



Smart Traffic Light Berbasis ESP32 dan *Internet of Things* menggunakan Logika Fuzzy untuk Pengendalian Kepadatan Lalu Lintas

Haikal Septian Hadi Putra¹, Abdul Azis^{2*}, Emidiana³

¹⁻³ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Palembang, Indonesia

Email: haikalseptianhadiputra@gmail.com¹, azis@univpgri-palembang.ac.id^{2*},
emidiana@univpgri-palembang.ac.id³

*Penulis Korespondensi: azis@univpgri-palembang.ac.id

Abstract. Traffic congestion and zebra crossing violations are common problems at road intersections due to fixed-time traffic light systems that are less adaptive to traffic conditions. This research aims to design and implement an ESP32 and Internet of Things (IoT)-based Smart Traffic Light system using the Mamdani Fuzzy Logic method to automatically regulate traffic light duration based on vehicle density. The system utilizes an inframerah sensor to detect vehicle density and an ultrasonic sensor to detect zebra crossing violations. Sensor data are processed by the ESP32 through fuzzification, inference, and defuzzification to determine the appropriate traffic light duration. The system is equipped with traffic light LEDs, a TM1637 countdown timer, a buzzer, and a Telegram Bot for real-time monitoring. Testing results showed that the inframerah sensor successfully detected vehicle density, while the ultrasonic sensor accurately detected objects at distances of 5–25 cm. The fuzzy logic system produced green light durations of 5, 20, and 30 seconds for low, medium, and high traffic densities, respectively. In addition, the Telegram Bot successfully sent real-time notifications of zebra crossing violations. The proposed system operates automatically, adaptively, and effectively to support traffic management and zebra crossing monitoring.

Keywords: ESP32; Internet of Things; Mamdani Fuzzy Logic; Smart Traffic Light; Telegram Bot.

Abstrak. Kemacetan lalu lintas dan pelanggaran pada area zebra cross merupakan permasalahan yang sering terjadi di persimpangan jalan akibat penggunaan lampu lalu lintas dengan waktu tetap yang kurang adaptif terhadap kondisi kendaraan. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem *Smart Traffic Light* berbasis ESP32 dan *Internet of Things* (IoT) menggunakan metode Logika Fuzzy Mamdani untuk mengatur durasi lampu lalu lintas secara otomatis berdasarkan tingkat kepadatan kendaraan. Sistem menggunakan sensor inframerah untuk mendeteksi kepadatan kendaraan dan Sensor Ultrasonik untuk mendeteksi pelanggaran pada area zebra cross. Data sensor diproses oleh ESP32 melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi untuk menentukan durasi lampu lalu lintas. Sistem juga dilengkapi LED traffic light, modul TM1637 sebagai *countdown timer*, buzzer sebagai alarm peringatan, dan Telegram Bot sebagai media monitoring *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor inframerah mampu mendeteksi jumlah kendaraan, sedangkan Sensor Ultrasonik mampu mendeteksi objek pada jarak 5–25 cm. Pengujian logika fuzzy menghasilkan durasi lampu hijau 5 detik, 20 detik, dan 30 detik untuk kondisi kepadatan rendah, sedang, dan tinggi. Selain itu, Telegram Bot berhasil mengirimkan notifikasi pelanggaran zebra cross secara *real-time*. Berdasarkan hasil pengujian, sistem mampu bekerja secara otomatis, adaptif, dan efektif dalam mendukung pengaturan lalu lintas serta monitoring pelanggaran zebra cross.

Kata kunci: ESP32; Internet of Things; Logika Fuzzy; Smart Traffic Light; Telegram Bot.

1. LATAR BELAKANG

Kemacetan lalu lintas merupakan salah satu permasalahan yang sering terjadi di kota-kota besar akibat meningkatnya jumlah kendaraan yang tidak sebanding dengan kapasitas jalan. Kondisi tersebut menyebabkan sistem lampu lalu lintas dengan durasi tetap menjadi kurang efektif karena tidak mampu menyesuaikan waktu penyalaan lampu dengan tingkat kepadatan kendaraan yang terus berubah sehingga antrean kendaraan semakin meningkat ('Abid et al., 2023; Sriharyani et al., 2023).

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan penerapan sistem lalu lintas yang lebih cerdas melalui integrasi sensor, mikrokontroler, dan jaringan internet. Pada sistem berbasis IoT, data yang diperoleh dari sensor dapat diproses oleh mikrokontroler ESP32 dan dikirimkan melalui jaringan internet sehingga kondisi lalu lintas dapat dipantau secara real-time (Machdani et al., 2020; Ramadhan et al., 2021; Yusuf et al., 2021). Selain itu, sensor inframerah dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi tingkat kepadatan kendaraan, sedangkan sensor ultrasonik dapat digunakan untuk mendeteksi kendaraan yang melanggar batas zebra cross ketika lampu merah menyala. Informasi dari sensor tersebut selanjutnya dapat dimanfaatkan sebagai dasar pemberian peringatan untuk meningkatkan keselamatan pejalan kaki dan ketertiban lalu lintas (Putra & Oktaviandi, 2022; Rahmawati et al., 2022).

