

Perancangan dan Implementasi Prototipe Sistem Lampu Lalu Lintas Adaptif Berbasis Fuzzy Mamdani

Mohamad Firdaus Dewantri Alfakir¹, Kartika Sekarsari²

^{1,2}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang

^{1,2}Jalan Witana Harja No.18b, Pamulang Barat, Kecamatan Pamulang, Kota Tangerang Selatan, Banten 15417, Indonesia

¹muhammaddewa312@gmail.com

²dosen00181@unpam.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

diajukan : 18-03-2026
revisi : 01-04-2026
diterima : 02-04-2026
dipublish : 30-06-2026

ABSTRAK

Sistem lampu lalu lintas dengan waktu tetap yang tidak dapat beradaptasi secara dinamis terhadap fluktuasi kepadatan kendaraan sering menyebabkan kemacetan di persimpangan jalan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan prototipe sistem lampu lalu lintas adaptif berbasis algoritma Fuzzy Logic Mamdani guna menentukan durasi lampu hijau secara proporsional terhadap kepadatan kendaraan. Pada penelitian ini dikembangkan sistem menggunakan mikrokontroler Arduino Mega 2560 sebagai pengendali utama, 12 sensor Infrared Barrier Obstacle untuk mendeteksi kepadatan lalu lintas pada empat lajur, modul LED sebagai aktuator, serta display seven-segment TM1637 sebagai penampil waktu hitung mundur. Variabel input meliputi jumlah mobil (0–20 unit) dan sepeda motor (0–30 unit), masing-masing diklasifikasikan ke dalam kategori rendah, sedang, dan tinggi, sedangkan output berupa durasi lampu hijau berada pada rentang 1 hingga 120 detik yang dikategorikan menjadi pendek, sedang, dan panjang. Proses inferensi menggunakan sembilan aturan fuzzy dan metode defuzzifikasi centroid untuk menghasilkan nilai tegas. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem mampu menyesuaikan durasi lampu hijau secara real-time dengan deviasi rata-rata 0,2–0,5 detik. Sensor bekerja optimal pada rentang deteksi 1–4 cm. Sistem secara bertahap menyesuaikan durasi berdasarkan kepadatan lalu lintas, sehingga mengurangi waktu tunggu yang tidak perlu pada lajur sepi serta memprioritaskan arus yang lebih padat, sehingga meningkatkan efisiensi pengendalian lalu lintas pada skala prototipe.

Kata kunci : Pengendalian Sinyal Lalu Lintas Adaptif, Pengendali Logika Fuzzy Mamdani, Sensor Obstacle Inframerah.

PENDAHULUAN

Kemacetan lalu lintas pada persimpangan merupakan permasalahan klasik di wilayah perkotaan yang menunjukkan tren kenaikan seiring meningkatnya jumlah kendaraan yang tidak sebanding dengan kapasitas infrastruktur jalan (Ouallane et al., 2022; Subair et al., 2024). Secara umum, sistem kontrol lampu lalu lintas konvensional masih menggunakan metode waktu tetap (*fixed time control*) (Kanimozhi et al., 2024), di mana durasi lampu hijau ditentukan berdasarkan interval statis tanpa mempertimbangkan fluktuasi kepadatan kendaraan secara aktual. Kondisi ini sering menimbulkan inefisiensi berupa waktu tunggu yang berlebihan pada jalur dengan volume kendaraan rendah serta penumpukan kendaraan pada jalur dengan volume tinggi (Jafari et al., 2022).

Perkembangan sistem kendali cerdas menawarkan pendekatan alternatif melalui penerapan logika fuzzy yang mampu menangani ketidakpastian dan variabilitas kondisi lalu lintas (İnağ & Arıkan, 2024; Jafari et al., 2022). Metode Fuzzy Mamdani dikenal memiliki struktur inferensi berbasis aturan linguistik (IF–THEN) yang intuitif dan sesuai untuk sistem pengambilan keputusan adaptif. Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem lampu lalu lintas adaptif berbasis sensor dan mikrokontroler (Bisht et al., 2022; Desmira et al., 2022), namun sebagian masih terbatas pada simulasi perangkat lunak atau belum mengintegrasikan klasifikasi multi-variabel kendaraan secara terpisah antara mobil dan motor dalam satu sistem inferensi terpadu.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini berfokus pada perancangan dan implementasi prototipe sistem lampu lalu lintas adaptif berbasis metode Fuzzy

Mamdani. Penelitian ini mencakup proses perancangan sistem secara terintegrasi, implementasi sensor inframerah dan mikrokontroler untuk mendeteksi tingkat kepadatan kendaraan secara real-time, serta evaluasi kinerja sistem dalam menyesuaikan durasi lampu hijau berdasarkan variasi jumlah kendaraan pada setiap jalur persimpangan. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan menghasilkan sistem kendali lalu lintas yang responsif dan adaptif terhadap dinamika kondisi di lapangan.

