," in *Transportation Planning: State of the Art*, M. Patriksson and M. Labbé, Eds., Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, pp. 163-175, 2002. [Online]. Available: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-306-48220-7\\_10](https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-306-48220-7_10)