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sistem *Smart Traffic Light* telah berkembang melalui penerapan *Internet of Things* (IoT), logika fuzzy, maupun teknologi pengendalian cerdas untuk meningkatkan efisiensi pengaturan lalu lintas. Kusumo & Salam (2023) berhasil mengembangkan sistem monitoring traffic light berbasis IoT, namun belum menerapkan logika fuzzy dalam penentuan durasi lampu lalu lintas secara adaptif. Ramadhan et al. (2021) juga telah menerapkan teknologi IoT pada sistem *Smart Traffic Light*, tetapi belum mengintegrasikan metode fuzzy sebagai dasar pengambilan keputusan. Sementara itu, Desmira et al. (2022) berhasil menerapkan logika fuzzy pada sistem *Smart Traffic Light*, namun belum dilengkapi dengan fasilitas monitoring berbasis IoT. Yusuf et al. (2021) menjelaskan bahwa pengembangan *Smart Traffic Light* masih terus diarahkan pada peningkatan efisiensi pengaturan lalu lintas melalui berbagai pendekatan teknologi, namun belum membahas integrasi antara ESP32, logika fuzzy, dan *Internet of Things* dalam satu sistem. Di sisi lain, penelitian mengenai deteksi pelanggaran zebra cross telah dilakukan oleh Putra & Oktaviandi (2022) serta Rahmawati et al. (2022), namun integrasi fitur tersebut dengan sistem *Smart Traffic Light* berbasis ESP32, *Internet of Things*, dan logika fuzzy masih sangat terbatas.

Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini menawarkan kebaruan melalui integrasi mikrokontroler ESP32, metode logika fuzzy Mamdani, dan *Internet of Things* (IoT) dalam satu sistem *Smart Traffic Light* untuk mengatur durasi lampu lalu lintas secara adaptif berdasarkan tingkat kepadatan kendaraan. Selain mengoptimalkan pengaturan waktu lampu lalu lintas, sistem juga dilengkapi dengan sensor ultrasonik untuk mendeteksi pelanggaran pada area zebra cross. Ketika pelanggaran terdeteksi, sistem akan mengaktifkan buzzer sebagai peringatan lokal serta mengirimkan notifikasi secara real-time melalui aplikasi Telegram kepada pengguna. Dengan demikian, sistem tidak hanya berfungsi mengoptimalkan arus kendaraan, tetapi juga meningkatkan aspek keselamatan pejalan kaki. Seluruh informasi

mengenai kondisi lampu lalu lintas, tingkat kepadatan kendaraan, dan pelanggaran zebra cross dapat dipantau melalui Telegram secara real-time. Integrasi seluruh komponen tersebut menghasilkan prototipe *Smart Traffic Light* yang adaptif, mudah dipantau dari jarak jauh, serta berpotensi mendukung pengembangan sistem transportasi cerdas berbasis *Internet of Things*.

2. KAJIAN TEORITIS

Smart Traffic Light

Smart Traffic Light merupakan sistem pengendalian lampu lalu lintas yang mampu menyesuaikan durasi penyalan lampu secara dinamis berdasarkan kondisi lalu lintas. Berbeda dengan sistem konvensional yang menggunakan waktu tetap, *Smart Traffic Light* memanfaatkan sensor, mikrokontroler, serta algoritma pengambilan keputusan untuk mengoptimalkan pengaturan arus kendaraan sehingga mampu mengurangi antrean dan meningkatkan efisiensi pada persimpangan jalan (Yusuf et al., 2021).

Penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) pada *Smart Traffic Light* memungkinkan proses pengumpulan, pengolahan, dan pengiriman data dilakukan secara real-time melalui jaringan internet. Dengan memanfaatkan sensor sebagai perangkat akuisisi data dan mikrokontroler sebagai pusat pengendali, sistem dapat memantau kondisi lalu lintas serta melakukan pengendalian lampu secara lebih adaptif. Selain itu, integrasi komunikasi internet memungkinkan proses monitoring dilakukan dari jarak jauh sehingga mendukung pengembangan Intelligent Transportation System (ITS) (Ramadhan et al., 2021).

Dalam penelitian ini, sistem *Smart Traffic Light* dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama, sensor inframerah untuk mendeteksi tingkat kepadatan kendaraan, sensor ultrasonik untuk mendeteksi pelanggaran pada area zebra cross, serta metode logika fuzzy Mamdani sebagai dasar pengambilan keputusan dalam menentukan durasi penyalan lampu lalu lintas. Integrasi komponen tersebut diharapkan mampu menghasilkan sistem pengendalian lalu lintas yang adaptif sekaligus mendukung monitoring berbasis *Internet of Things*.

Logika Fuzzy Mamdani

Logika fuzzy merupakan salah satu metode kecerdasan buatan yang digunakan untuk menangani ketidakpastian dengan merepresentasikan suatu kondisi ke dalam variabel linguistik, seperti rendah, sedang, dan tinggi. Pada metode Mamdani, proses pengambilan keputusan dilakukan melalui empat tahapan utama, yaitu fuzzifikasi, inferensi berdasarkan aturan IF-THEN, agregasi aturan, dan defuzzifikasi untuk menghasilkan nilai tegas sebagai keluaran sistem (Variyani, 2021).

Pada sistem *Smart Traffic Light*, logika fuzzy digunakan untuk menentukan durasi penyalan lampu hijau berdasarkan tingkat kepadatan kendaraan yang dideteksi oleh sensor. Pendekatan ini memungkinkan sistem menyesuaikan waktu penyalan lampu secara adaptif sesuai dengan kondisi lalu lintas sehingga lebih efektif dibandingkan sistem dengan durasi tetap. Dengan demikian, antrean kendaraan pada persimpangan dapat dikurangi dan kelancaran arus lalu lintas dapat ditingkatkan (Desmira et al., 2022). Berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa logika fuzzy memiliki kemampuan yang baik dalam mengendalikan sistem lalu lintas karena mampu merespons perubahan kondisi kendaraan secara real-time (Tunc et al., 2021; Tunc & Soylemez, 2023).