Ruang lingkup penelitian dibatasi pada perancangan prototipe skala laboratorium dengan empat jalur persimpangan menggunakan 12 sensor Infrared Barrier Obstacle, mikrokontroler Arduino Mega 2560, modul LED lalu lintas, dan seven segment TM1637 sebagai penampil waktu. Variabel input terdiri dari jumlah kendaraan mobil dan motor yang diklasifikasikan ke dalam tiga kategori (sedikit, sedang, ramai), sedangkan variabel output berupa durasi lampu hijau dengan rentang 1–120 detik menggunakan metode defuzzifikasi centroid. Hipotesis penelitian ini adalah bahwa penerapan metode Fuzzy Mamdani mampu menghasilkan pengaturan durasi lampu hijau yang lebih adaptif dibandingkan sistem waktu tetap, dengan transisi durasi yang lebih proporsional terhadap tingkat kepadatan kendaraan.

Nilai kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada integrasi klasifikasi dua jenis kendaraan sebagai variabel input terpisah dalam sembilan aturan fuzzy yang diimplementasikan secara langsung pada perangkat keras mikrokontroler, serta validasi kinerja sistem melalui pengujian prototipe fisik berbasis sensor infra merah.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk: (1) merancang dan membangun prototipe sistem lampu lalu

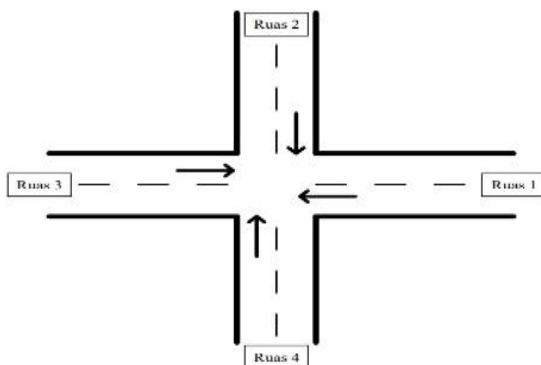
lintas adaptif berbasis Fuzzy Mamdani; (2) mengimplementasikan algoritma fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi pada mikrokontroler; serta (3) mengevaluasi kinerja sistem dalam menghasilkan durasi lampu hijau yang responsif dan proporsional terhadap tingkat kepadatan kendaraan secara terukur.

TEORI

A. SISTEM LAMPU LALU LINTAS ADAPTIF

Sistem lampu lalu lintas merupakan perangkat pengendali arus kendaraan pada persimpangan yang bekerja dengan mengatur durasi nyala lampu merah, kuning, dan hijau pada setiap ruas jalan. Sistem konvensional berbasis waktu tetap (fixed time) tidak mempertimbangkan fluktuasi kepadatan kendaraan sehingga kurang efisien dalam kondisi lalu lintas dinamis.

Sistem lampu lalu lintas adaptif dikembangkan untuk menyesuaikan durasi lampu hijau berdasarkan kondisi nyata di lapangan, khususnya tingkat kepadatan kendaraan, seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 1. Dengan pendekatan ini, waktu tunggu kendaraan dapat dikurangi dan efisiensi arus lalu lintas meningkat. Prinsip adaptif ini menjadi dasar dalam perancangan sistem berbasis sensor dan pengendalian cerdas.



Gambar 1. Ruas Lalu Lintas

B. LOGIKA FUZZY MAMDANI

Metode Fuzzy Mamdani merupakan salah satu metode Fuzzy Inference System yang diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani. Pada sistem pengaturan lampu lalu lintas dalam penelitian ini, logika fuzzy digunakan untuk menentukan durasi nyala lampu hijau berdasarkan tingkat kepadatan kendaraan yang terdeteksi oleh sensor. Variabel input pada sistem terdiri dari jumlah kendaraan mobil dan motor, sedangkan variabel output berupa durasi lampu hijau yang dikategorikan menjadi cepat, sedang, dan lama. Proses pengambilan keputusan pada metode Mamdani dilakukan melalui beberapa tahapan utama yaitu fuzzifikasi, inferensi, agregasi aturan, dan defuzzifikasi (Putri & Saputro, 2021).

1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses awal dalam logika fuzzy yang bertujuan mentransformasikan nilai input pasti (crisp) ke dalam bentuk derajat keanggotaan fuzzy. Pada tahap ini, nilai jumlah kendaraan yang diperoleh dari sensor dipetakan ke dalam beberapa kategori linguistik seperti sedikit, sedang, dan ramai. Setiap kategori direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan tertentu sehingga satu nilai input dapat memiliki tingkat keanggotaan pada lebih dari satu himpunan fuzzy.

Dalam penelitian ini digunakan fungsi keanggotaan segitiga karena memiliki bentuk sederhana dan mudah diimplementasikan pada sistem kontrol. Fungsi keanggotaan segitiga secara umum dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\mu = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (1)$$

Keterangan.

- x adalah nilai input (*crisp*).
- a adalah batas bawah himpunan *fuzzy*.
- b adalah titik puncak (nilai dengan derajat keanggotaan 1).
- c adalah batas atas himpunan *fuzzy*.
- μ adalah derajat keanggotaan.