ESP32 dan *Internet of Things* (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang menghubungkan perangkat fisik, sensor, dan sistem pengolahan data melalui jaringan internet sehingga memungkinkan proses pengumpulan, pertukaran, dan pemantauan data dilakukan secara otomatis dan real-time. Teknologi IoT banyak diterapkan pada sistem monitoring dan kendali karena mampu mengintegrasikan perangkat keras dengan aplikasi pengguna melalui jaringan komunikasi (Al-Fuqaha et al., 2015).

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis sistem tertanam yang dikembangkan oleh Espressif Systems dan banyak digunakan pada aplikasi IoT. ESP32 memiliki prosesor dual-core serta dilengkapi dengan komunikasi nirkabel Wi-Fi dan Bluetooth sehingga mampu melakukan akuisisi data sensor, pengolahan data, dan komunikasi melalui jaringan internet dalam satu perangkat. Kemampuan tersebut menjadikan ESP32 sesuai digunakan sebagai pusat kendali pada sistem monitoring dan otomasi berbasis IoT (Maier et al., 2017). Implementasi ESP32 pada sistem IoT telah banyak digunakan untuk pengendalian dan pemantauan secara real-time, seperti sistem pengendali temperatur berbasis IoT (Nurdiana et al., 2022). Selain itu, integrasi ESP32 dengan platform monitoring dan aplikasi Telegram memungkinkan informasi kondisi sistem dikirimkan kepada pengguna melalui jaringan internet secara cepat (Bestari & Wibowo, 2023).

Pada penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai pusat kendali yang menerima data dari sensor ultrasonik dan sensor inframerah, kemudian melakukan pengolahan data menggunakan metode logika fuzzy untuk menentukan durasi lampu lalu lintas. Selanjutnya, informasi kondisi kepadatan kendaraan dan pelanggaran pada area zebra cross dikirimkan melalui jaringan internet menggunakan aplikasi Telegram sehingga proses monitoring dapat dilakukan secara real-time oleh pengguna.

Sensor Ultrasonik dan Sensor Inframerah

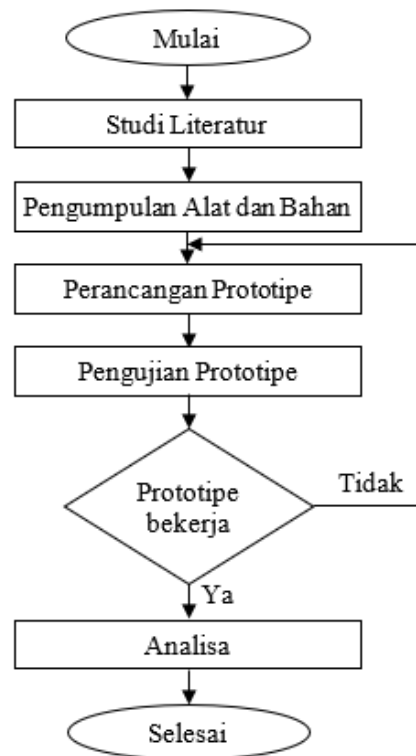
Sensor ultrasonik merupakan sensor yang bekerja dengan memanfaatkan gelombang ultrasonik untuk mendeteksi keberadaan objek berdasarkan waktu tempuh gelombang yang dipancarkan dan dipantulkan kembali oleh objek. Sensor ini banyak digunakan pada berbagai sistem otomatis karena mampu melakukan pengukuran jarak serta mendeteksi keberadaan objek tanpa kontak langsung (Azis et al., 2023).

Sensor inframerah merupakan sensor yang bekerja dengan memanfaatkan pancaran dan penerimaan sinar inframerah untuk mendeteksi keberadaan objek berdasarkan perubahan intensitas cahaya yang diterima. Sensor ini banyak diterapkan pada sistem otomatis seperti pendeteksi objek dan sistem kendali berbasis mikrokontroler (Azis & Kartika, 2021; Pebrianti & Azis, 2025).

Pada penelitian ini, sensor ultrasonik digunakan untuk mendeteksi keberadaan kendaraan pada area zebra cross sebagai indikator pelanggaran ketika lampu merah menyala, sedangkan sensor inframerah digunakan untuk mendeteksi jumlah kendaraan pada setiap jalur persimpangan sebagai parameter tingkat kepadatan lalu lintas. Data hasil pembacaan kedua sensor kemudian diproses oleh ESP32 menggunakan logika fuzzy untuk menentukan durasi lampu hijau, serta dikirimkan melalui aplikasi Telegram sebagai sistem monitoring berbasis IoT.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji sistem *Smart Traffic Light* berbasis ESP32 dan *Internet of Things* (IoT). Sistem menerapkan metode Logika Fuzzy Mamdani untuk menentukan durasi lampu hijau berdasarkan tingkat kepadatan kendaraan yang dideteksi oleh sensor inframerah, sedangkan sensor ultrasonik digunakan untuk mendeteksi pelanggaran pada area zebra crossing. Perangkat yang digunakan meliputi ESP32, sensor inframerah, sensor ultrasonik, LED traffic light, modul TM1637, buzzer, Arduino IDE, dan Telegram Bot. Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

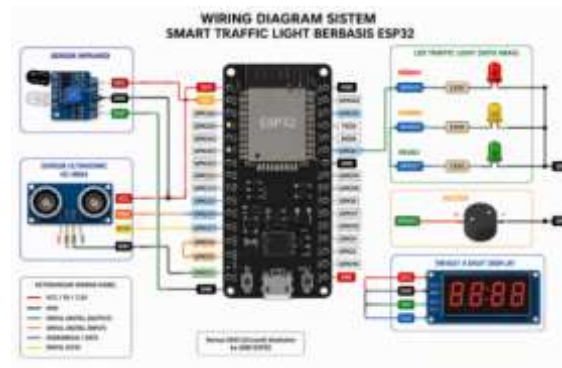
Pengumpulan Alat dan Bahan

Tahap pengumpulan alat dan bahan dilakukan untuk menyiapkan seluruh komponen yang diperlukan dalam pembuatan prototipe *Smart Traffic Light* Berbasis ESP32 dan *Internet of Things* menggunakan Logika Fuzzy untuk Pengendalian Kepadatan Lalu Lintas. Adapun alat dan bahan yang digunakan terdiri dari laptop/komputer, solder, obeng, tang potong, multimeter, penggaris, glue gun, bor mini, cutter, bread board, ESP32, Inframerah Sensor, HC-SR04, LED, Buzzer, TM1637, kabel jumper, resistor, Kabel USB, adaptor, triplex.



Gambar 2. Alat dan bahan.

Perancangan Prototipe



Gambar 3. Skema rangkaian prototipe .

Gambar 3 menunjukkan skema rangkaian perangkat keras (hardware) pada prototipe *Smart Traffic Light System* berbasis ESP32. Pada rangkaian tersebut, ESP32 berperan sebagai pusat kendali utama yang bertugas menerima data dari sensor, melakukan proses pengolahan data menggunakan logika fuzzy, serta mengendalikan perangkat keluaran (output) berupa lampu lalu lintas, buzzer, dan tampilan waktu.

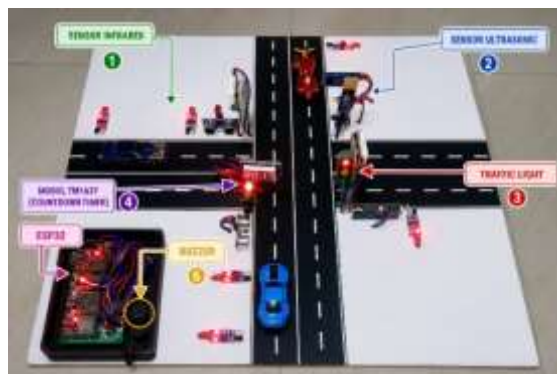
Pada bagian input, sistem menggunakan sensor inframerah dan sensor ultrasonik HC-SR04. Sensor inframerah digunakan untuk mendeteksi keberadaan kendaraan pada masing-masing jalur persimpangan sebagai parameter tingkat kepadatan lalu lintas. Sementara itu, sensor ultrasonik digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek atau kendaraan pada area zebra cross sebagai indikator terjadinya pelanggaran ketika lampu lalu lintas berada pada kondisi merah. Data hasil pembacaan sensor kemudian dikirimkan menuju ESP32 melalui pin input digital untuk diproses lebih lanjut.

Bagian keluaran sistem terdiri dari lampu lalu lintas tiga warna (merah, kuning, dan hijau) pada setiap jalur. Lampu tersebut dikendalikan oleh pin digital ESP32 berdasarkan hasil keputusan logika fuzzy yang menentukan lama waktu nyala lampu hijau sesuai tingkat kepadatan kendaraan. Selain itu, sistem dilengkapi dengan buzzer yang berfungsi sebagai indikator peringatan ketika terdeteksi pelanggaran pada area zebra cross.

Pada rangkaian juga terdapat modul display TM1637 yang digunakan untuk menampilkan informasi waktu hitung mundur dari lampu lalu lintas sehingga pengguna jalan dapat mengetahui sisa waktu perpindahan lampu. Seluruh komponen memperoleh sumber tegangan dari sistem catu daya yang terhubung dengan ESP32 sehingga proses komunikasi dan pengendalian antarperangkat dapat berjalan dengan baik.

Secara keseluruhan, alur kerja rangkaian dimulai dari sensor membaca kondisi lalu lintas, kemudian data tersebut diproses oleh ESP32 menggunakan metode logika fuzzy Mamdani untuk menentukan keputusan pengaturan durasi lampu lalu lintas. Hasil keputusan selanjutnya

diterapkan pada lampu lalu lintas, buzzer, dan ditampilkan melalui modul TM1637. Selain itu, data kondisi sistem dikirimkan melalui jaringan internet menggunakan fitur IoT untuk mendukung proses monitoring secara real-time melalui aplikasi Telegram. Bentuk prototipe keseluruhan sistem yang telah dirancang dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Prototipe.

Pengujian Prototipe

Pengujian Sensor Inframerah

Sensor inframerah digunakan sebagai input utama untuk menentukan tingkat kepadatan kendaraan. Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi jumlah kendaraan pada jalur prototipe untuk mengetahui respons sensor terhadap perubahan kondisi lalu lintas.



Gambar 5. Pengujian Sensor Inframerah.

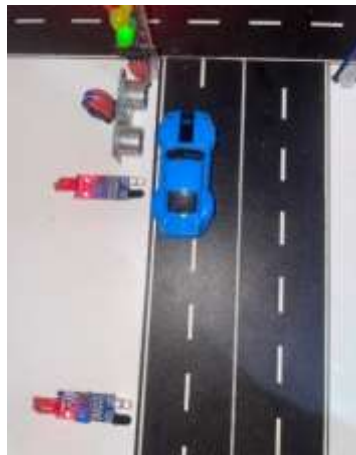
Tabel 1. Pengujian Sensor Inframerah.