Melalui proses fuzzifikasi, setiap nilai input akan memiliki derajat keanggotaan pada tiap himpunan fuzzy menggunakan rentang 0 hingga 1. Hasil fuzzifikasi ini kemudian digunakan pada tahap inferensi untuk menentukan keluaran sistem berdasarkan aturan (rule base) yang telah ditetapkan.

2. Inferensi Fuzzy

Tahap berikutnya adalah inferensi fuzzy, yaitu proses penalaran untuk menentukan hubungan antara variabel input dan output berdasarkan aturan yang telah dirancang. Pada metode Mamdani, aturan fuzzy dinyatakan dalam bentuk IF-THEN rule yang menggambarkan hubungan sebab akibat antara kondisi input dan keluaran sistem. Bentuk umum aturan fuzzy dapat dituliskan sebagai berikut:

IF Mobil adalah A_i OR Motor adalah B_i THEN Durasi Lampu Hijau adalah C_i

Pada penelitian ini operator logika yang digunakan adalah OR, sehingga kekuatan aktivasi setiap aturan dihitung menggunakan operator maksimum (MAX). Secara

matematis nilai aktivasi aturan dapat dinyatakan sebagai:

$$\alpha_i = \max(\mu A(x), \mu B(y)) \quad (2)$$

dimana α_i merupakan nilai aktivasi aturan ke- i , sedangkan $\mu_A(x)$ dan $\mu_B(y)$ masing-masing merupakan derajat keanggotaan dari variabel input mobil dan motor. Nilai aktivasi tersebut menunjukkan tingkat kontribusi setiap aturan terhadap keluaran sistem.

3. Agregasi Aturan

Setelah seluruh aturan diproses pada tahap inferensi, langkah selanjutnya adalah menggabungkan keluaran dari setiap aturan untuk memperoleh satu himpunan fuzzy keluaran. Proses ini disebut sebagai agregasi atau komposisi aturan.

Pada metode Mamdani, agregasi dilakukan menggunakan operator maksimum sehingga nilai derajat keanggotaan keluaran ditentukan oleh nilai terbesar dari seluruh aturan yang aktif. Secara matematis proses ini dapat dinyatakan sebagai:

$$\mu_{out}(z) = \max(\mu_1(z), \mu_2(z), \dots, \mu_n(z)) \quad (3)$$

di mana $\mu_{out}(z)$ merupakan derajat keanggotaan keluaran hasil agregasi, sedangkan $\mu_1(z)$ hingga $\mu_n(z)$ merupakan hasil keluaran dari masing-masing aturan fuzzy. Hasil dari tahap agregasi berupa himpunan fuzzy komposit yang merepresentasikan keputusan sistem sebelum dikonversi menjadi nilai tegas.

4. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan tahap akhir dalam sistem logika fuzzy yang bertujuan mengubah keluaran dalam bentuk himpunan fuzzy menjadi nilai numerik tegas (*crisp*)

output)(Putri & Saputro, 2021). Nilai tersebut digunakan sebagai durasi waktu lampu hijau pada sistem pengaturan lalu lintas otomatis.

Pada penelitian ini digunakan metode centroid atau center of area (COA) karena mampu menghasilkan nilai keluaran yang stabil dan mempertimbangkan seluruh daerah keluaran fuzzy. Persamaan metode centroid dapat dituliskan sebagai berikut:

$$y^* = \frac{\int y\mu(y) dy}{\int \mu(y) dy} \quad (4)$$

di mana y^* merupakan nilai keluaran crisp yang dihasilkan dari proses defuzzifikasi, sedangkan $\mu(y)$ merupakan fungsi keanggotaan dari himpunan fuzzy keluaran. Nilai crisp yang diperoleh dari proses defuzzifikasi selanjutnya digunakan oleh mikrokontroler untuk menentukan lama waktu penyalan lampu hijau pada setiap jalur persimpangan sesuai dengan tingkat kepadatan kendaraan yang terdeteksi oleh sensor.

C. SENSOR INFRA RED SEBAGAI SISTEM AKUISISI DATA

Prinsip kerja Sensor Infrared (IR) didasarkan pada interaksi antara radiasi inframerah dengan material sensor, yang selanjutnya dikonversi menjadi sinyal listrik yang dapat diukur (Lyu, 2022). Dalam sistem ini digunakan sensor Infrared Barrier Obstacle untuk mendeteksi kendaraan pada setiap jalur persimpangan. Gambar 2 memperlihatkan sensor *Infrared* (IR)



Gambar 2 Sensor Infrared (IR)

Sensor menghasilkan sinyal digital HIGH atau LOW yang menunjukkan ada atau tidaknya kendaraan dalam jangkauan deteksi tertentu. Data ini kemudian digunakan sebagai variabel input pada proses fuzzifikasi dalam sistem logika fuzzy.