No	Jumlah Kendaraan	Hasil Deteksi	Kondisi Sistem
1	0 Kendaraan	Tidak Terdeteksi	Normal
2	1 Kendaraan	Terdeteksi	Normal
3	2 Kendaraan	Terdeteksi	Sedang
4	3 Kendaraan	Terdeteksi	Padat
5	4 Kendaraan	Terdeteksi	Padat

Berdasarkan hasil pengujian, sensor inframerah mampu memberikan data berdasarkan jumlah kendaraan yang terdeteksi. Perubahan jumlah kendaraan menghasilkan perubahan kondisi kepadatan lalu lintas yang selanjutnya digunakan sebagai variabel masukan pada sistem fuzzy Mamdani.

Pengujian Sensor Ultrasonik

Sensor ultrasonik digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek pada area zebra cross. Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi jarak objek terhadap sensor untuk mengetahui batas kemampuan deteksi.



Gambar 6. Pengujian Sensor Ultrasonik.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sensor Ultrasonik.

No	Jarak Subjek	Hasil Deteksi	Status Buzzer
1	2 cm	Terdeteksi	Aktif
2	4 cm	Terdeteksi	Aktif
3	6 cm	Terdeteksi	Aktif
4	8 cm	Tidak Terdeteksi	Tidak Aktif
5	10 cm	Tidak Terdeteksi	Tidak Aktif

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor ultrasonik mampu mendeteksi objek pada jarak 2-6 cm. Ketika objek berada pada area deteksi saat kondisi lampu merah, sistem memberikan respons berupa aktivasi buzzer sebagai indikator pelanggaran zebra cross.

Pengujian Metode Fuzzy Mamdani untuk Pengaturan Durasi Lampu

Metode Logika Fuzzy Mamdani diterapkan pada sistem *Smart Traffic Light* untuk menentukan durasi lampu hijau berdasarkan tingkat kepadatan kendaraan. Data jumlah kendaraan yang diperoleh dari sensor inframerah digunakan sebagai variabel masukan (input variable) pada sistem fuzzy. Selanjutnya, data tersebut diproses melalui beberapa tahapan,

yaitu pembentukan himpunan fuzzy, fuzzifikasi, inferensi berdasarkan aturan (rule base), dan defuzzifikasi untuk menghasilkan nilai keluaran (output) berupa durasi lampu hijau.

Pengujian dilakukan dengan memberikan beberapa kondisi jumlah kendaraan yang merepresentasikan tingkat kepadatan lalu lintas, yaitu kondisi normal, sedang, dan padat. Hasil pengujian metode Fuzzy Mamdani dalam menentukan durasi lampu hijau ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Metode Fuzzy Mamdani.

No	Jumlah Kendaraan	Kondisi Fuzzy	Durasi Lampu Hijau	Status Pengujian
1	0-1 Kendaraan	Normal	5 detik	Berhasil
2	2 Kendaraan	Sedang	20 detik	Berhasil
3	3-4 Kendaraan	Padat	30 detik	Berhasil

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4, metode Fuzzy Mamdani mampu menentukan durasi lampu hijau berdasarkan tingkat kepadatan kendaraan. Pada kondisi lalu lintas normal, sistem memberikan durasi lampu hijau yang lebih singkat, sedangkan pada kondisi padat sistem memberikan durasi lampu hijau yang lebih lama. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pengaturan lampu lalu lintas secara adaptif berdasarkan perubahan kondisi kendaraan.

Pembentukan Himpunan Fuzzy

Pada penelitian ini, variabel input yang digunakan adalah jumlah kendaraan yang diperoleh dari sensor inframerah. Variabel input tersebut dikategorikan menjadi tiga himpunan fuzzy, yaitu Normal, Sedang, dan Padat. Variabel output berupa durasi lampu hijau juga dibagi menjadi tiga kategori, yaitu Cepat, Sedang, dan Lama. Pembentukan himpunan fuzzy dilakukan untuk mengubah nilai masukan berupa jumlah kendaraan menjadi bentuk linguistik yang dapat diproses oleh sistem fuzzy. Parameter himpunan fuzzy yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter Himpunan Fuzzy Input dan Output.

Variabel	Himpunan Fuzzy	Rentang Nilai
Jumlah kendaraan	Normal	0-1 kendaraan
Jumlah kendaraan	Sedang	1-3 kendaraan
Jumlah kendaraan	Padat	3-4 kendaraan
Durasi lampu hijau	Cepat	5 detik
Durasi lampu hijau	Sedang	20 detik
Durasi lampu hijau	Lama	30 detik
Variabel	Himpunan Fuzzy	Rentang Nilai

Berdasarkan Tabel 4, jumlah kendaraan yang terdeteksi sensor akan dikonversikan menjadi nilai linguistik sesuai dengan kategori fuzzy yang telah ditentukan. Nilai tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam proses pengambilan keputusan menggunakan aturan fuzzy Mamdani.

Proses Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses mengubah nilai masukan numerik dari sensor inframerah menjadi nilai derajat keanggotaan pada himpunan fuzzy. Pada penelitian ini, jumlah kendaraan yang terdeteksi digunakan sebagai variabel input untuk menentukan tingkat kepadatan lalu lintas. Sebagai contoh, ketika sensor inframerah mendeteksi 2 kendaraan, maka proses fuzzifikasi menghasilkan nilai derajat keanggotaan sebagai berikut:

Tabel 5. Hasil Proses Fuzzifikasi.