D. SEVEN SEGMENT DISPLAY SEBAGAI MEDIA INFORMASI VISUAL

Seven Segment TM1637 merupakan modul display numerik berbasis LED yang digunakan untuk menampilkan informasi dalam bentuk angka. Modul ini berkomunikasi dengan mikrokontroler menggunakan protokol dua pin (CLK dan DIO) (Lyu, 2022).

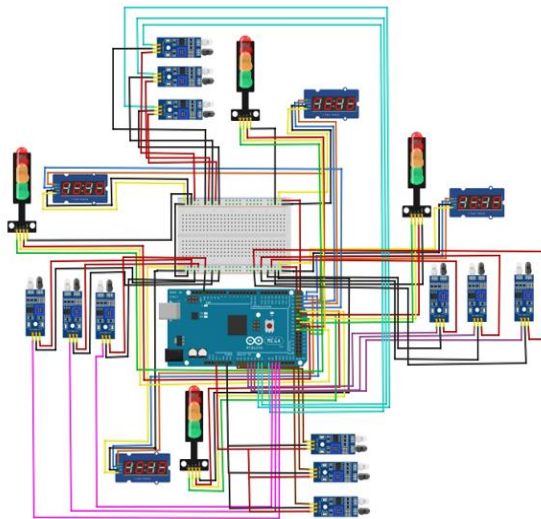
Dalam penelitian ini, seven segment digunakan sebagai countdown timer untuk menampilkan sisa waktu lampu hijau pada setiap jalur. Informasi ini meningkatkan keterbacaan sistem serta mendukung aspek keselamatan dan prediktabilitas bagi pengguna jalan.



Gambar 3. Seven Segment TM1637

METODOLOGI

Desain Hardware dalam penelitian ini diperlihatkan pada gambar 4.

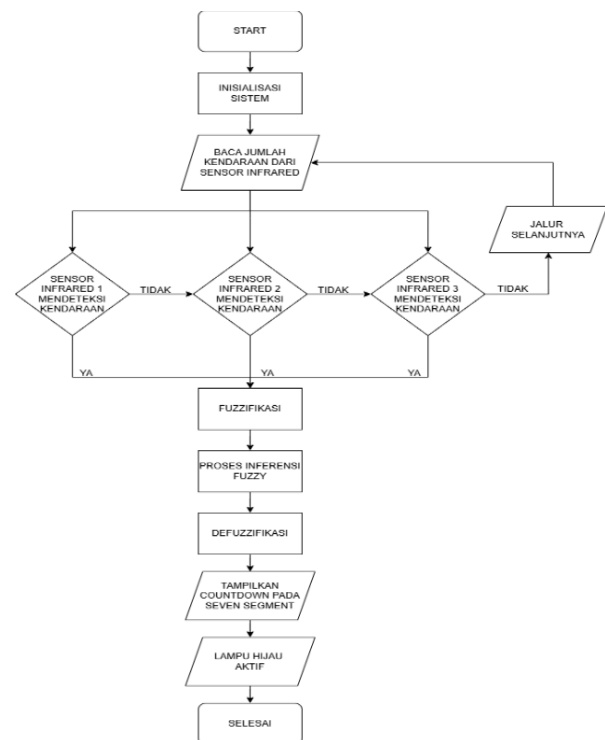


Gambar 4 Rancangan *Hardware*

Rangkaian pada Gambar 4 dirancang sebagai sistem pengaturan lampu lalu lintas otomatis berbasis logika Fuzzy, di mana seluruh komponen bekerja secara terintegrasi untuk mengatur arus kendaraan secara dinamis berdasarkan tingkat kepadatan lalu lintas. Setiap jalur dilengkapi tiga sensor infrared yang dipasang berurutan dari titik terdekat hingga terjauh dari persimpangan untuk mendeteksi keberadaan kendaraan dan menghasilkan sinyal digital (HIGH/LOW). Aktivasi sensor digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat kepadatan, yaitu sensor 1 aktif menunjukkan kondisi sedikit kendaraan, sensor 1 dan 2 aktif menunjukkan kepadatan sedang, sedangkan seluruh sensor aktif menunjukkan kondisi ramai. Data dari total 12 sensor ini menjadi masukan utama bagi mikrokontroler Arduino Mega yang memprosesnya menggunakan algoritma Fuzzy Logic metode Mamdani untuk menentukan durasi waktu nyala lampu hijau pada setiap jalur secara adaptif sesuai kondisi lalu lintas. Hasil inferensi kemudian mengendalikan modul lampu lalu lintas yang

terdiri dari LED merah, kuning, dan hijau sebagai indikator berhenti, bersiap, dan berjalan. Selain itu, empat modul TM1637 seven segment digunakan untuk menampilkan waktu mundur (countdown) pada setiap jalur, sehingga pengendara dapat mengetahui sisa waktu sebelum perubahan lampu terjadi.

Alur kerja sistem diperlihatkan dalam flowchart gambar 5



Gambar 5 Flowchart Sistem

Alur kerja alat pada Gambar 5 mengikuti tahapan yang dimulai dari inisialisasi sistem hingga proses pengambilan keputusan berbasis logika fuzzy. Sistem diawali dengan inisialisasi Arduino Mega 2560 R3, konfigurasi sensor Infrared, modul LED lampu lalu lintas, serta seven segment TM1637. Setelah inisialisasi, sistem membaca jumlah kendaraan dari

Sensor Infrared 1, 2, serta 3 secara berurutan. Jika suatu sensor tidak mendeteksi kendaraan, sistem berpindah ke jalur berikutnya. Apabila kendaraan terdeteksi, data pembacaan digunakan sebagai input untuk proses logika fuzzy. Proses pengolahan terdiri dari fuzzifikasi untuk menentukan derajat keanggotaan, inferensi menggunakan metode Mamdani berdasarkan rule base, serta defuzzifikasi dengan metode centroid untuk menghasilkan nilai durasi lampu hijau. Nilai durasi tersebut kemudian ditampilkan dalam bentuk countdown pada seven segment dan digunakan untuk mengaktifkan lampu hijau pada jalur terkait. Setelah waktu habis, sistem kembali membaca kondisi sensor dan mengulangi proses sesuai siklus yang telah dirancang. Dengan mekanisme ini, sistem mampu mengatur durasi lampu lalu lintas secara otomatis dan adaptif berdasarkan kondisi kendaraan pada setiap jalur.

Data dan Analisis

1. Sumber Data

Pada penelitian ini sumber data berupa jumlah kendaraan yang terdeteksi oleh sensor Infrared pada setiap jalur persimpangan. Data yang digunakan merupakan hasil pembacaan langsung dari prototipe sistem lampu lalu lintas otomatis berbasis logika fuzzy. Pengambilan data dilakukan dengan beberapa variasi kondisi kepadatan kendaraan, yaitu sedikit, sedang, dan ramai, untuk menguji respons sistem terhadap perubahan jumlah kendaraan.

2. Teknik Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan mengamati hasil pembacaan sensor Infrared pada masing-masing jalur. Data yang dicatat

meliputi jumlah kendaraan yang terdeteksi, nilai input (crisp), derajat keanggotaan hasil fuzzifikasi, serta nilai keluaran hasil defuzzifikasi berupa durasi lampu hijau.

Proses pencatatan dilakukan secara bertahap untuk setiap skenario kepadatan kendaraan. Nilai hasil pembacaan kemudian disimpan dan digunakan sebagai bahan analisis kinerja sistem dalam menentukan durasi lampu lalu lintas.

3. Validasi Sistem

Prosedur validasi dilakukan dengan membandingkan hasil keluaran sistem terhadap kondisi jumlah kendaraan yang diberikan sebagai input. Sistem dikatakan bekerja dengan baik apabila durasi lampu hijau yang dihasilkan meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah kendaraan.

Selain itu, dilakukan pengujian berulang untuk memastikan konsistensi proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi. Validasi juga mencakup pengamatan terhadap respons sistem dalam menampilkan *countdown* pada seven segment serta pengaktifan lampu hijau sesuai durasi yang telah dihitung.

4. Analisis Data

Data yang terkumpul dianalisis untuk mengevaluasi kinerja metode logika fuzzy dalam mengatur durasi lampu lalu lintas. Analisis dilakukan dengan membandingkan variasi jumlah kendaraan terhadap nilai durasi lampu hijau yang dihasilkan sistem.

Tahap pertama adalah menghitung derajat keanggotaan berdasarkan fungsi fuzzy yang telah ditentukan. Tahap kedua adalah mengevaluasi hasil inferensi berdasarkan rule base yang digunakan. Tahap terakhir adalah menganalisis hasil defuzzifikasi menggunakan metode centroid untuk memastikan nilai keluaran bersifat

proporsional terhadap tingkat kepadatan kendaraan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perancangan Sistem

Sistem lampu lalu lintas adaptif berbasis logika fuzzy dengan metode Mamdani pada penelitian ini berhasil direalisasikan dalam bentuk prototipe persimpangan empat arah. Sistem dirancang untuk mendeteksi tingkat kepadatan kendaraan pada setiap ruas jalan dan secara adaptif menentukan durasi lampu hijau berdasarkan hasil proses inferensi fuzzy. Implementasi sistem dilakukan dalam bentuk prototype skala laboratorium pada persimpangan yang merepresentasikan kondisi lalu lintas sebenarnya sehingga memungkinkan evaluasi performa sistem secara langsung.

Prototype skala laboratorium yang telah direalisasikan ditunjukkan pada Gambar 6. Setiap ruas jalan dilengkapi dengan beberapa sensor infrared yang berfungsi mendeteksi keberadaan kendaraan pada area deteksi. Sensor ditempatkan pada sisi jalur untuk membaca objek berupa prototipe kendaraan yang melintas atau berhenti pada area tertentu. Data yang diperoleh dari sensor kemudian dikirimkan ke mikrokontroler Arduino Mega 2560 yang berperan sebagai pusat pemrosesan data dalam sistem.