Variabel	Nilai Input	Himpunan Fuzzy	Derajat Keanggotaan
Kepadatan Kendaraan	2 kendaraan	Normal	0
Kepadatan Kendaraan	2 kendaraan	Sedang	1
Kepadatan Kendaraan	2 kendaraan	Padat	0

Berdasarkan hasil fuzzifikasi tersebut, jumlah kendaraan sebanyak 2 kendaraan memiliki tingkat keanggotaan maksimum pada kategori Sedang, sehingga sistem akan menggunakan aturan fuzzy yang berkaitan dengan kondisi tersebut.

Proses Inferensi Fuzzy Mamdani

Tahap inferensi merupakan proses pengambilan keputusan berdasarkan aturan (rule base) yang telah dibuat. Aturan fuzzy yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Aturan Fuzzy Mamdani.

Rule	Kondisi Input	Output Durasi Lampu
R1	IF Kepadatan Normal THEN Durasi Cepat	5 detik
R2	IF Kepadatan Sedang THEN Durasi Sedang	20 detik
R3	IF Kepadatan Padat THEN Durasi Lama	30 detik

Sebagai contoh, pada kondisi jumlah kendaraan sebanyak 2 kendaraan diperoleh nilai: Normal = 0, Sedang = 1, Padat = 0.

Sehingga aturan yang aktif adalah: R2 = IF Kepadatan Sedang THEN Durasi Sedang dengan nilai firing strength: $\alpha_2 = 1$

Berdasarkan hasil inferensi tersebut, keluaran fuzzy yang diperoleh adalah kategori Durasi Sedang.

Proses Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan tahap akhir dalam metode Fuzzy Mamdani yang bertujuan mengubah keluaran fuzzy menjadi nilai tegas (crisp output) berupa durasi lampu hijau. Pada penelitian ini, metode defuzzifikasi yang digunakan adalah metode centroid karena mampu menghasilkan nilai keluaran berdasarkan keseluruhan daerah hasil inferensi. Persamaan metode centroid dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Z = \frac{\sum(\alpha_i z_i)}{\sum \alpha_i} \dots\dots\dots (i)$$

Keterangan:

Z = Nilai ouput akhir (durasi lampu)

α_i = Nilai firing strength atau derajat keanggotaan hasil inferensi

z_i = Nilai ouput dari setiap aturan fuzzy

Sebagai contoh, untuk jumlah kendaraan sebanyak 2 kendaraan:

Diketahui:

$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1, \alpha_3 = 0$

Maka:

$$Z = \frac{(0 \times 5) + (1 \times 20) + (0 \times 30)}{0 + 1 + 0} = \frac{20}{1} = 20 \text{ detik} \dots\dots\dots (ii)$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, sistem menghasilkan durasi lampu hijau sebesar 20 detik, sesuai dengan hasil implementasi pada prototipe.

Berdasarkan keseluruhan pengujian, metode Fuzzy Mamdani mampu menghasilkan keputusan durasi lampu hijau yang berbeda sesuai dengan tingkat kepadatan kendaraan. Semakin tinggi jumlah kendaraan yang terdeteksi, maka semakin besar durasi lampu hijau yang diberikan. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan metode Fuzzy Mamdani dapat meningkatkan kemampuan adaptasi sistem *Smart Traffic Light* dibandingkan pengaturan waktu tetap (fixed time control).

Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk mengetahui kinerja integrasi seluruh komponen pada sistem *Smart Traffic Light* berbasis ESP32 dan *Internet of Things* (IoT). Pengujian ini bertujuan untuk memastikan seluruh perangkat keras dan perangkat lunak dapat bekerja secara bersamaan, mulai dari proses pembacaan sensor, pengolahan data menggunakan logika fuzzy Mamdani, pengendalian lampu lalu lintas, aktivasi buzzer, tampilan countdown timer, hingga pengiriman informasi monitoring melalui Telegram Bot. Hasil pengujian keseluruhan sistem ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Keseluruhan Sistem.

No	Komponen Sistem	Hasil Pengujian	Status
1	Sensor Inframerah	Mendeteksi kondisi kepadatan kendaraan	Berhasil
2	Sensor Ultrasonik	Mendeteksi keberadaan objek pada area zebra cross	Berhasil
3	ESP32	Memproses seluruh data masukan dan mengendalikan sistem	Berhasil
4	LED Lampu Lalu Lintas	Menyalakan sesuai hasil keputusan sistem	Berhasil
5	Modul TM1637	Menampilkan countdown timer lampu lalu lintas	Berhasil
6	Buzzer	Aktif ketika terjadi pelanggaran pada area zebra cross	Berhasil
7	Logika Fuzzy Mamdani	Menentukan durasi lampu berdasarkan kepadatan kendaraan	Berhasil
8	Telegram Bot	Mengirimkan informasi monitoring secara real-time	Berhasil

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 7, seluruh komponen pada sistem *Smart Traffic Light* berbasis ESP32 dan IoT dapat bekerja sesuai dengan rancangan yang telah dibuat. Sistem mampu membaca kondisi lalu lintas melalui sensor inframerah, mendeteksi pelanggaran area zebra cross menggunakan sensor ultrasonik, menentukan durasi lampu berdasarkan metode fuzzy Mamdani, serta mengendalikan perangkat keluaran berupa lampu lalu lintas, buzzer, dan countdown timer.