Gambar 6. Prototipe sistem lampu lalu lintas berbasis fuzzy

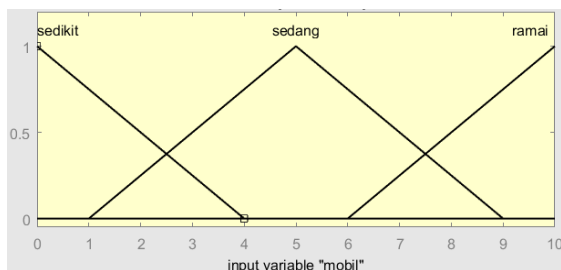
Data sensor diproses melalui pendekatan Fuzzy Logic Mamdani guna mengelompokkan tingkat kepadatan kendaraan pada tiga kategori yaitu sedikit, sedang, dan ramai. Berdasarkan hasil klasifikasi tersebut, sistem menentukan durasi lampu hijau yang sesuai pada setiap jalur persimpangan. Pendekatan ini memungkinkan sistem bekerja secara adaptif, sehingga waktu nyala lampu dapat menyesuaikan dengan kondisi lalu lintas yang dinamis.

Pada setiap jalur dipasang modul lampu lalu lintas yang terdiri dari LED merah, kuning, dan hijau sebagai indikator kondisi berhenti, bersiap, dan berjalan bagi kendaraan. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan modul seven segment yang berfungsi sebagai penampil waktu hitung mundur (*countdown timer*) untuk memberikan informasi sisa waktu sebelum perubahan lampu terjadi. Desain prototipe jalan dibuat menyerupai kondisi lalu lintas nyata dengan marka jalan dan pembatas jalur, sedangkan tata letak sensor dan lampu disusun secara simetris pada keempat sisi persimpangan untuk memastikan sistem dapat merespons perubahan kepadatan lalu lintas secara seimbang.

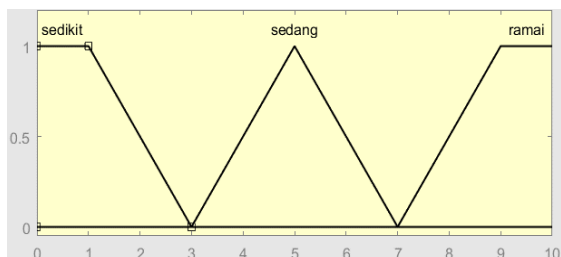
B. Pemodelan dan Pengujian Sistem Fuzzy

Validasi rancangan sistem fuzzy dilakukan menggunakan MATLAB Fuzzy Logic Toolbox. Tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa fungsi keanggotaan, aturan fuzzy, dan proses defuzzifikasi yang digunakan dalam sistem mampu menghasilkan keputusan yang konsisten sebelum diimplementasikan pada perangkat keras.

Sistem memiliki dua variabel input yaitu jumlah kendaraan mobil dan jumlah kendaraan motor. Kedua variabel tersebut dibagi ke dalam tiga himpunan fuzzy yaitu sedikit, sedang, dan ramai. Rentang nilai untuk variabel mobil ditetapkan sebagai sedikit (0–4 kendaraan), sedang (1–9 kendaraan), dan ramai (6–10 kendaraan). Sementara itu, variabel motor memiliki rentang sedikit (0–3 kendaraan), sedang (3–7 kendaraan), dan ramai (7–10 kendaraan). Fungsi keanggotaan untuk variabel input tersebut ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8.

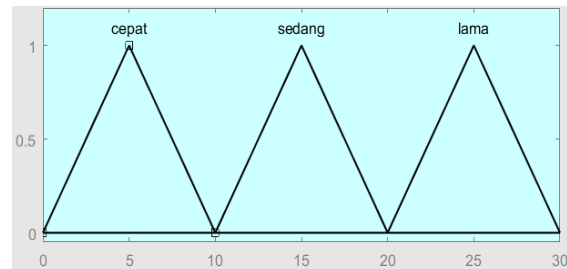


Gambar 7. Fungsi keanggotaan jumlah kendaraan mobil



Gambar 8. Fungsi keanggotaan jumlah kendaraan motor

Variabel output dalam sistem berupa durasi lampu hijau dengan rentang nilai antara 0–30 detik. Output tersebut dibagi menjadi tiga kategori yaitu cepat (0–10 detik), sedang (10–20 detik), dan lama (20–30 detik). Fungsi keanggotaan untuk variabel output ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Fungsi keanggotaan durasi lampu hijau

Hubungan antara variabel input dan output ditentukan melalui rule base yang ditunjukkan pada Tabel 1. Aturan fuzzy tersebut menggambarkan bahwa semakin tinggi tingkat kepadatan kendaraan, maka durasi lampu hijau yang diberikan akan semakin lama.

Tabel 1. Rule Base Sistem Fuzzy

Kondisi Kendaraan	Output Lampu
Mobil sedikit atau motor sedikit	Cepat
Mobil sedang atau motor sedang	Sedang
Mobil ramai atau motor ramai	Lama

Pernyataan Rule Base Fuzzy dari Tabel 1 dapat ditulis sebagai berikut:

- (R1) IF Mobil Sedikit OR Motor Sedikit maka *Traffic Light* Cepat.
- (R2) IF Mobil Sedang OR Motor Sedang maka *Traffic Light* Sedang.
- (R3) IF Mobil Ramai OR Motor Ramai maka *Traffic Light* Lama.

Pada tahap inferensi fuzzy digunakan operasi MAX untuk menentukan nilai terbesar dari derajat keanggotaan setiap aturan. Hasil inferensi kemudian digabungkan melalui proses agregasi

sebelum dilakukan proses defuzzifikasi menggunakan metode Centroid (*Center of Area*) untuk menghasilkan nilai output tegas berupa durasi lampu hijau. Sebagai contoh pengujian, digunakan parameter input berupa jumlah kendaraan mobil sebanyak 7 kendaraan dan motor sebanyak 8 kendaraan. Berdasarkan proses fuzzifikasi dan inferensi, sistem menghasilkan durasi lampu hijau yang relatif lebih lama karena kondisi kendaraan berada pada kategori kepadatan tinggi.

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menentukan durasi lampu hijau berdasarkan tingkat kepadatan kendaraan pada setiap ruas jalan. Pengujian dilakukan menggunakan beberapa skenario kondisi lalu lintas yang merepresentasikan variasi tingkat kepadatan kendaraan yaitu sepi, sedang, dan ramai.

Skenario pengujian yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.

C. Pengujian Kinerja Sistem

Tabel 2 Skenario Pengujian

No	Ruas 1	Ruas 2	Ruas 3	Ruas 4	Output
1	Sepi	Sepi	Sepi	Sepi	Seluruh ruas berdurasi cepat
2	Ramai	Sepi	Sepi	Sepi	Ruas 1 berdurasi paling lama
3	Sedang	Sedang	Sedang	Sedang	Seluruh ruas berdurasi menengah
4	Sepi	Ramai	Sedang	Sepi	Ruas 2 terlama, ruas 3 menengah
5	Ramai	Ramai	Sepi	Sedang	Ruas 1–2 lebih lama, ruas 4 menengah
6	Sedang	Sepi	Ramai	Ramai	Ruas 3–4 lebih lama, ruas 1 menengah

Hasil pengujian sistem terhadap skenario tersebut diatas ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sistem

No	Ruas 1 (detik)	Ruas 2 (detik)	Ruas 3 (detik)	Ruas 4 (detik)	Status
1	10	10	10	10	Berhasil

2	30	10	10	10	Berhasil
3	20	20	20	20	Berhasil
4	10	30	20	10	Berhasil
5	30	30	10	20	Berhasil
6	20	10	30	30	Berhasil

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan durasi lampu hijau yang sesuai dengan kondisi kepadatan kendaraan pada setiap ruas jalan. Pada kondisi sepi, sistem menghasilkan durasi lampu hijau sebesar 10 detik, pada kondisi sedang sebesar 20 detik, dan pada kondisi ramai sebesar 30 detik. Selain itu, sistem juga mampu memberikan prioritas waktu yang lebih lama pada jalur dengan kepadatan kendaraan yang lebih tinggi.

D. Analisis dan Diskusi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan keputusan yang konsisten pada seluruh skenario pengujian dengan tingkat keberhasilan 100%. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan fuzzy Mamdani efektif diterapkan pada sistem pengaturan lampu lalu lintas adaptif pada skala prototipe. Meskipun penelitian ini masih berada pada tahap prototipe skala laboratorium, hasil pengujian menunjukkan bahwa pendekatan yang diusulkan memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut pada sistem pengaturan lalu lintas skala nyata dengan penyesuaian pada jenis sensor dan integrasi sistem jaringan lalu lintas.

Jika dibandingkan dengan sistem lampu lalu lintas konvensional yang menggunakan waktu tetap (*fixed time control*), pendekatan fuzzy memiliki keunggulan karena mampu menyesuaikan durasi lampu secara dinamis sesuai kondisi lalu lintas. Beberapa penelitian seperti penelitian dari Pohan (2021) dan Abdou

(2022) menunjukkan bahwa metode fuzzy dapat meningkatkan efisiensi pengaturan lalu lintas dengan mengurangi waktu tunggu kendaraan pada persimpangan.

Namun demikian, dibandingkan dengan penelitian lain yang menggunakan sensor kamera atau computer vision, penggunaan sensor infrared pada penelitian ini memiliki keterbatasan dalam mendeteksi kendaraan secara lebih kompleks, seperti membedakan jenis kendaraan atau mendeteksi kendaraan dalam jumlah besar pada jarak yang lebih jauh. Oleh karena itu, meskipun sistem yang dikembangkan pada penelitian ini telah menunjukkan performa yang baik pada skala prototipe, pengembangan lebih lanjut masih diperlukan untuk meningkatkan akurasi dan skalabilitas sistem.