Selain itu, sistem juga mampu mengirimkan informasi kondisi dan notifikasi pelanggaran melalui Telegram Bot sehingga proses monitoring dapat dilakukan secara otomatis dan real-time. Dengan demikian, integrasi antara sensor, mikrokontroler ESP32, metode fuzzy Mamdani, dan teknologi IoT telah berhasil diterapkan pada sistem *Smart Traffic Light*.

Analisa

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem *Smart Traffic Light* berbasis ESP32 dengan metode Logika Fuzzy Mamdani mampu bekerja sesuai dengan rancangan yang telah dibuat. Sistem berhasil mengintegrasikan beberapa komponen utama, yaitu sensor inframerah sebagai pendeteksi kepadatan kendaraan, sensor ultrasonik sebagai pendeteksi pelanggaran area zebra cross, ESP32 sebagai pusat pengolahan data, lampu lalu lintas sebagai aktuator, serta Telegram Bot sebagai media monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT).

Pada proses pengambilan data lalu lintas, sensor inframerah mampu memberikan informasi mengenai tingkat kepadatan kendaraan yang digunakan sebagai variabel masukan pada sistem fuzzy. Berdasarkan hasil pengujian, perubahan jumlah kendaraan menyebabkan perubahan kategori kondisi lalu lintas, yaitu normal, sedang, dan padat. Data tersebut menunjukkan bahwa sensor mampu menyediakan informasi yang diperlukan oleh sistem pengendali untuk menentukan keputusan adaptif.

Penerapan metode Fuzzy Mamdani memberikan kemampuan adaptasi terhadap perubahan kondisi lalu lintas. Berbeda dengan sistem lampu lalu lintas konvensional yang menggunakan waktu tetap (fixed time control), metode fuzzy mampu memberikan durasi lampu hijau yang berbeda sesuai dengan tingkat kepadatan kendaraan. Pada kondisi normal dengan jumlah kendaraan 0–1 kendaraan, sistem menghasilkan durasi lampu hijau sebesar 5 detik. Ketika jumlah kendaraan meningkat menjadi 2 kendaraan, sistem memberikan durasi 20 detik, sedangkan pada kondisi padat dengan 3–4 kendaraan, durasi lampu hijau meningkat menjadi 30 detik. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan prioritas waktu lebih panjang pada jalur dengan tingkat kepadatan kendaraan yang lebih tinggi.

Penggunaan metode Fuzzy Mamdani juga mampu menangani kondisi lalu lintas yang bersifat tidak pasti karena keputusan tidak hanya berdasarkan nilai batas tertentu, tetapi berdasarkan tingkat keanggotaan (membership degree) pada setiap kondisi. Proses fuzzifikasi memungkinkan perubahan data numerik jumlah kendaraan menjadi variabel linguistik, sedangkan proses inferensi dan defuzzifikasi menghasilkan keputusan durasi lampu yang lebih fleksibel.

Pada aspek keselamatan lalu lintas, integrasi sensor ultrasonik dan buzzer memberikan fungsi tambahan berupa pendeteksian pelanggaran pada area zebra cross. Berdasarkan hasil pengujian, buzzer hanya aktif ketika terdapat objek pada area zebra cross saat kondisi lampu merah. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya berfungsi sebagai pengatur durasi lampu, tetapi juga mampu memberikan peringatan terhadap potensi pelanggaran lalu lintas.

Implementasi IoT menggunakan ESP32 dan Telegram Bot meningkatkan kemampuan monitoring sistem. Data kondisi sistem dapat dikirimkan secara otomatis melalui jaringan WiFi sehingga pengguna dapat memperoleh informasi mengenai kejadian pelanggaran secara real-time. Penggunaan Telegram Bot memberikan keuntungan karena tidak membutuhkan aplikasi tambahan, sehingga proses pemantauan dapat dilakukan dengan lebih mudah dan efisien.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi sensor, metode Fuzzy Mamdani, mikrokontroler ESP32, dan teknologi IoT mampu menghasilkan sistem *Smart Traffic Light* yang adaptif dan responsif terhadap perubahan kondisi lalu lintas. Sistem yang dikembangkan memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi pengaturan lampu lalu lintas dengan menyesuaikan waktu penyalan berdasarkan kondisi kendaraan yang terdeteksi, sekaligus menyediakan fitur monitoring terhadap pelanggaran zebra cross.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem *Smart Traffic Light* berbasis ESP32 dan *Internet of Things* (IoT) menggunakan metode Logika Fuzzy Mamdani. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor inframerah mampu mendeteksi tingkat kepadatan kendaraan, Sensor Ultrasonik dapat mendeteksi pelanggaran pada area zebra crossing, serta metode Logika Fuzzy Mamdani menghasilkan durasi lampu hijau sebesar 5 detik, 20 detik, dan 30 detik sesuai dengan tingkat kepadatan kendaraan. Selain itu, Telegram Bot berhasil melakukan monitoring pelanggaran secara real-time, sehingga sistem mampu bekerja secara otomatis, adaptif, dan terintegrasi dalam mendukung pengaturan lalu lintas.

Saran

Penelitian ini masih terbatas pada pengujian skala prototipe dengan jumlah sensor yang terbatas. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan sistem pada persimpangan dengan beberapa jalur, menambahkan teknologi pendeteksi kendaraan seperti kamera berbasis *computer vision* atau sensor tambahan, serta melakukan pengujian pada kondisi lalu lintas yang sebenarnya agar kinerja sistem dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.