Selain itu, penggunaan metode fuzzy Mamdani pada penelitian ini relatif sederhana karena hanya menggunakan tiga aturan utama. Pada implementasi sistem lalu lintas skala besar, jumlah aturan fuzzy dapat diperluas dengan mempertimbangkan lebih banyak variabel, seperti panjang antrian kendaraan, waktu tunggu kendaraan, atau kondisi lalu lintas pada jalur lainnya.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem lampu lalu lintas adaptif berbasis Fuzzy Logic Mamdani memiliki potensi untuk diterapkan dalam pengelolaan lalu lintas cerdas (*intelligent traffic system*), khususnya pada persimpangan dengan tingkat kepadatan kendaraan yang bervariasi. Dengan

pengembangan lebih lanjut pada aspek sensor dan algoritma pengambilan keputusan, sistem ini berpotensi meningkatkan efisiensi pengaturan lalu lintas serta mengurangi kemacetan pada persimpangan jalan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan merealisasikan prototipe sistem lampu lalu lintas adaptif berbasis metode Fuzzy Logic Mamdani yang mampu menyesuaikan durasi lampu hijau secara dinamis sesuai tingkat kepadatan kendaraan. Sistem diimplementasikan menggunakan Arduino Mega 2560 yang terintegrasi dengan sensor infrared sebagai akuisisi data, modul LED sebagai aktuator, serta seven segment TM1637 sebagai penampil waktu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat mengklasifikasikan kepadatan kendaraan menjadi kategori sedikit, sedang, dan ramai melalui proses fuzzifikasi, kemudian menentukan durasi lampu hijau menggunakan inferensi aturan fuzzy dan defuzzifikasi metode centroid. Pada berbagai skenario lalu lintas, sistem menghasilkan durasi lampu hijau yang proporsional, yaitu sekitar 10 detik pada kondisi sepi, 20 detik pada kondisi sedang, dan 30 detik pada kondisi ramai. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan fuzzy lebih adaptif dibandingkan sistem lampu lalu lintas berbasis waktu tetap serta berpotensi dikembangkan lebih lanjut pada implementasi skala nyata melalui peningkatan teknologi sensor dan integrasi sistem pengendalian lalu lintas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada seluruh pihak atas terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdou, A. A., Farrag, M. H., Tolba, A. S., & Tolba, A. S. (2022). A Fuzzy Logic-Based Smart Traffic Management Systems. *Journal of Computer Science*, 18(11), 1085–1099. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2022.1085.1099>
- Bisht, A., Ravani, K., Chaturvedi, M., Kumar, N., & Tiwari, S. (2022). Indigenous design of a Traffic Light Control system responsive to the local traffic dynamics and priority vehicles. *Computers & Industrial Engineering*, 171, 108503. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108503>
- Desmira, D., Hamid, M. A., Bakar, N. A., Nurtanto, M., & Sunardi, S. (2022). A smart traffic light using a microcontroller based on the fuzzy logic. *IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI)*, 11(3), 809. <https://doi.org/10.11591/ijai.v11.i3.pp809-818>
- İnağ, T., & Arıkan, M. (2024). A Fuzzy Based Intelligent Traffic Light Control (ITLC) Method: An Implementation in Ankara City. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(1), 292–306. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1388486>
- Jafari, S., Shahbazi, Z., & Byun, Y.-C. (2022). Improving the Road and Traffic Control Prediction Based on Fuzzy Logic Approach in Multiple Intersections. *Mathematics*, 10(16), 2832. <https://doi.org/10.3390/math10162832>
- Kanimozhi, T., Reddy, G. R. V. K., & Kumar, N. R. (2024). IoT-Based Smart Signal System for Traffic Density Management and Emergency Vehicle Priority. *2024 International Conference*

- on Intelligent Systems and Advanced Applications (ICISAA)*, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/ICISAA62385.2024.10828938>
- Lyu, X. (2022). Recent Progress on Infrared Detectors: Materials and Applications. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 27, 191–200.
<https://doi.org/10.54097/hset.v27i.3747>
- Ouallane, A. A., Bahnasse, A., Bakali, A., & Talea, M. (2022). Overview of Road Traffic Management Solutions based on IoT and AI. *Procedia Computer Science*, 198, 518–523.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.279>
- Pohan, A. H., Latiff, L. A., Dziyauddin, R. A., & Wahab, N. H. A. (2021). Mitigating Traffic Congestion at Road Junction using Fuzzy Logic. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(8).
<https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120834>
- Putri, S. N., & Saputro, D. R. S. (2021). Construction fuzzy logic with curve shoulder in inference system mamdani. *Journal of Physics: Conference Series*, 1776(1), 012060.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1776/1/012060>
- Subair, S. O., Ibitoye, B. A., & Kuranga, A. T. (2024). Evaluation of Traffic Congestion in an Urban Roads: A Review. *ABUAD Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(2), 1–7.
<https://doi.org/10.53982/ajeas.2024.02.02.01-j>