DAFTAR REFERENSI

- 'Abid, A., Pratama, F. F., & Fauzi, I. (2023). Perancangan Pengendalian dan Optimalisasi Lampu Lalu Lintas pada Persimpangan Jalan Muktisari Kebumen Menggunakan Algoritma Fuzzy Logic. *Technology and Informatics Insight Journal*, 2(1), 1–11. <https://doi.org/10.32639/tij.v1i1.390>
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). *Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications*. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- Azis, A., Emidiana, E., & Azukruf, F. (2023). Perancangan Prototipe Robot Pembawa Barang Otomatis Berbasis Arduino Uno DIP dengan Sensor Ultrasonik. *Elektrika*, 15(1), 29–38. <https://doi.org/10.26623/elektrika.v15i1.5924>
- Azis, A., & Kartika, I. (2021). Rancang Bangun Alat Cuci Tangan Pintar Menggunakan Sensor Inframerah Berbasis Arduino. *Electrician: Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro*, 15(3), 224–238. <https://doi.org/10.23960/elc.v15n3.2177>
- Bestari, D. N., & Wibowo, A. (2023). An IoT-Based Real-Time Weather Monitoring System Using Telegram Bot and Thingsboard Platform. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 17(6), 4–19. <https://doi.org/10.3991/ijim.v17i06.34129>

- Desmira, Hamid, M. A., Bakar, N. A., Nurtanto, M., & Sunardi. (2022). A Smart Traffic Light using a microcontroller based on the fuzzy logic. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 11(3), 809. <https://doi.org/10.11591/ijai.v11.i3.pp809-818>
- Hamid, M. A., Bakar, N. A., & Nurtanto, M. (2022). A Smart Traffic Light using a microcontroller based on the fuzzy logic. 11(3), 11591. <https://doi.org/10.11591/ijai.v11.i3.pp809-818>
- Kusumo, B., & Salam, F. (2023). Rancang Bangun Sistem Kontrol dan Alat Monitoring Traffic Light Menggunakan ESP8266 Berbasis IoT. *Jurnal Elektro*, 11(2), 247–256. <https://doi.org/https://jurnalteknik.unkris.ac.id/index.php/jie/article/view/280>
- Machdani, A., Attamimi, S., & Husodo, B. (2020). Sistem Kontrol Lampu Lalu Lintas Untuk Layanan Darurat Berbasis *Internet of Things* (IoT). *Jurnal Teknologi Elektro*, 10(3), 188–193. <https://doi.org/10.22441/jte.v10i3.007>
- Maier, A., Sharp, A., & Vagapov, Y. (2017). Comparative Analysis and Practical Implementation of the ESP32 Microcontroller Module for the *Internet of Things*. *Internet Technologies and Applications (ITA)*, 143–148. <https://doi.org/10.1109/ITECHA.2017.8101926>
- Nurdiana, N., Azis, A., & Perwati. (2022). Perancangan Pengendali Temperatur pada Alat Pengereng Makanan Berbasis IoT. *Electrician: Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro*, 16(3), 247–252. <https://doi.org/10.23960/elc.v16n3.2263>
- Pebrianti, I. K., & Azis, A. (2025). Perancangan Alat Pencuci Tangan Otomatis Menggunakan Sensor Inframerah Berbasis Arduino Uno. *Jurnal Surya Energy*, 9(2), 97–108. <https://doi.org/10.32502/jse.v9i2.440>
- Putra, E. K., & Oktaviandi, O. (2022). Prototipe Peringatan Pelanggaran Zebra Cross Pada Lampu Lalu Lintas Dengan Sirine Menggunakan Arduino. *Jurnal Teknik Elektro*, 11(2), 51–56. <https://doi.org/10.21063/JTE.2022.31331108>
- Rahmawati, Y., Simanjuntak, I. U. V., & Simorangkir, R. B. (2022). Rancang Bangun Purwarupa Sistem Peringatan Pengendara Pelanggar Zebra Cross Berbasis Mikrokontroler ESP-32 CAM. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 4(2), 189–195. <https://doi.org/10.37905/jjee.v4i2.14499>
- Ramadhan, Z. A., Mohammed, B. K., & Alwaily, A. H. (2021). Design and implement a Smart Traffic Light controlled by *Internet of Things*. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(4), 542–548. <https://doi.org/10.21533/pen.v9i4.2351>
- Sriharyani, L., Hadijah, I., & Samping, H. (2023). Kepadatan Lalu Lintas Akibat Hambatan Samping Ruas Jalan Ki Hajar Dewantara Kota Metro. *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi): Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 12(2), 179–189. <https://doi.org/10.24127/tp.v12i2.2596>
- Tunc, I., & Soylemez, M. T. (2023). Fuzzy logic and deep Q learning based control for traffic lights. *Alexandria Engineering Journal*, 67, 343–359. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.12.028>
- Tunc, I., Yesilyurt, A. Y., & Soylemez, M. T. (2021). Different fuzzy logic control strategies for traffic signal timing control with state inputs. *IFAC PapersOnLine*, 54(2), 265–270.
- Variyani, V. I. (2021). Performance of Fuzzy Inference System for Calorific Value Predicting by Using The Mamdani Method. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 11(1), 87–94. <https://doi.org/10.13057/ijap.v11i1.44122>

Yusuf, A. N. A., Arifin, A. S., & Zulkifli, F. Y. (2021). Recent development of *Smart Traffic Lights*. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 10(1), 224–233. <https://doi.org/10.11591/ijai.v10.i1.pp224-233>